

Normen voor het meten en beoordelen van lichaamstrillingen

P.M. Bongers¹, C.T.J. Hulshof²,
H.C. Boshuizen¹

Summary

To date, exposure to whole-body vibration at the work place is evaluated according to the international standard for evaluation of human exposure to whole body vibration (ISO-2631/1, 1985). The contours of the time-dependence and frequency-dependence of this limit are primarily based on subjective discomfort after short-term exposure experienced by laboratory subjects or by passengers of trains and aircrafts. In an occupational health standard however, only data that allow inference with respect to health or well being at the work place should be considered. In view of these data the frequency- and time-dependence and limits of the current standard are discussed. Since health impairment at or below the current exposure limit does occur, a higher exposure limit as recently proposed is opposed.

Inleiding

Blootstelling aan lichaamstrillingen op de arbeidsplaats wordt meestal geëvalueerd aan de hand van de norm van de International Organization for Standardization (ISO) getiteld 'Evaluation of human exposure to whole-body vibration' (ISO-2631/1, 1985). Deze norm is ook overgenomen door het Nederland Normalisatie Instituut en in 1987 gepubliceerd als NEN-ISO 2631. Er wordt nu meer dan 10 jaar gewerkt aan een herziening van deze norm en in de nabije toekomst wordt dit proces mogelijk afgerond. Bovendien wordt er ook in het kader van de Europese eenwording gewerkt aan nieuwe normstelling op dit gebied (Comité Européen de Normalisation, CEN). Deze Europese norm zal gevolgen hebben voor de normgeving in Nederland. Los van deze ontwikkeling wordt er op het moment ook door de Nederlandse overheid regelgeving voorbereid, gericht op het verminderen van gezondheidsrisico's door blootstelling aan lichaamstrillingen op de arbeidsplaats. Kortom: redenen genoeg om de gezondheidkundige basis van de huidige norm en de recente voorstellen voor nieuwe normgeving aan een kritische evaluatie te onderwerpen. Allereerst wordt kort geschetst hoe de huidige norm tot stand is gekomen en op welke wetenschappelijke gegevens deze norm is gebaseerd. Vervolgens wordt op grond van de op dit moment beschikbare wetenschappelijke gegevens geschetst hoe de norm er in de ogen van de auteurs uit zou moeten zien. Tot slot wordt kort ingegaan op de nieuwste voorstellen.

De geschiedenis en wetenschappelijke basis van de huidige norm

Inleiding

Hoewel in de norm een aantal referenties worden ge-

1. Nederlands Instituut voor Preventieve Gezondheidszorg, Postbus 124, 2300 AC Leiden.
2. Coronel Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, Meibergdreef 15, 1105 AZ Amsterdam.

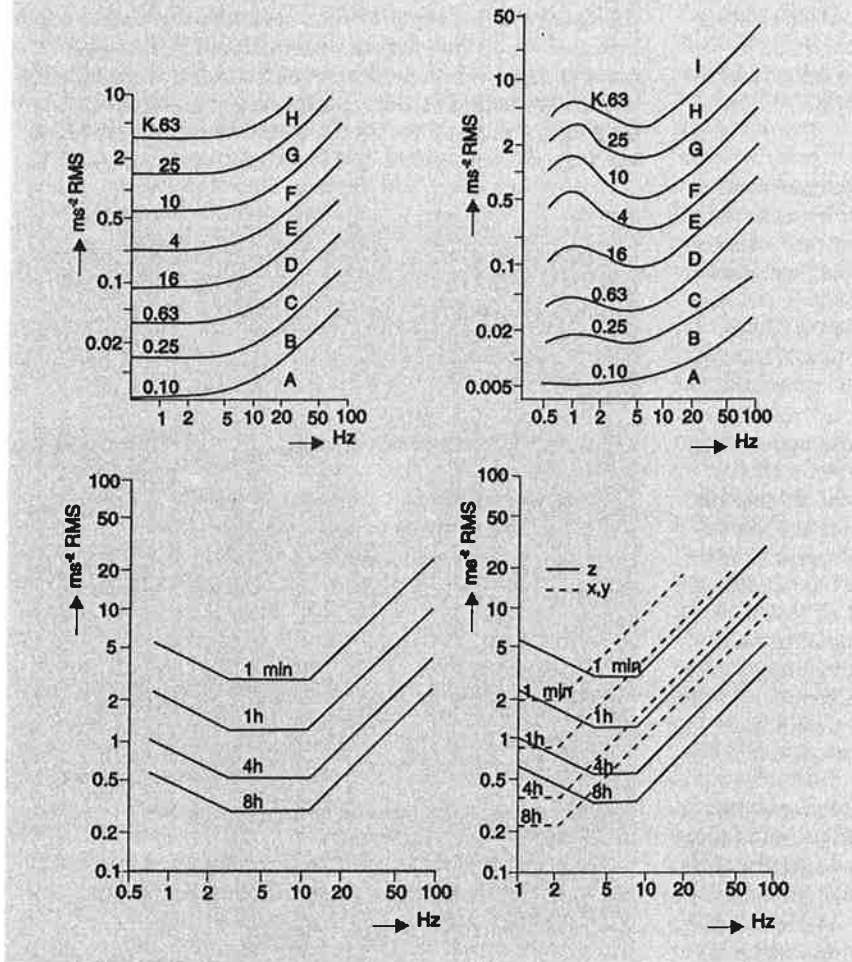
noemd, wordt niet duidelijk aangegeven welke onderzoeken bij het opstellen van de norm een belangrijke rol hebben gespeeld.* In 1964 vond de eerste ISO-vergadering plaats ter voorbereiding van een norm voor expositie aan trillen en schokken, waarbij de Duitse VDI-richtlijn 2057 uit 1963 het uitgangspunt vormde. Het duurde tot 1974 voordat de eerste internationale norm 'Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration' een feit was (ISO-2631, 1974). In 1978 is deze norm vrijwel ongewijzigd opnieuw uitgebracht. In 1982 zijn enkele amendementen aan de norm toegevoegd, waarna in 1985 de norm, na een geringe aanpassing, in z'n huidige vorm tot stand kwam (ISO-2631/1, 1985). In de huidige ISO-2631 wordt verondersteld dat de effecten van trillingen op de mens afhankelijk zijn van de trillingsfrequentie, de richting waarin de trillingen voorkomen en de blootsteldingsduur per dag. Bovendien kent deze norm grenswaarden ter voorkoming van vermindering van comfort (comfortgrens), vermindering van de arbeidsprestatie of het optreden van vermoeidheid (vermoeidheidsgrens) en een zogenaamde uiterste blootsteldingsgrens met elk dezelfde afhankelijkheid van frequentie, richting en blootsteldingsduur.

Afhankelijkheid van frequentie en richting

In de VDI-richtlijn werd de gevoeligheid van de mens voor verschillende trillingsfrequenties bij verschillende trillingsniveaus weergegeven aan de hand van zogenaamde ISO-sensatie curves (figuur 1a). De trillingsniveaus werden uitgedrukt in K-waarden, die correspondeerden met trillingen die nog 'net waarneembaar' waren tot 'ondraaglijke' trillingen. Laboratoriumonderzoek van Reiher en Meister (1931) en Dieckmann (1958a, 1958b) vormde de basis van

* Deze schets van de ontstaansgeschiedenis van ISO-2631 en van de gegevens die ten grondslag liggen aan deze norm is voornamelijk gebaseerd op een rapport van Francken e.a. (1987) en publikaties van Clarke (1979), Osborne (1983) en Von Gierke (1965, 1975).

Figuur 1. Ontwikkeling van frequentieweging in de verticale richting.
a) VDI-1963 b) Coermann (1965) c) Von Gierke (1966) d) ISO-2631 (1967); overgenomen uit Francken e.a. 1987



deze curves. In die tijd waren eveneens gegevens beschikbaar over de resonantiefrequentie van het menselijk lichaam in zittende positie. Deze werd vastgesteld door bij verschillende frequenties de transmissie (versnelling gemeten op het hoofd gedeeld door de versnelling gemeten tussen stoel en zitvlak) te bepalen (Coermann 1962). Uit deze onderzoeken kwam naar voren dat de resonantiefrequentie van de romp tussen de 4 en 5 Hz ligt. Bij deze frequenties is de versnelling van het hoofd 1,5 tot 2 keer zo hoog als die gemeten op de stoel.

