

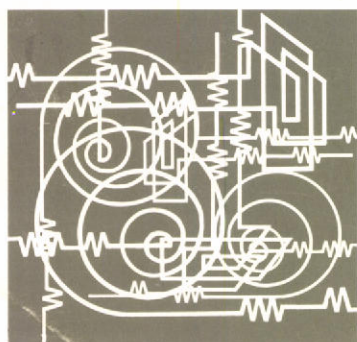
Ergo

LA-DR-10-03

Onderzoek naar het meten
van trillingen en schokken
op de arbeidsplaats

- Literatuurstudie
- Evaluatie meet-
apparatuur
- Meettechniek/plaatsing
opnemers

onderzoekprogramma
interdepartementale
commissie
geluidhinder



LAWAAI OP DE ARBEIDSPLAATS

IEG

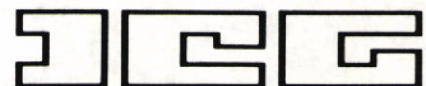


LA-DR-10-03

Onderzoek naar het meten
van trillingen en schokken
op de arbeidsplaats

- Literatuurstudie
- Evaluatie meet-
apparatuur
- Meettechniek/plaatsing
opnemers

TNO ARBEID
BIBLIOTHEEK
POSTBUS 718
2130 AS HOOFDORP
TEL. 023-5549 468



**INTERDEPARTEMENTALE
COMMISSIE
GELUIDHINDER**

NR. 5045
plaats TNO Ergo

Documentbeschrijving

1 Rapport nr. LA-DR-10-03	7 ISBN nummer 90 346 1347 X	
2 Sub-titel rapport Onderzoek naar het meten van trillingen en schokken op de arbeidsplaats – literatuurstudie – evaluatie meetapparatuur – meettechniek/plaatsing opnemers	8 Datum publicatie augustus 1987	
3 Schrijver(s) A.J. Francken, B. Bosman, P. Tegelaar	9 Rapport nr. Instituut 0050.35.017	
4 Uitvoerend instituut (naam, adres) TNO-IWECO Postbus 29 2600 AA Delft	10 Tijdschrift nr.	
5 Opdrachtgever(s) Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid Directoraat-Generaal van de Arbeid Voorburg	11 Opdracht nr. 70673/9-87	
6 Titel onderzoekproject Trillen en schokken op de arbeidsplaats	12 Rapporttype en periode Deelrapport 1985	
13 Samenvatting Dit rapport opent met een literatuurstudie over o.a. de meettechnische aspecten bij het beoordelen van schade en hinder door trillingen op de arbeidsplaats. Met name de ISO norm IS 2631, "Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration" wordt kritisch geëvalueerd. Daar schokken en stochastische trillingen volgens IS 2631 niet kunnen worden beoordeeld, wordt de discussie geopend over de bewerking van de verschillende types signalen middels de schok-responsiemethode. De literatuurstudie wordt gevolgd door informatie over beschikbare meetapparatuur en over de plaatsing van trillingopnemers bij "whole-body vibration". Een drietal meetinstrumenten is onderling vergeleken. Elk instrument heeft beperkingen, en bij aanschaf en gebruik dienen compromissen te worden gesloten. Het onderzoek naar de plaatsing van trillingopnemers had tot doel te bepalen of met een zittingopnemer (fabr. Bruël & Kjaer) de blootstelling aan trillingen van zittende personen voldoende nauwkeurig kan worden gemeten. Voor dit onderzoek, dat is uitgevoerd met medewerking van enkele proefpersonen, is een speciale bekken-trillingopnemer ontwikkeld. Uit de resultaten van het onderzoek blijkt dat de zittingopnemer zowel bij harde als bij zachte zittingen de trillingen van het scheidingsvlak lichaam-zitting goed weergeeft.		
14 Begeleidingscommissie Ir. J.A.M. Blok Ir. P. Bongers Ir. L. Burdorf Ir. D. van Drimmelen Dr. J.H. Ettema F. Guinée, arts H. Hoolboom, arts C.T.J. Hulshof, arts P.J.M. Iping A. Koemeester, arts Drs. Y. Musson Drs. M.L.I. Pokorny Ir. D.P. Rookmaaker Ing. P.L.H. Schuurmann Ir. A.G. Spruijt Ing. A. van der Weerd Ing. L.C. Wortman Ing. M. Wouters SZW/DGA Coronel Laboratorium TH Delft TH Delft Coronel Laboratorium Volvo Born NIPG-TNO Coronel Laboratorium SZW/DGA Coronel Laboratorium TH Delft NIPG-TNO NS SZW/DGA VROM RBB FDO Hoogovens	15 Bijbehorende rapporten	
	16 Aantal blz. 142	17 Prijs* f 24,-