De ontwikkeling van de weging wordt weergegeven in figuur 1. De oorspronkelijke VDI-richtlijn uit 1963 kende een frequentieweging afhankelijk van de trillingssterkte. In 1965 werd echter vastgesteld dat deze weging gelijk moest zijn voor de verschillende versnellingsniveaus. In 1966 werd een curve voorgesteld, waarbij het meest gevoelige gebied tussen de onderste grens van de 4 Hz octaafband (2,8 Hz) en de bovenste grens van de 8 Hz octaafband (11,2 Hz) lag. Volgens sommigen diende de curve tot 2,8 Hz vlak te verlopen (luchtvaartdeskundigen), terwijl anderen (uit de autoindustrie) een daling met 6 Db per octaaf ($1/f$) voorstonden. Deze discussie leidde tot een compromis waarbij een daling van 3 Db per octaaf ($1/\sqrt{f}$) werd vastgesteld en het gevoeligste gebied werd verschoven naar 4 Hz. Vanwege de symmetrie werd toen de bovengrens van het gevoeligste gebied op 8 Hz vastgesteld.

Er zijn slechts enkele studies bekend waarin de gevoeligheid van proefpersonen voor horizontale trillingen is

onderzocht (Dieckmann 1958 en Miwa 1967). Dit is hoogst waarschijnlijk gedeeltelijk te wijten aan het feit dat er meer triltafels beschikbaar waren die verticale trillingen genereerden dan horizontale. Volgens Osborne (1983) zijn door Bryce (1966) enkele studies over gevoeligheid voor horizontale trillingen beoordeeld. Dit resulteerde in een weegcurve die redelijk overeenkwam met de weging voor verticale trillingen. Volgens Francken e.a. (1987) was het eerste voorstel voor de frequentieweging in horizontale richting ontleend aan een norm die gehanteerd werd bij de Franse spoorwegen (UIC). Deze weging was gelijk aan die in de verticale richting, met dat verschil dat het meest gevoelige gebied een factor $\sqrt{2}$ (3 Db) lager lag. Miwa (1967) heeft op grond van onderzoek bij slechts 10 personen vastgesteld dat de mens gevoeliger is voor trillingen in de horizontale richting dan in de verticale richting. De voorstellen voor weging naar frequentie van verticale en horizontale trillingen werden in 1969 opgenomen in een eerste concept-norm. Alleen de weging in de horizontale richting onderging daarna nog een ingrijpende wijziging (zie figuur 1d) met tussen 1 en 2 Hz een vlak verloop en boven 2 Hz een stijging van $1/f$ (6 Db per octaaf). Deze wegingen werden vastgesteld in 1974 en zijn sindsdien niet meer gewijzigd.

Conclusie: De weegcurve voor verticale trillingen van verschillende frequenties is gebaseerd op onderzoek naar subjectieve beleving en resonantieverschijnselen bij proefpersonen (veelal in reactie op harmonische trillingen). De verhoogde gevoeligheid van de mens voor trillingen in de

horizontale richting lijkt ontleend aan één studie met 10 personen. De uiteindelijk curve voor de frequentie-afhankelijkheid in de verticale richting lijkt een redelijke weergave van de beschikbare gegevens in die tijd. Hoewel verlenging van het gevoelige frequentiegebied naar hogere frequenties, zowel in verticale als in horizontale richting, eveneens in overeenstemming was geweest met de beschikbare data. De basis voor een andere weging in horizontale dan in verticale richting lijkt beperkt.

Tijdsafhankelijkheid

In de huidige norm wordt ervan uit gegaan dat de gevoeligheid voor trillingen (comfort, verminderde prestatie/vermoeidheid en gezondheid) toeneemt met een toenemende blootstelduur binnen 24 uur. De basis van deze veronderstelling is echter zeer mager. In 1965 is de vorm van deze tijdsafhankelijkheid voorgesteld en is tevens besloten dat deze tijdsafhankelijkheid onafhankelijk is van de frequentie. In de norm worden geen referenties genoemd waarop deze curve is gebaseerd. Uit publikaties van Von Gierke (1965 en 1975) en latere discussies over deze tijdsafhankelijkheid (Clarke 1981, Osborne 1983, Francken e.a. 1987) kan worden afgeleid dat de curve is gebaseerd op gegevens van Mauzin, Sperling en Notess. Zowel Mauzin (ongepubliceerde data) als Sperling (1956, 1958) hebben treinpassagiers na een korte blootstelduur gevraagd te schatten na hoeveel tijd zij vermoeid zouden raken. Notess (1963) heeft vastgesteld hoe de prestatie van piloten na 2 uur vliegen achteruitgaat. Deze gegevens komen de eerste 20 minuten overeen met de gegevens van Mauzin en Sperling over vermoeidheid. Gezamenlijk vormen zij de curve voor *vermoeidheid/verminderde prestatie*.

De curve voor tijdsafhankelijkheid voor *comfort* is ontleend aan de geschatte duur waarna comfortvermindering zou optreden bij treinpassagiers (Mauzin, ongepubliceerde data) en vliegtuigpassagiers (Notess, 1963).

De schatting van de tijdsafhankelijkheid van de *uiterste blootstellingsgrens* (tolerantie) is geschat door vliegers te vragen een schatting te maken van de tijd dat zij hoge versnellingsniveaus zouden kunnen tolereren (Notess 1963). Volgens Allen (1975, geciteerd door Osborne 1983) zijn deze schattingen zelfs gedeeltelijk ingegeven door de angst van de vliegers voor beschadiging van het vliegtuig in plaats van zichzelf. Voor comfort, vermoeidheid en gezondheid is in 1974 dezelfde tijdsafhankelijkheidscurve vastgesteld (figuur 2). De comfortgrens ligt een factor 3,15 onder de vermoeidheids-/verminderde prestatiegrens, de uiterste blootstelling een factor 2 erboven. In 1982 werd in een amendement een benadering van de tijdsafhankelijkheidscurve gegeven tussen 10 minuten en 24 uur (a^2t is constant), waarmee een dosis van gelijke energieinhoud wordt aangegeven (vergelijk het 'equal energy principe' dat ook bij blootstelling aan lawaai wordt gehanteerd).

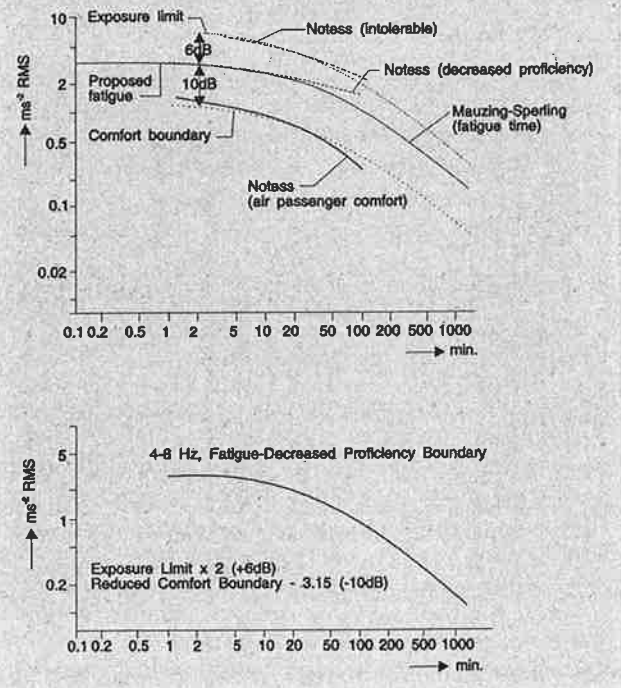
Conclusie: De tijdsafhankelijkheidscurve is niet gebaseerd op experimenten met langdurige blootstelling maar op schattingen over het optreden van verminderd comfort, vermoeidheid of prestatievermindering en uiterste tolerantie na een werkelijke blootstelling van korte duur. De schatting over comfortdaling is gemaakt door vliegtuigen treinpassagiers, voor vermoeidheid door treinpassagiers en voor de uiterste blootstellingsgrens door vliegers. Het optreden van verminderde prestatie is vastgesteld na 2 uur blootstelling bij vliegers.

Grenswaarden

De vraag of de norm ook grenswaarden diende te bevatten is van het begin af aan onderwerp van discussie geweest. In eerste instantie leefde er een sterke behoefte aan

het standaardiseren van de meetmethode, maar daarnaast wilde men in de norm aanwijzingen geven voor ontwerpers voor het bereiken van optimaal comfort (bijv. treinreizigers), richtlijnen geven voor behoud van de veiligheid (bijv. piloten) en voor de uiterste blootstelling, zodat proefpersonen bij experimenten geen direct gevaar zouden lopen. In de eerste officieel vastgestelde norm werden daarom grenswaarden opgenomen voor deze verschillende doelen. De basis van deze grenswaarden is echter onduidelijk. Volgens Von Gierke (1965) is de uiterste blootstellingsgrens gebaseerd op laboratoriumexperimenten bij

Figuur 2. a) voorstel voor tijdsafhankelijkheid van Von Gierke (1966) b) tijdsafhankelijkheid ISO 2631 (1982). Overgenomen uit Francken e.a. (1987)



vliegers waarin de pijngrens bij korte blootstellingstijden werd vastgesteld (Temple 1964, Magid en Coermann 1960). Het intercept van de uiterste blootstellingsgrens is volgens Von Gierke vastgesteld op de helft van deze pijngrens. Op grond waarvan de hoogte van de vermoeidheidsgrens en de comfortgrens zijn vastgesteld is onduidelijk.

Een norm gebaseerd op gezondheidkundige gegevens

Zoals uit bovenstaande blijkt zijn de frequentie-afhankelijkheid en de tijdsafhankelijkheid van de huidige isonorm met name gebaseerd op onderzoek naar gevoeligheid en verminderde prestatie van proefpersonen in het laboratorium of op comfortgevoel bij passagiers van trein of vliegtuig. Bij het opstellen van een norm voor bescherming van werknemers zou echter de nadruk moeten liggen op de gezondheidseffecten ten gevolge van beroepsmatige blootstelling. Daarnaast zal ook gekeken kunnen worden naar hinder en het optreden van vermoeidheid op het werk. Voor zover zij een gezondheidkundige (veiligheidskundige) interpretatie toelaten of ondersteunen zijn ook biomechanische gegevens en fysiologische effecten hierbij van belang. In aanvulling op deze gegevens kunnen ook de gegevens over subjectieve beleving en prestatievermindering onder laboratoriumcondities worden bestudeerd.

Opvallend in dit verband is het verschil in de wijze waarop ergonomische normen voor bescherming van de gezondheid van werknemers tot stand komen (waaronder de trillingen-norm) en de normen voor chemische blootstelling tijdens het werk. Staat bij het vaststellen van een norm voor chemische blootstelling het voorkomen van de nadelige gevolgen voor de gezondheid (ook op de lange termijn) centraal, bij ergonomische richtlijnen spelen ook andere aspecten een belangrijke rol zoals het standaardiseren van de meetmethode en het presenteren van gegevens voor een optimaal ontwerp. Door Sandover (1979) is naar voren gebracht dat in de praktijk blijkt dat deze verschillende doelen veelal verschillende eisen stellen aan een norm en daarom moeilijk te combineren zijn en beter gescheiden zouden kunnen worden. Het is ook opvallend dat in de ISO-commissie vrijwel uitsluitend personen zitting hebben met een technische achtergrond en weinig deskundigen met een gezondheidkundige achtergrond. Dit is verklaarbaar als het primaire doel van de norm het standaardiseren van de meetmethode is. Het is echter moeilijk aan te geven waar standaardisering van de meetmethode ophoudt en het evalueren van de gezondheidseffecten begint (zoals bij het opstellen van de weegcurve voor de frequentiegevoeligheid). In het hiervolgende zullen voor de verschillende elementen van de norm de beschikbare gezondheidkundige gegevens worden gepresenteerd en geëvalueerd. Daarbij worden eerst epidemiologische gegevens besproken gevolgd door biomechanische data, gegevens over comfort bij beroepsmatige blootstelling en over comfort/gevoeligheid bij laboratoriumexperimenten.

Frequentie afhankelijkheid

Uit recent Nederlands epidemiologisch onderzoek (Bongers & Boshuizen 1990) blijkt dat chauffeurs van verscheidene voertuigen en helikoptervliegers een verhoogd risico hebben op rugklachten. Helikoptertrillingen hebben een hogere frequentie dan voertuigtrillingen. Daardoor valt de volgens ISO-2631 frequentiegewogen intensiteit voor helikoptertrillingen laag uit, ten opzichte van de ongewogen waarde. Gezien het hoge risico op lage rugklachten bij de helikoptervliegers zou hieruit kunnen worden geconcludeerd dat trillingen met een frequentie boven de 8 Hz ten onrechte slechts in geringe mate worden meegewogen. Helikoptervliegers verschillen echter ook in veel andere opzichten (met name de houding) van chauffeurs waardoor deze conclusie niet hard gemaakt kan worden. Ons is geen ander epidemiologisch onderzoek bekend waarin wordt ingegaan op risico's bij verschillende dominante frequenties. De schadelijkheid van trillingen met verschillende frequenties voor het menselijk lichaam kan dus niet worden vastgesteld op grond van beschikbare epidemiologische gegevens.

Zoals ook al uit experimenten bleek voor de vaststelling van ISO 2631 heeft het menselijk lichaam in zittende positie in reactie op verticale trillingen een resonantiefrequentie van ongeveer 4 tot 5 Hz. Hoewel latere transmissie en impedantiemetingen een groter inter- en intraindividuele spreiding laten zien (afhankelijk van bijvoorbeeld houding en gewicht) worden deze bevindingen in meer recent onderzoek bevestigd (Griffin 1975, Bastek e.a. 1977a, 1977b, Sandover 1978, Griffin 1978, 1979, Seidel e.a. 1980, Wilder e.a. 1982, 1985, Hinz en Seidel 1978, Hinz e.a. 1988b). Voor het schatten van de belasting van de wervelsegmenten en daarmee van de kans op schade tijdens blootstelling aan trillingen, zijn echter gegevens over de relatieve verplaatsing van naast elkaar gelegen wervels van meer belang dan bewegingen van het bovenlichaam als geheel. In verschillende recente laboratoriumstudies zijn de bewegingen van de wervels tijdens

blootstelling aan verticale trillingen bestudeerd aan de hand van pinnen of Kirschner-draden die aan de wervels waren bevestigd (Panjabi e.a. 1986, Hagena e.a. 1986, Pope e.a. 1986 en Sandover en Dupuis 1987). Hinz e.a. (1988b) berekende de relatieve bewegingen van de wervellichamen aan de hand van op de huid aangebrachte versnellingsopnemers. Uit deze studies komt naar voren dat, ook indien het lichaam alleen in de verticale richting in trilling wordt gebracht, de wervels ten opzichte van elkaar bewegen in verticale en in horizontale richting. Bovendien treedt tegelijkertijd rotatie op. Omdat in geen van deze nogal invasieve studies alle relevante gegevens worden gepresenteerd en bovendien de resultaten niet volledig overeenkomen is het moeilijk om duidelijke uitspraken te doen over het frequentiegebied met het hoogste risico op schade. Panjabi e.a. (1986) en Sandover en Dupuis (1987) concluderen dat met name in de onderste lumbale wervels de maximale belasting optreedt bij 4 en 5 Hz. Hagena e.a. (1986) leggen echter de nadruk op het belang van een relatieve beweging van de wervels ten opzichte van het sacrum die met name optreedt tussen 7 en 10 Hz. Uit de berekeningen van Hinz e.a. (1988b) volgt dat bij 4,5 en 8 Hz de relatieve verplaatsing van de lumbale wervels hoog is. Deze studies geven aan dat de belasting van de wervelkolom vanwege complexe relatieve bewegingen hoog is bij blootstelling aan verticale trillingen met een frequentie tussen 3,5 en 10 Hz.