Rapporten uit de reeksen van het Onderzoekprogramma Geluidhinder zijn schriftelijk te bestellen bij Staatsuitgeverij/DOP, postbus 20014, 2500 EA 's-Gravenhage, onder vermelding van het ISBN nummer en het gewenste aantal exemplaren.

* prijswijziging voorbehouden

VOORWOORD

In 1982 adviseerde de toenmalige "Peilingsgroep Trillingen" van de Commissie voor arbeidsgeneeskundig onderzoek TNO (CARGO-TNO) de Directeur-Generaal van de Arbeid om een onderzoek te laten uitvoeren naar trillingen op de arbeidsplaats. Dit onderzoek zou uit drie delen moeten bestaan:

- a. Een onderzoek naar het vóórkomen van effecten.
- b. Een inventarisatie-onderzoek voor bepaling van de omvang van de problematiek.
- c. Het ontwikkelen van een eenvoudige meetmethode voor het vaststellen van de belasting door trillingen.

Op grond van dit advies werden in november 1982 drie opdrachten verleend voor onderzoek op dit terrein.

TNO-IWECO in Delft kreeg opdracht voor het uitvoeren van een onderzoek naar meetmethoden en meetapparatuur voor trillingen bij het werk.

Het voorliggende rapport bevat de resultaten van een drietal deelonderzoeken: een literatuuronderzoek op het gebied van meet- en beoordelingsmethodieken, een onderzoek naar de bruikbaarheid van commercieel verkrijgbare meetapparatuur en een onderzoek naar de meest geschikte plaats voor trillingopnemers voor het meten van lichaamstrillingen.

Het onderzoek heeft belangwekkende resultaten opgeleverd. Het deelrapport over het literatuuronderzoek toont aan dat de norm voor lichaamsstrillingen, ISO 2631, duidelijke beperkingen heeft. Dit geldt met name de beoordeling van de trillingexpositie. Eigenlijk zijn de beoordelingscriteria uit deze norm alleen goed te gebruiken om periodieke trillingen te beoordelen. Voor stochastische of ruisachtige trillingen leidt toepassing van de criteria uit de norm tot onderschatting van het effect. Met nadruk wijzen de onderzoekers erop dat voor de beoordeling van schokken de methode van ISO 2631 principieel ongeschikt is. Zij opteren voor een geheel andere benadering, de zgn. schok-responsiemethode. Uitwerking van een dergelijk geheel nieuw beoordelingsstelsel vergt echter veel fundamenteel onderzoek, hetgeen niet paste in de opzet van het project.

Het onderzoek naar de toepasbaarheid van commercieel verkrijgbare meetapparatuur levert als resultaat op dat de in Nederland verkrijgbare eenvoudige meetapparatuur beperkingen heeft, waarmee bij aanschaf en gebruik goed rekening moet worden gehouden. Voor het onderling vergelijken van werksituaties zijn deze apparaten echter goed te gebruiken.

Het onderzoek naar de plaatsing van opnemers leidt tot de conclusie dat de gangbare triaxiale zittingversnellingopnemers goed bruikbaar zijn voor het meten van de trillingexpositie van zittende personen. De in dit rapport verzamelde informatie is bijzonder nuttig voor iedereen die te maken heeft of te maken krijgt met het meten en beoordelen van trillingen op de arbeidsplaats.