Daarnaast zijn er ook studies waarbij de belasting van de wervelkolom wordt geschat aan de hand van EMG-metingen van de rugspieren. Door Seidel (1988b) is vastgesteld dat tussen 0,6 en 1,2 Hz de EMG-activiteit van de spieren in fase is met de aangeboden trilling. Tussen 2,5 en 5 Hz is dit echter niet het geval. Deze gegevens worden ondersteund door eerder onderzoek waarin aan de hand van impedantiemetingen was vastgesteld dat bij trillingen met een frequentie beneden de 2 Hz, het lichaam als een pure massa kan worden beschouwd (Magid en Coermann 1960, Sandover 1981). Ook in eerdere studies is door Seidel (1986) uit EMG-metingen van de rugspier afgeleid dat met name bij 4,5, 7,5 en 8 Hz de belasting van de wervelkolom bij blootstelling aan trillingen hoog is. Seroussi e.a. (1989) vonden eveneens een verhoogde rugspieractiviteit in respons op blootstelling aan lichaamstrillingen tussen 3 en 10 Hz met een maximale toename in reactie op trillingen van 3,4 en 5 Hz. Dus ook deze studies suggereren dat met name blootstelling aan trillingen tussen 3 en 10 Hz een hoge belasting voor de wervelkolom betekent.

Verscheidene onderzoekers hebben geprobeerd de belasting van de wervelkolom onder invloed van trillingen vast te stellen door de verandering in lichaamslengte bij verschillende trillingsfrequenties vast te stellen (Klingenshirna en Pope 1987, Bonney 1988, Sullivan en McGill 1990). Deze studies lijden echter tot tegengestelde resultaten.

Er zijn vrijwel geen gegevens over de frequentieafhankelijkheid van het risico op gezondheidsschade bij blootstelling aan trillingen in horizontale richting. Gegevens over subjectieve beleving van de horizontale trillingen tijdens beroepsmatige blootstelling suggereren dat het menselijk lichaam het gevoeligst is voor trillingen met een frequentie tot 4 Hz in plaats van tot 2 Hz zoals in de huidige norm wordt aangegeven (Wikström e.a. 1989). Laboratoriumexperimenten (naar gevoeligheid) lijken dit te bevestigen (Donati e.a. 1983, Griffin e.a. 1982). Hansson en Wikström (1981) concluderen op grond van gegevens over de subjectieve beleving van beroepsmatige blootstelling dat er geen reden is om ook trillingen van 0,5 tot 1 Hz mee te wegen.

Conclusie: Bovenstaande gegevens geven aan dat bij blootstelling aan verticale trillingen het risico op rugklachten ►

en rugaandoeningen het hoogste is bij trillingen met een frequentie tussen de 3 en 10 Hz. Voor horizontale trillingen zijn vrijwel geen gegevens beschikbaar.

Tijdsafhankelijkheid

Nadat in 1974 de tijdsafhankelijkheid in de eerste gepubliceerde norm is vastgelegd, zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd om deze relatie te onderzoeken. Deze onderzoeken richtten zich echter met name op het optreden van prestatievermindering na een bepaalde blootstellingsduur. In veel latere publikaties werd met name de sterke vermindering van prestatie tijdens de eerste 4 uur blootstelling ernstig betwijfeld (Maslen 1972, Guignard e.a. 1976, Clarke 1979, Griffin en Lewis 1978, Griffin en Whitman 1980, Kjellberg en Wikström 1985a, 1985b). Ook deze studies zijn echter gebaseerd op het optreden van vermoeidheid of prestatievermindering onder laboratoriumcondities, veelal na blootstelling aan harmonische trillingen in verticale richting.

Slechts indien een relatie wordt verondersteld tussen de gezondheid of veiligheid van werknemers en de dagelijkse blootstellingsduur heeft het zin in de norm expliciet aandacht aan deze relatie te besteden. Voor schade aan de wervelkolom, waarbij een cumulatief proces over jaren wordt verondersteld, is deze tijdsafhankelijkheid binnen 24 uur mogelijk minder relevant. Er zijn echter aanwijzingen dat andere gezondheidseffecten wel gerelateerd zijn aan de dagelijkse trillingsdosis. Krogh-Lund en Voss (1989) rapporteren dat bij bestuurders van verschillende voertuigen na een halve werkdag vermoeidheid van de m. erector spinae optrad. Bij hoog blootgestelde Bob-cat bestuurders ($1,1 \text{ m/s}^2$) was dit reeds na 2 uur het geval, terwijl bij laag blootgestelde bestuurders van locomotieven ($0,2 \text{ m/s}^2$) geen spiervermoeidheid optrad en bij bestuurders van bulldozers met rupsbanden ($0,3 \text{ m/s}^2$) de spiervermoeidheid pas optrad aan het eind van een volledige werkdag. Ook door Wilder e.a. (1982) werd in het laboratorium na 30 minuten blootstelling aan trillingen spiervermoeidheid gemeten. Helaas waren bij deze experimenten geen metingen uitgevoerd bij zittende proefpersonen zonder trillingsblootstelling. In twee studies waar dat wel werd gedaan (Pope e.a. 1986b, Shanahan and Reading 1984) werd geen duidelijk verschil tussen de blootgestelde en niet blootgestelde proefpersonen gevonden.

Er zijn geen onderzoeksresultaten beschikbaar die ingaan op de relatie tussen de duur van beroepsmatige blootstelling en het optreden van vermoeidheid of vermindering van de werkkuitvoering en daardoor een verhoogde kans op ongelukken.

Conclusie: Voor schade aan de wervelkolom ligt het meer voor de hand om uit te gaan van cumulatief effect van blootstelling gedurende een arbeidsleven. Voor een dergelijk effect is een tijdsafhankelijkheid voor 1 minuut tot 24 uur minder relevant. Gegevens uit één onderzoek lijken echter wel een toename van korte termijn-effecten zoals het optreden van spiervermoeidheid met het toenemen van de dagelijkse blootstellingsduur aan te geven. Deze data suggereren dat het effect van 2 uur blootstelling aan $1,2 \text{ m/s}^2$ overeenkomt met 6 uur blootstelling aan $0,2 \text{ m/s}^2$.

Schokken

De meetmethode van de huidige ISO-norm is eigenlijk alleen van toepassing op trillingen met een maximale crest-factor (de hoogst gemeten waarde gedeeld door de gemiddelde effectieve versnelling, ook wel piekfactor genoemd) van 6. Volgens sommigen zou dit zelfs een crestfactor van 3 moeten zijn (Francken e.a. 1987, Ramaekers 1986). Dit betekent dus dat de huidige richtlijn

niet geschikt is voor het meten van trillingen waarin (veel) schokken voorkomen. Deze restrictie is gemaakt om de validiteit van de meting te garanderen, maar of de crestfactor daarvoor een geschikte maat is, is altijd zeer omstreden geweest in de ISO-commissie (Francken e.a. 1987, Ramaekers 1986). De huidige norm bevat geen methode om het schokkarakter van exposities aan trillingen en de daaruit eventueel voortvloeiende extra gevolgen voor de gezondheid te evalueren.

Hoewel hierover weinig gegevens beschikbaar zijn, lijkt het erop dat zowel de hoogte van de maximale versnelling, het aantal 'schokken' als de aard van de schok van belang zijn voor het optreden van schade aan de wervelkolom (Dupuis 1990). Volgens een hypothese van Sandover (1981, 1985, 1988) kan door trillingen en schokken weefselmoetheid, analoog aan de materiaalmoetheid optreden. Uit in-vitro-experimenten kan worden afgeleid dat dergelijke schade een lineair verband vertoont met het aantal cycli (blootstellingsduur) maar een exponentiële (exponent groter dan 5) functie is van de sterkte van de trilling. Dit zou betekenen dat met name hoge piekwaarden (schokken) van belang zijn voor het risico op schade. Verschillende auteurs hebben dan ook gepleit voor een methode om het aantal pieken boven een bepaald niveau te tellen (Dupuis 1985, Wikström e.a. 1987, 1989). Uit onderzoek van Wikström e.a. (1987) naar de relatie tussen verschillende maten voor het schokkarakter van trillingen en de subjectieve beleving (comfort) tijdens beroepsmatige blootstelling, bleek dat de verschillen zeer klein waren. De gewogen effectieve versnelling (rms waarde) gaf samen met drie andere maten de beste correlatie. In de praktijk blijkt veelal ook een hoge correlatie te bestaan tussen de hoogst gemeten piekwaarde en de rms-waarde (Mulder en Remijn 1989, Boshuizen e.a. 1990). *Conclusie:* Vanwege de technische moeilijkheden zal het niet eenvoudig zijn om in de norm schokken op adequate wijze te behandelen. Gezien de gegronde vermoedens dat juist schokken een nadelige invloed hebben op de gezondheid is het wel van belang een methode op te nemen voor de gezondheidkundige evaluatie van schokken. Het tellen van het aantal keren dat piekwaarden boven een bepaald niveau voorkomen in een volgens een standaardprocedure gekozen gedeelte van het opgenomen signaal (bijvoorbeeld 1 minuut) lijkt voorlopig een aanvaardbare methode bij gebrek aan een betere maat.

Trillingen met een breed frequentiespectrum en uit verschillende richtingen

Gezien de grote intra- en interindividuele variatie in respons op trillingen van verschillende frequentie en het brede frequentiespectrum waarvoor het menselijk lichaam gevoelig is, ligt het voor de hand niet alleen de intensiteit van de trillingen in de 'ergste frequentieband' te bepalen maar van de trillingen in een veel breder frequentiegebied. In de ISO-normcommissies is consensus bereikt over de voorkeur van de zogenaamde 'weighting method' boven de 'rating method'. Ook comfortgevoel blijkt beter te correleren met de frequentiegewogen versnelling dan met de hoogste versnelling uit de 'ergste tertsbands'. Wat betreft het evalueren van trillingen in verschillende richtingen bestaat er minder consensus. Uit experimenten blijkt dat ook bij aanstoting alleen in de verticale richting vervolgens complexe bewegingen optreden in de wervelkolom, waardoor ook relatieve verplaatsingen van de wervels in de horizontale richting optreden. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat deze bewegingen worden versterkt indien het aangeboden signaal niet alleen uit verticale maar ook uit horizontale en rotatie-trillingen bestaat. Dit zou betekenen dat de belasting van de wervelkolom toeneemt bij blootstelling aan trillingen in ver-

schillende richtingen, hetgeen zou pleiten voor het sommeren van de trillingen uit verschillende richtingen. Ook Hansson en Wikström (1981) vonden dat de vectorsom beter correleerde met subjectief comfort gevoel tijdens beroepsmatige blootstelling dan wanneer alleen de trillingen in de 'ergste' richting werden geëvalueerd.

Conclusie: Voertuigtrillingen hebben over het algemeen een vrij breed frequentiespectrum en komen voor in meerdere richtingen. Voor het evalueren van deze trillingen in relatie tot gezondheidseffecten verdient het de voorkeur een vectorieel opgetelde frequentiegewogen versnellingswaarde te bepalen.

Grenswaarden

In het bovenstaande is beargumenteerd dat indien de schadelijke effecten van beroepsmatige blootstelling aan trillingen op de gezondheid moeten worden geschat, hiervoor het beste het frequentiegewogen (meest gevoelige frequentiegebied tussen de 3 en 10 Hz) en vectorieel opgetelde versnellingsniveau kan worden bepaald en dat daarnaast de hoogte en de frequentie van schokken dient te worden beoordeeld.

Hiermee is echter niet gezegd bij welk versnellingsniveau er ook daadwerkelijk gezondheidseffecten worden verwacht.

Het opstellen van een dosis respons-relatie wordt bemoeilijkt doordat in de meeste epidemiologische onderzoeken adequate informatie over de blootstelling ontbreekt.

Daarnaast is het erg moeilijk om de effecten van de expositie aan trillingen en schokken en van het werken in een belastende en eenzijdige houding tijdens het rijden in voertuigen en het vliegen in helikopters van elkaar te onderscheiden of de onderlinge interactie goed in kaart te brengen.

Ook in de onderlinge vergelijking tussen bestuurders van verschillende voertuigen met verschillende trillingssterkte is het nog niet mogelijk geweest afdoende te corrigeren voor het verschil in belastende omstandigheden. Het is op grond van de beschikbare gegevens daarom niet mogelijk een trillingsniveau aan te geven waarbij geen verhoogd risico op rugklachten wordt verwacht, het zogenaamde no-effect level (Boshuizen e.a. 1990). Uit de experimentele literatuur zijn er verschillende gegevens bekend om te veronderstellen dat juist de combinatie van een slechte houding en expositie aan trillen en schokken het risico op rugklachten kan verhogen.

Uit bovenstaande blijkt dat er slechts beperkte gegevens beschikbaar zijn om grenswaarde op te baseren. Het voorhanden zijnde epidemiologische onderzoek geeft echter aan dat bij een blootstelling ter hoogte van de huidige blootstellingsgrens voor 8 uur ($0,63 \text{ m/s}^2$) een verhoogd risico op rugklachten en rugaandoeningen optreedt (Seidel en Heide 1986, Dupuis 1989, Bongers en Boshuizen 1990). Daarnaast geeft 50% van de werknemers aan hinder te ondervinden van deze trillingsniveaus. Uit deze gegevens kan worden afgeleid dat de huidige 8 uren-blootstellingsgrens de werknemers onvoldoende beschermt tegen rugklachten ten gevolge van langdurige blootstelling.

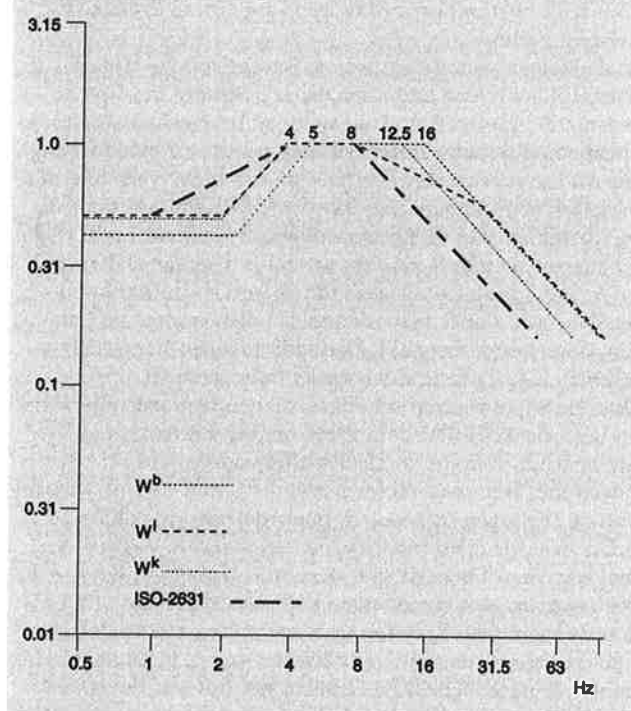
Nieuwe ontwikkelingen

Op dit moment wordt op vele fronten gewerkt aan nieuwe regelgeving. De ISO probeert krampachtig al meer dan 10 jaar de besprekingen over herziening van de huidige norm af te ronden. Tegelijkertijd wordt met het Europa van 92 in het vizier, koortsachtig gewerkt aan regelgeving in CEN-verband. Daarnaast wordt zowel door de Nederlandse overheid als door de EEG (Europese richtlijn voor fysische factoren) regelgeving op dit gebied voorbereid. Deze nieuwe voorstellen en de gegevens waarop zij zijn gebaseerd zullen hieronder kort worden besproken.

Veranderingen van de ISO-norm

Sinds de publikatie van de huidige ISO-norm uit 1985, zijn twee nieuwe concept-voorstellen gepubliceerd, de laatste in 1989 (Revised Draft Proposal ISO/DP 2631-Guide to the evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration - 1989). Inmiddels is een nieuw voorstel in voorbereiding dat nog niet officieel is gepubliceerd (Third Committee Draft: Guide to the evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration; revision of ISO 2631, 1990). Op dit laatste voorstel is opnieuw uitgebreide kritiek gekomen waardoor de goede hoop op

Figuur 3. Nieuwe voorstellen voor de frequentieweging in de verticale richting



acceptatie van dit voorstel in de nabije toekomst weer teniet is gedaan. De nieuwste voorstellen kennen een aantal ingrijpende wijzigingen ten opzichte van ISO-2631. Deze wijzigingen hebben met name betrekking op de frequentieweging, de tijdsafhankelijkheid, de benadering van schokken en de grenswaarden.