M.A.P. Verwijmeren

ir. M.A.P. Verwijmeren

Voorzitter van de ICG-Subcommissie

Lawaai op de arbeidsplaats

Samenvatting

Dit rapport opent met een literatuurstudie over o.a. de meettechnische aspecten bij het beoordelen van schade en hinder door trillingen op de arbeidsplaats. Met name de ISO norm I.S. 2631 "Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration" wordt kritisch geëvalueerd, waarbij met name het laboratoriumonderzoek naar proefpersonen met stilstaande voetsteunen en de tijdsafhankelijkheidskrommes worden bekritiseerd. Daar schokken en stochastische trillingen volgens IS 2631 niet kunnen worden beoordeeld, wordt de discussie geopend over de bewerking van verschillende types signalen middels de schokresponsie-methode. De literatuurstudie wordt gevolgd door informatie over beschikbare meetapparatuur en over de plaatsing van trillingsopnames, bij "whole body vibration".

Het aantal beschikbare meetinstrumenten is uiterst beperkt, een drietal is onderling vergeleken. Elk instrument heeft beperkingen, en bij aanschaf en gebruik dienen compromissen te worden gesloten.

Het onderzoek naar de ideale plaats voor opnemers is uitgevoerd met medewerking van enkele proefpersonen. Het onderzoek had tot doel te bepalen of met een zittingopnemer (fabr. Brüel and Kjaer) de blootstelling aan trillingen van zittende personen voldoende nauwkeurig kon worden gemeten. Hiertoe werd een speciale bekken-trillingsopnemer ontwikkeld. Bij een harde stoelzitting geeft de opnemer in de zittingplaat de trillingen goed weer. De invloed van een zachte zitting is nagegaan, evenals de trillingsoverdracht naar het hoofd bij verticale aanstoting in het frequentiegebied tussen 5 en 35 Hz. De meetresultaten worden kritisch geëvalueerd en vergeleken met die van andere onderzoekers.

Summary

This report opens with a study of the literature on, among other things, aspects of measuring techniques in the assessment of damage and nuisance through vibrations at the workplace. The ISO standard I.S. 2631 "Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration," is critically evaluated, with specific criticism of the laboratory studies of test subjects with stationary foot supports and the time-dependency curves. Where shocks and stochastic vibrations cannot be measured according to IS 2361, a discussion is opened on processing different types of signals using the shock-response method. The literature study is followed by information on available measuring equipment and on the positioning of vibration recordings in whole-body vibration.

The number of available measuring instruments is exceptionally small. Three were compared. Each instrument has its limitations, and compromises must be made in purchasing and use.

The study into the ideal position for recorders was conducted with the assistance of a number of test subjects. The aim of the study was to determine whether the exposure of seated subjects to vibration could be measured accurately with a seat recorder (manufacturer: Brüel and Kjaer). A special cavity vibration recorder was developed for this purpose. The effect of soft seating was studied, as was the transfer of vibration to the head with vertical impact in the frequency area between 5 and 35 Hz. The measurements were critically evaluated and compared with those of other researchers.

Zusammenfassung

Dieser Bericht beginnt mit einer Literaturstudie über u.a. die meßtechnischen Aspekte bei der Beurteilung von Schäden und Belästigung durch Schwingungen am Arbeitsplatz. Vor allem die ISO Norm 2631

"Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration" (Richtlinien für die Auswertung von Schwingungen, denen der ganze Körper des Menschen ausgesetzt ist) wird kritisch bewertet, wobei vor allem die Laboratoriumuntersuchung bei Versuchspersonen mit feststehenden Fußstützen und die Zeitabhängigkeitskurven kritisiert werden. Da Erschütterungen und stochastische Schwingungen nicht nach ISO 2631 beurteilt werden können, wird die Diskussion über die Bearbeitung verschiedenartiger Signale mit Hilfe der Stoßreaktionsmethode eröffnet. Auf die Literaturstudie folgt Information über verfügbare Meßgeräte und über die Aufstellung von Schwingungsregistriergeräten bei "whole body vibration" (Schwingungen des ganzen Körpers).

Die Zahl der verfügbaren Meßinstrumente ist äußerst beschränkt, drei wurden miteinander verglichen. Jedes Instrument hat seine Beschränkungen, und bei Anschaffung und Gebrauch müssen Kompromisse geschlossen werden.