Figuur 3 laat de nieuwe frequentieweging voor verticale trillingen zien uit het laatste voorstel (W_k). Weging W_b en W_i werden beiden gepresenteerd in het voorstel uit 1989 (ISO/DP, 1989), weging W_k vormt het nieuwe compromis tussen deze wegingen. Ook in deze nieuwe voorstellen zijn geen referenties opgenomen, waardoor het onduidelijk is op welke gegevens ze precies zijn gebaseerd. In verschillende publikaties van Griffin (1988, 1989) wordt gesuggereerd dat weging W_b , die gelijk is aan de weging uit de Britse norm (BSO 1987), is gebaseerd op een zeer uitgebreid onderzoekprogramma van Griffin en anderen (1982a, 1982b, 1985) naar subjectieve beleving en transmissie bij proefpersonen in het laboratorium. Hoewel deze metingen met geavanceerde methoden zijn uitgevoerd, is deze weging in feite gebaseerd op gegevens van vergelijkbare aard als de ISO-norm uit 1974. Weging W_i lijkt gebaseerd te zijn op een overzicht van relevante gezondheidkundige gegevens over transmissie van wervelsegmenten (Panjabi e.a. 1986, Hagena e.a. 1986 en Hinz e.a. 1988) en activiteit van de rugspier (ongepubliceerd rapport van Seidel 1988). De verplaatsing van het meest gevoelige frequentiegebied van 4 naar 5 Hz ►

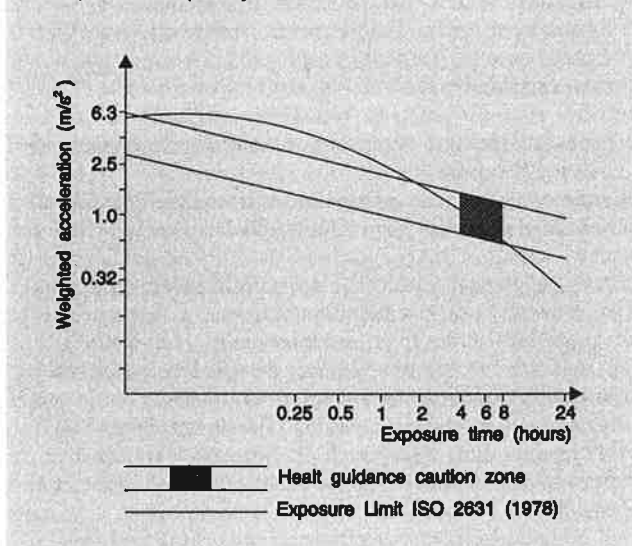
in weging W_b is duidelijk in tegenspraak met gezondheidskundige gegevens. Het is dan ook verheugend te constateren dat dit aspect niet is overgenomen in weging W_k uit het laatste voorstel. De verbreding van het gevoelige frequentiegebied naar 12,5 Hz wordt door de beschikbare gegevens ondersteund. Het feit dat de trillingen tussen 3 en 4 Hz bij W_k minder sterk worden meegewogen dan voorheen lijkt geen verbetering. Gezien het feit dat de dominante frequentie van veel voertuigen juist in dit gebied ligt zal deze verandering van de weging resulteren in lagere gewogen effectieve versnellingen. De weging in de horizontale richting blijft onveranderd behalve dat het meest gevoelige frequentiegebied op hetzelfde niveau (en niet 3 dB lager) komt te liggen als dat in de verticale richting. Hiermee is de gedachte dat de mens gevoeliger is voor trillingen in horizontale richting dan in verticale richting verlaten.

In de nieuwe voorstellen is het concept van de tijdsafhankelijkheid voor gezondheidsbescherming ingrijpend veranderd. In een Annex waarin ook de grenswaarden zijn opgenomen wordt vermeld dat, in geval van blootstelling aan trillingen van verschillende sterkte voor verschillende periodes, een trillingsdosis kan worden berekend door de vierde macht van de trillingsniveaus bij elkaar op te tellen en daaruit de vierde macht wortel te trekken. Hieruit blijkt dat in relatie tot gezondheid een tijdsafhankelijkheid van $a^4 t$ wordt verondersteld indien een totale trillingsdosis wordt bepaald. Perioden met een hoge trillingsintensiteit krijgen zo dus relatief meer gewicht.

Over de wijze waarop schokken dienen te worden gemeten en beoordeeld is wederom grote onenigheid ontstaan. In het concept-voorstel in 1989 wordt voorgesteld bij trillingen met een crest-factor boven de 6 niet de rms-waarde van de trillingen te bepalen, maar de rmq (root mean quad)-waarde. Dit resulteert in een sterkere weging van piekwaarden. De basis van deze rmq-bepaling lijkt te zijn ontleend aan een studie van Griffin en Whitman (1980a) waarbij een dergelijke relatie is gevonden tussen de gevoeligheid voor sinusvormige trillingen van 4, 8, 16 en 32 Hz en de blootstellingsduur. Behalve het feit dat het hier wederom om een vermindering van het comfort gaat, was de maximale blootstelling bij dit experiment slechts 32 seconde! De basis voor deze rmq-weging (die de norm erg complex maakt) is dus erg mager. Op grond van de eerder genoemde weefselmoedigheid-hypothese van Sandover lijkt een sterkere weging van de piekwaarden door middel van een rmq-bepaling echter ook voordelen te hebben. In het nieuwste voorstel wordt deze rmq-methode alleen voorgesteld voor trillingen met een crest-factor groter dan 12. Bovendien wordt voor dergelijke trillingen nog een tweede evaluatiemethode voorgesteld: de zogenaamde 'running rms-waarde'; de rms-waarde geïntegreerd over 1 seconde. In deze nieuwe voorstellen worden geen grenswaarden meer gesteld voor comfort, vermoeidheid/verminderde prestatie en uiterste blootstelling. Het begrip vermoeidheid/verminderde prestatie komt in de nieuwe voorstellen in het geheel niet meer voor. Voor comfort worden slechts suggesties gedaan voor de interpretatie van verschillende meetwaarden, variërend van 'not uncomfortable ($< 0,32 \text{ m/s}^2$)' tot 'extremely uncomfortable ($> 2,0 \text{ m/s}^2$)'. Voor de bescherming van gezondheid wordt een zogenaamde 'Health Guidance Caution Zone' voorgesteld. In het eerste wijzigingsvoorstel werd deze zone ook grafisch weergegeven (figuur 4). In het laatste voorstel wordt slechts aangegeven hoe deze waarden te berekenen. Bovendien is de bovengrens van de oorspronkelijke zone verlaagd. Bij trillingsniveaus boven de zone 'disorders are probable', binnen de zone 'disorders can occur' en onder de zone is 'insufficient evidence to indicate any disorders'. Figuur 4 laat zien dat bij de blootstellingstijden voor

beroepsmatige blootstelling (4 tot 8 uur) de bovengrens van deze zone boven de huidige blootstellingsgrens ligt. Ook het vectorieel optellen van trillingen uit de verschillende richtingen is niet meer toegestaan. Hierdoor betekent dit voorstel een duidelijke verhoging van de grenswaarde voor gezondheid. In de huidige norm wordt slechts gesproken over een uiterste blootstellingsgrens die bedoeld was voor bescherming van individuen bij korte blootstellingsduur (experimenten). In de nieuwe voorstellen wordt echter een hogere grenswaarde opgenomen

Figuur 4. Health Guidance Caution Zone zoals voorgesteld in ISO/DP-2631 (1989)



ter bescherming van de gezondheid bij langdurige blootstelling.

Ontwikkelingen in CEN-verband

Door de CEN is een zogenaamde machine-richtlijn opgesteld, die binnenkort zal worden aangenomen. Hierin is vastgelegd dat voor machines (zoals heftrucks en grondverzetmachines, niet wegvervoer en tractoren) vermeld dient te worden of het gemiddelde trillingsniveau tijdens het gebruik van die machine meer dan $0,50 \text{ m/s}^2$ bedraagt. De manier waarop dit dient te worden vastgesteld wordt nader uitgewerkt in een CEN-norm. Deze norm is wat betreft de meetmethode ontleend aan ISO-2631. Er zijn echter geen bepalingen opgenomen over het meten van schokken en er wordt geen tijdsafhankelijkheid verondersteld. De frequentieweging die dient te worden gehanteerd is de weging van ISO-2631. Indien echter voor het uitkomen van de CEN-norm door ISO een nieuwe weegcurve wordt vastgesteld dan zal deze worden overgenomen door de CEN.

Nationale regelgeving

Voor wat betreft de machinerichtlijn zal Nederland zich dienen te houden aan de in CEN-verband vastgestelde regelgeving. Het gaat hier voornamelijk echter alleen om een machinegebonden richtlijn die slechts voor een aantal machines van toepassing is (wegvervoer en tractoren vallen er buiten). Voor wat betreft de richtlijnen van de Nederlandse overheid wordt er gedacht aan het vaststellen van een gezondheidsniveau en actieniveau in het kader van de Arbowet (art. 24) en art. 179a van het Veiligheidsbesluit voor fabrieken of werkplaatsen. Bij algemene maatregel van bestuur kan de overheid deze niveaus

vastleggen. Vergelijk 80 dB gezondheidsgrens en 85 dB actiegrens voor lawaai. Het gaat om 8-uurs gewogen vectorieel opgetelde waarden (dit laatste in tegenstelling tot de CEN-norm), gemeten volgens de richtlijnen uit het handboek voor het meten en beoordelen van lichaamstrillingen uitgegeven door DGA (Weiden e.a. 1990). Tot nu toe zijn vanuit het DGA 0,25 m/s² en 0,50 m/s² als zodanig voorgesteld (Iping, 1989), Het is nu echter het beleidsvoornemen de actiegrens vast te leggen op 1,00 m/s².

Samenvattend kan worden gesteld dat er op dit moment verschillende ontwikkelingen gaande zijn, die allen leiden tot een verhoging van de uiterste blootstellingsgrens voor expositie aan trillen en schokken op het werk. Uit het oogpunt van bescherming van de gezondheid van werknemers op lange termijn is dit een ongewenste ontwikkeling.

Literatuur

- Bastek, R., Buchholz, Ch., Denisov, E.I., Enderlein, G., Kramer, H., Malinskaja, N.N., Meister, A., Metz, A., Mucke, R., Rhein, A., Rothe, R., Seidel, H. and Sroka, Ch. (1977a); Comparison of the effects of sinusoidal and stochastic octave-band-wide vibrations – a multi-disciplinary study, Part 1: Experimental arrangement and physical aspects. *Int Arch Occup Environ Health* 39:143-152.
- Bastek, R., Buchholz, Ch., Denisov, E.I., Enderlein, G., Kramer, H., Malinskaja, N.N., Meister, A., Metz, A., Mucke, R., Rhein, A., Rothe, R., Seidel, H. and Sroka, Ch. (1977b); Comparison of the effects of sinusoidal and stochastic octave-band-wide vibrations – a multi-disciplinary study, Part 2: Physiological aspects. *Int Arch Occup Environ Health* 39:153-164.
- Bongers, P.M., Hulshof, C.T.J., Groenhout, H.J., Dijkstra, L., Boshuizen, H.C., Valken, E. (1990); Backpain and exposure to whole body vibration in helicopter pilots. *Ergonomics* 33:1007-1026.
- Bongers, P.M., Boshuizen, H. (1990); Back disorders and whole-body vibration. Proefschrift, Universiteit van Amsterdam.
- Boshuizen, H.C., Bongers, P.M., Hulshof, C.T.J. (1990); Self-reported back pain in tractor drivers exposed to whole-body vibration. *Int Arch Occup Environ Health* 62:117-122.
- Boshuizen, H.C., Bongers, P.M., Hulshof, C.T.J. (1990); Whole-body vibration and back disorders; an outline of the dose-response relation. In Bongers, P.M., Boshuizen, H. (1990); Back disorders and whole-body vibration. Proefschrift, Universiteit van Amsterdam.
- Bonney, R. (1988); Some effects on the spine from driving. *Clin Biomech* 3:236-240.
- BSO (1987); British standard guide to measurement and vibration of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. British Standard Institution. BS-6841.
- Bryce, W.D. (1966); A human criterion for the acceptance of transverse seat vibration. *J Sound Vibrat* 3:384-392.
- Clarke, M.J. (1979); A study of the available evidence on duration effects on comfort and task proficiency under vibration. *J Sound Vibrat* 65:107-123.
- Coermann, R.R. (1962); The mechanical impedance of the human body in sitting and standing position at low frequencies. *Human Factors* 4:227-253.
- Dieckmann, D. (1958a); Einfluss horizontaler mechanischer Schwingungen auf den Menschen. *Int Z Angew Physiol einschli Arbeitsphysiol* 17:83-100.
- Dieckmann, D. (1958b); A study of the influence of vibration on man. *Ergonomics* 1:347-355.
- Donati, P., Grosjean, A., Mistrot, P., Rowe, L. (1983); The subjective equivalence of sinusoidal and random whole-body vibration in the sitting position (an experimental study using the 'floating reference vibration' method). *Ergonomics* 26:251-273.
- Dupuis, H. (1984); Beanspruchung des Menschen durch mechanische Schwingungen. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V. Bonn 1-147.
- Dupuis, H. (1985); Vibration exposure of sitting and lying persons in motor vehicles and ambulances. In Clarke, M.J. (ed); *Ergonomics of vehicle transport*.
- Dupuis, H. (1989); Auswirkungen von Ganzkörperschwingungen. In: *Vibration at work*. ISSA, Wenen 54-58.
- Dupuis, H. (1990); Ganz-Körper-Schwingungen und Wirbesäule; Leserfrage *Arbeitsmed Socialmed Präventivmed* 21:186-187.
- Francken, A.J., Bosman, B., Tegelaar, P. (1987); Onderzoek naar het meten van trillingen en schokken op de arbeidsplaats. ICC-rapport LA-DR-10-03 Staatsuitgeverij/DDP 's-Gravenhage.
- Gierke, H.E. von (1965); On noise and vibration exposure criteria. *Arch Environ Health* 11:327-329.
- Gierke, H.E. von (1975); The ISO standard: 'Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration'. Society of automotive engineers paper 751009.
- Griffin, J. (1975); Vertical vibration of seated subjects: effects of posture, vibration level and frequency. *Aviat Space Environ Med* 46:269-276.
- Griffin, M.J., Whitham, E.M. (1976); Duration of whole-body vibration exposure: Its effect on comfort. *J Sound Vibrat* 48:333-339.
- Griffin, M.J., Lewis, E.M. (1978); A review of the effects of vibration on visual acuity and continuous manual control. *J Sound Vibrat* 56:383-413.
- Griffin, M.J., Lewis, C.H., Parsons, K.C., Whitman, E.M. (1979); The biodynamics of the human body and its application to standards. *AGARD Conf. Proc. No. 253: A-28-18*.
- Griffin, M.J., Whitham, E.M. (1980); Time dependency of whole-body vibration discomfort. *J Acoustic Soc Am* 68:1522-1523.
- Griffin, M.J., Parsons, K.C., Whitham, E. (1982a); Vibration and comfort; I Translational seat vibration. *Ergonomics* 25:603-630.
- Griffin, M.J., Parsons, K.C., Whitham, E. (1982b); Vibration and comfort; IV Application of experimental results. *Ergonomics* 25:721-739.
- Griffin, M.J., Lewis, C.H., Parsons, K.C., Whitham, E.M. (1985); The biodynamic response of the human body and its application to standards. In: *AGARD-CP-253, Neilly-sur Seine A28-1 - A28-18*.
- Griffin, M.J. (1988); International Standard 2631 and British Standard 6841: A comparison of two guides to the measurement and evaluation of human exposure to whole-body vibration and repeated shock. Paper presented at the United Kingdom and French joint meeting on human response to vibration, INRS, France.
- Griffin, M.J. (1989); Measurement and evaluation of whole-body vibration at work. In: *Vibration at work*. ISSA, Wenen 11-16.
- Guignard, J.C., Landrum, G.J., Reardon, E. (1976); Experimental evaluation of international standard (ISO-2631-1974) for whole-body vibration exposures. Technical report 76-University of Deighton Research Institute.
- Hagen, F.W., Wirth, C.J., Pickler, J., Plitz, W., Hofman, G.O., Zwingers, Th. (1986); In-vivo experiments of the response of the human spine to sinusoidal G_z-vibration. *Agard publication* 16-1 - 16-9.
- Hansson, J.E., Wikström, B.O. (1981); Comparison of some technical methods of the evaluation of whole-body vibration. *Ergonomics*, 24:953-963.
- Hinz, B., Seidel, H. (1987); The Nonlinearity of the Human Body's Dynamic Response during Sinusoidal Whole Body Vibration. *Ind Health* 25:169-181.
- Hinz, B., Seidel, H., Bräuer, C., Menzel, G., Blüthner, R., Erdmann, U. (1988a); Examination of spinal column vibrations: a non-invasive approach. *Eur J Appl Physiol* 57:707-713.
- Hinz, B., Seidel, H., Bräuer, C., Menzel, G., Blüthner, R. and Erdmann, U. (1988b); Bidimensional accelerations of lumbar vertebrae and estimation of internal spinal load during sinusoidal vertical whole-body vibration: a pilot study. *Clin Biom* 3:236-249.
- Hulshof, C.T.J., Veldhuijzen van Zanten, O.B.A. (1987); Whole body vibration and low back pain – a review of epidemiologic studies. *Int Arch Occup Environ Health* 59:205-220.
- ISO (1974); Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration ISO 2631, ISO, Geneva.
- ISO (1985); Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1. ISO 2631/1, Geneva.
- ISO (1989); Revised Draft Proposal ISO/DP 2631 – Guide to the evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration. ISO/rc 108/SC4 N190, Geneva. ▶