Die Untersuchung nach dem idealen Platz für Registriergeräte wurde mit Mitwirkung einiger Versuchspersonen durchgeführt. Die Untersuchung hatte den Zweck zu bestimmen, ob mit einem Sitzregistriergerät (Fabr. Brüel and Kjaer) die Schwingungen, denen sitzende Personen ausgesetzt sind, ausreichend genau gemessen werden können. Dazu wurde ein spezielles Becken-Schwingungsregistriergerät entwickelt. Bei einem harten Stuhlsitz gibt das Registriergerät im Sitz die Schwingungen gut wieder. Der Einfluß eines weichen Sitzes wurde geprüft ebenso die Schwingungsübertragung zwischen 5 und 35 Hz. Die Meßergebnisse wurden kritisch bewertet und mit denen anderer Forscher verglichen.

RESUME

Le présent rapport contient une étude des ouvrages consacrés aux aspects de mesurages mis en oeuvre lors de l'appréciation de la nocivité des vibrations sur le lieu de travail en raison des douleurs et troubles qu'elles engendrent).

La norme ISO I.S. 2631 (International Standardisation Organization - international Standard) "Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration" (Guide pour l'évaluation de l'exposition de l'homme à une vibration de tout le corps") fait l'objet d'un examen critique qui n'épargne pas par exemple les courbes, dont une des fonctions faisait intervenir le facteur temps, ni les expériences conduites en laboratoire avec des sujets qui avaient des supports de pied fixes. La norme IS 2631 estimant que les chocs et les vibrations stochastiques (= aléatoires) ne peuvent être mesurées, une discussion s'est engagée sur le mode d'enregistrement et de traitement de divers types de signaux au moyen de la méthode de "réponse au choc". L'examen des ouvrages spécialisés est suivi d'une information sur les appareils disponibles et le placement des capteurs de vibrations dans le cas de "vibration de tout le corps".

Les appareils disponibles sont très peu nombreux. L'étude n'en compare que trois et il convient d'ajouter que chaque appareil a ses insuffisances et que chaque achat et utilisation nécessitent des compromis.

L'étude de l'emplacement idéal des capteurs a été menée à bien en collaboration avec certains sujets. On s'est attaché à déterminer si un capteur destiné à la position assise (de Bruel and Kjaer) pouvait mesurer avec une précision suffisante les vibrations que subissaient les personnes assises.

Un capteur des vibrations du bassin fut mis au point à cet effet. Placé dans le siège d'une chaise dure, il permet d'obtenir d'excellentes informations sur les vibrations. L'influence d'un siège mou a été examinée, ainsi que la transmission des vibrations vers la tête, dans le cas d'une plage de fréquence située entre 5 et 35 Hz. Les résultats obtenus ont été analysés de manière critique et comparés avec ceux recueillis par d'autres chercheurs.

<u>Inhoud</u>	<u>blz.</u>
1. Inleiding	1
2. LITERATUURONDERZOEK / trillingen op de arbeidsplaats-meettechniek	3
2.1. INLEIDING literatuuronderzoek	3
2.2. DE NOODZAAK VAN REGELGEVING	5
2.3. HET ONTSTAAN VAN ISO 2631	8
2.4. HET EFFEKT VAN TRILLINGEN	15
2.5. EXPERIMENTELE TECHNIEKEN BIJ LABORATORIUM- ONDERZOEK	18
2.6. TIJDAFHANKELIJKHEID	22
2.7. SIGNAALBEWERKING	27
2.8. INTERPRETATIE	40
2.9. PLAATS VAN DE OPNEMERS	49
2.10. LIJST VAN GERAADPLEEGDE LITERATUUR	51
2.11. Illustraties	67
3. EVALUATIE meetapparatuur	82
3.1. INLEIDING bij de evaluatie meetapparatuur	82
3.2. IN DE HANDEL ZIJNDE EENVOUDIGE MEETAPPARA- TUUR	82
3.3. BESCHRIJVING VAN DE BRUEL & KJAER 2512 HUMAN-RESPONSE-VIBRATION METER	84
3.4. BESCHRIJVING VAN DE BRUEL & KJAER 2513 INTEGRATING VIBRATION METER	86
3.5. METING FILTERKARAKTERISTIEKEN VAN DE BRUEL & KJAER 2512	87
3.6. DE MEETRESULTATEN	88
3.7. TOEPASBAARHEID VAN DE GEEVALUEERDE APPARATUUR	91
3.8. LITERATUUR	93
3.9. Illustraties	94