- Kjellberg, A., Wikström, B.O. (1985a); Whole-body vibration: exposure time and acute effects a review. *Ergonomics* 28:535-544.
- Kjellberg, A., Wikström, B.O. (1985b); Whole-body vibration: exposure time and acute effects experimental assessment of discomfort. *Ergonomics* 28:545-554.
- Klingenstierna, U., Pope, M.H. (1987); Body height changes from vibration. *Spine* 12:566-568.
- Krogh-Lund, C., Voss, P. (1989); Whole-body vibration and low back pain, localized muscular fatigue. In: *Vibration at work*, ISSA, Wenen.
- Lange, W. and Coermann, R. (1965); Relativbewegungen benachbarter Wirbel unter Schwingungsbelastung. *Int Z Angew Physiol* 21:326-334.
- Loach, J.C. (1958); A new method of assessing the riding of vehicles and some results. *J Inst Locomotive Eng* 48:183-223.
- Magid, E.B., Coermann, R.R. (1960); The reaction of the human body to extreme vibrations. *Proc. of the Inst of Environ Science, National meeting 1960*:135-153.
- Maslen, K.R. (1972); Efficiency under prolonged vibration and the ISO 'Guide'. Farnborough, U.K.: Royal aircraft establishment. Technical memo EP 512.
- Miwa, T. (1967); Evaluation methods for vibration effect. Part 1: Measurement of threshold and equal sensation contours of whole body vibration for vertical and horizontal vibrations. *Industr Health* 5:S183.
- Miwa, T., Yonekawa, V., Kajma-Sudo, S. (1973); Measurement and evaluation of environmental vibrations. Part 3: Vibration exposure criteria. *Industrial Health (Japan)* 11:158-196.
- Mulder, J., Remijn, B. (1989); Expositie aan lichaamstrillingen bij tankwagenchauffeurs. *Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap* 2:8-12.
- Notess, C.B. (1963); A triangle: Flexible aeroplanes, gusts crew. Cornell Aeronautical Lab., Inc. Technical Report no. FDM-343, Ithaca NY.
- Osborne, D.J., (1976a); A critical assessment of studies relating whole-body vibration to passenger comfort. *Ergonomics* 19:131-136.
- Osborne, D.J., Humphreys, D.A. (1976b); Individual variability in human response to whole-body vibration. *Ergonomics* 19:719-726.
- Osborne, D.J., Heath, T.O., Boarer, P. (1981); Variation in human response to whole-body vibration. *Ergonomics*. 24, 301-313.
- Osborne, D.J. (1983); Whole-body vibration and International Standard ISO 2631: a critique. *Human Factors* 25:55-69.
- Panjabi, M.M., Andersson, G.B.J., Jornens, L., Hult, E., Mattson, L. (1986); *J Bone Jt Surg* 68:695-702.
- Pope, M.H., Wilder, D.G., Donnermeijer, D.D. (1986a); Muscle fatigue in static and vibrational seating environments. In: *Backache and back discomfort AGARD-CP-378*, Neuilly sur Seine): 25.1-25.9.
- Pope, M.H., Svensson, M., Broman, H., Andersson, G.B.J. (1986b); Mounting of the transducers in measurement of segmental motion of the spine. *J Biomech* 19:675-677.
- Ramaekers, L. (1986); A method to evaluate the adverse effects of shock to the human body with the shock-response analysis (In Dutch). Utrecht, Natuurkundewinkel.
- Reiher, H., Meister, F.J. (1931); Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen. *Forschung auf den Gebiete des Ingenieurswesens* 2:381-386.
- Sandover, J. (1978); Modelling human responses to vibration. *Aviat Space Environ Med* 49:335-339.
- Sandover, J. (1979); A standard on human response to vibration – one of a new breed? *Appl Ergon* 10:33-37.
- Sandover, J. (1981); Vibration, posture and low-back disorders of professional drivers. Loughborough, University of Technology, dept. Human Science. **Report no. DHS 402**. p 1-142.
- Sandover, J. (1985); **Vehicle vibration and back pain**. In: *Backache and back discomfort AGARD-CP-378*, Neuilly sur Seine.
- Sandover, J., Dupuis, H. (1987); A reanalysis of spinal motion during vibration. *Ergonomics* 30:975-985.
- Sandover, J. (1988); Behaviour of the spine under shock and vibration: a review. *Clin. Biomech.* 3:249-256.
- Shanahan, D.F., Matrianni, G.R., Reading, T.E. (1986); Back-pain in helicopter flight operations. Agard publication 134, Neuilly-sur-Seine.
- Seidel, H., Bastek, R., Bräuer, D., Buchholz, Ch., Meister, A., Metz, A.M., Rothe, R. (1980); On human response to prolonged repeated whole-body vibration. *Ergonomics* 23:191-211.
- Seidel, H., Heide, R. (1986); Long-term effects of whole-body vibration: a critical survey of the literature. *Int Arch Occup Environ Health* (1986) 58:1-26.
- Seidel, H., Blüthner, R., Hinz, B. (1986); Effects of sinusoidal whole-body vibration on the lumbar spine: the stress-strain relationship. *Int Arch Occup Environ Health* 57:207-223.
- Seidel, H. (1988a); Data for the weighting curve for vertical vibration as it relates to health. Unpublished document.
- Seidel, H. (1988b); Myoelectric reactions to ultra-low frequency and low-frequency whole-body vibration. *Eur J Appl Physiol* 57:558-562.
- Seroussi, R.E., Wilder, D.G. and Pope, M.H. (1989); Trunk muscle electromyography and whole body vibration. *J. Biomech.* 22:219-229.
- Simic, D. (1970); Contribution to the optimisation of the oscillatory properties of a vehicle: Physiological foundation of comfort during oscillations. Technical University of Berlin Dissertation D38.
- Sperling, E., Betzhold, C. (1956); Beitrag zur Beurteilung des Fahrkomforts in Schienenfahrzeugen. *Glaser's Annalen* 80:314-317.
- Sperling, E., Betzhold, C. (1958); Über Schwingungs- und Festigkeitsversuche on Eisenbahnfahrzeugen. *Österr Ing Zeitung* 1:473-481.
- Sullivan, A., McGill, S.M. (1990); Changes in spine length during and after seated whole-body vibration. *Spine* 15:1257-1260.
- Temple, W.E. (1964); Man's short-time tolerance to sinusoidal vibration. *Aerospace Med* 35:923.
- Wasserman, D.E. (1987); Human aspects of occupational vibration. Amsterdam, Elsevier.
- Weiden, T.C.J., Ramaekers, L.A.M., Wijk, A.J.M., Leun, C.J., van der (1990); Handboek voor het meten en beoordelen van trillingen op de arbeidsplaats. Voorburg, Directoraat Generaal van de Arbeid, DGA-rapport S58-8.
- Wikström, B.O., Kjellberg, A., Örelius, M. (1987); Whole-body vibration: A test of different methods for the assessment of shocks (1987). Paper presented at the United Kingdom Informal Group Meeting on human response to vibration. Royal Military College of Science, Shrivenham.
- Wikström, B.O., Kjellberg, A., Hansson, J.E. (1989); Methods for the evaluation of discomfort from whole-body vibration. In: *Vibration at work: ISSA, Wenen*.
- Wilder, D.G., Woodworth, B.B., Frymoyer, J.W., Pope, M.H. (1982); Vibration and the human spine. *Spine* 7:243-254.
- Wilder, D.G., Woodworth, B.B., Frymoyer, J.W., Pope, M.H. (1985); The effects of vibration on the spine of the seated individual. *Automedica* 6:5-35.
- World Health Organization (1980); Recommended health based occupational exposure limits for selected metals. *TRS 662*, Geneva. ■