4.	PLAATSING opnemers	97
4.1.	INLEIDING bij het onderzoek naar de plaatsing van opnemers	97
4.2.	OMSCHRIJVING VAN DE METING	99
4.3.	UITWERKING VAN DE MEETRESULTATEN	103
4.4.	BESPREKING VAN DE RESULTATEN	105
4.5.	VERGELIJKING VAN DE RESULTATEN MET DIE VAN ANDERE ONDERZOEKERS	108
4.6.	KONTROLE VAN DE OVERDRACHTSFUNKTIES VAN DE STOELZITTING NAAR HET HOOFD	109
4.7.	LITERATUUR	110
4.8.	Illustraties	113
5.	KONKLUSIES	126
5.1.	KONKLUSIES n.a.v. de literatuurstudie (hoofdstuk 2)	126
5.2.	KONKLUSIES n.a.v. de evaluatie meetapparatuur	127
5.3.	KONKLUSIES n.a.v. het onderzoek plaatsing opnemers	127
5.4.	ALGEMENE KONKLUSIES	129

1. Inleiding

In het kader van onderzoeken naar de gezondheidseffekten van langdurige blootstelling aan mechanische trillingen en schokken tijdens arbeid in door het Direktoraat Generaal van de Arbeid aan TNO-Iweco opgedragen om de problematiek rond het meten van schokken en trillingen te bestuderen. De resultaten van deze studie zijn vastgelegd in een drietal rapporten.

- Rapport 50.32.022-84-1, A.J. Francken, Trillingen op de arbeidsplaats - meettechniek, literatuurstudie; mei 1984.
- Rapport 50.32.022-84-3, B. Bosman, Evaluatie van eenvoudige meetapparatuur voor het meten van de trillingsintensiteit van lichaamstrillingen en hand-arm trillingen; augustus 1984.
- Rapport 50.32.022-84-2, B. Bosman, Trillingen op de arbeidsplaats - meettechniek, plaatsing opnemers; november 1984.

Op verzoek van de opdrachtgever, het Directoraat Generaal van de Arbeid, worden deze rapporten nu samengevoegd in een nieuw rapport, waarin de genoemde rapporten in ongewijzigde vorm worden opgenomen als hoofdstukken 2, 3 en 4 respectievelijk.

Op een aantal opmerkingen die gemaakt zijn tijdens diskussies in de commissie LA 10 wordt ingegaan in "redactionele noten", die dienen als aanvulling op de TNO-rapporten en die worden opgenomen buiten verantwoordelijkheid van de auteurs van deze rapporten.

Zowel bij het samenstellen van de rapporten als bij de genoemde diskussies blijkt steeds opnieuw het pijnlijke gebrek aan voldoende en adequate informatie.

De problematiek is terug te voeren tot de dagelijkse praktijk van trillende machines, apparaten en voertuigen, waarbij vrijwel altijd gecombineerde dynamische schok- en trillingsverschijnselen voorkomen. Veelal overheerst een stochastische trilling met een superpositie van een sinusvormige komponent (meestal afhankelijk van toerental en/of rijsnelheid). Naast dit stationaire signaal treden dan meer of minder frequent pulsvormige signalen (schokken) op.

Ter beoordeling van de invloed van trillingen op de mens beschikken we over twee documenten: IS 2631 "whole body vibration" en DIS 5349 "hand-arm vibration" (voor de volledigheid wordt verwezen naar TNO-IWECO rapport 50.75.411-84-1 - DGA, A.J. Francken en B. Bosman, literatuurstudie hand-arm trillingen, dat is gemaakt in opdracht van de Rijks

Verdedigingsorganisatie-TNO (DMKL/MVA 5) en met toestemming van DMKL ter beschikking is gesteld aan DGA).

Het meten van dynamische verschijnselen als trillingen en schokken geeft nauwelijks problemen, het uitwerken van de meetgegevens ("data handling" en "data reduction") des te meer. Hierbij speelt de vraag een belangrijke rol of de algemeen aanvaarde weegkrommen in de ISO normen mogen worden toegepast op niet-harmonische trillingen en op schokken. Zolang hierover nog geen duidelijkheid is verkregen, blijft het verwerken van meetresultaten een aaneenschakeling van compromissen. In principe moet dit rapport dan ook worden gezien als een "state of the art" anno 1984, waarbij aanvullingen in de toekomst gewenst en noodzakelijk zullen zijn.

Kort samengevat beschikken we momenteel over meetapparatuur met ingebouwde bewerkingsschakelingen en over beoordelingsnormen, zowel ten aanzien van hand-arm trillingen als lichaamstrillingen, die in principe alleen gelden voor sinusvormige trillingen. Het is noodzakelijk om mogelijk aanvullende onderzoeken nauwlettend te volgen, onder meer via de inbreng in internationale norm-kommissies. Zo mogelijk zou een eigen (Nederlands) research-programma moeten worden ondersteund.

De konklusies uit de drie opgenomen rapporten, worden voor de overzichtelijkheid gezamenlijk opgenomen in hoofdstuk 5.

2. LITERATUURONDERZOEK / trillingen op de arbeidsplaats-meettechniek

2.1 INLEIDING Literatuuronderzoek

Deze literatuurstudie is hoofdzakelijk gericht op een aantal meettechnische aspecten die van belang zijn voor het bepalen van een mogelijke gezondheidsbeïnvloeding door mechanische trillingen en schokken op de arbeidsplaats.

De studie maakt deel uit van een veel breder opgezet onderzoek, dat in opdracht van het Directoraat-Generaal van de Arbeid wordt uitgevoerd. Een ander onderdeel is een epidemiologisch onderzoek waarin zal worden nagegaan of er een verband tussen trillingen en een nadelige beïnvloeding van de gezondheid kan worden aangetoond. Dit onderzoek wordt uitgevoerd door het Coronel Laboratorium van de UVA. Een derde onderdeel wordt gevormd door een onderzoek naar de "Population at Risk", een inventarisatie-onderzoek dat door de sectie Veiligheidskunde van de THD wordt verricht. Voor beide laatstgenoemde onderzoeken geldt dat ze sterk gericht zijn op de "effect"kant van het probleem, dat zijn dus aspecten die betrekking hebben op een eventuele nadelige beïnvloeding van de gezondheid of op bepaalde klachtenpatronen.

Als de overheid in Nederland tot regelgeving met betrekking tot trillingen op de arbeidsplaats in het kader van de Arbeidsomstandighedenwet zal overgaan, moet er tenminste een indicatie zijn van een dosis-effect relatie. Bij beide genoemde "effect"onderzoeken zijn dan ook een aantal trillingsmetingen gepland. Deze metingen kunnen, omdat het hier gaat om een beperkt aantal representatieve trillingsbronnen op de gebruikelijke wijze door deskundigen op het gebied van meettechniek en signaalbewerking worden uitgevoerd.

Wanneer echter eenmaal in het kader van de Arbo-wet grenzen voor toelaatbaarheid aan trillingen zijn gesteld bestaat er behoefte aan een meetinstrument dat de trillingsdosis (hoe dan ook uitgedrukt!) kan meten. Aan zo'n meter moet men de eis stellen van een eenvoudige bediening. Het instrument zal zelf de signaalbewerking moeten uitvoeren en de resultaten moeten als eenvoudige grootheden (liefst zelfs als één enkelvoudige grootheid) afgelezen of geregistreerd worden. Bovendien moet zo'n meetapparaat robuust, self-supporting en goedkoop zijn. Deze contrasterende

eisen zouden een tiental jaren geleden als onhaalbaar van de hand zijn geweest. Op dit ogenblik mag worden verwacht dat de micro-electronica in de toekomst zal bewijzen dat dit pakket van eisen niet onhaalbaar is.

De Peilingsgroep Trillingen van CARGO-TNO heeft over het probleem trillingen op de arbeidsplaats in 1982 een advies uitgebracht, waarin o.a. de ontwikkeling van een trillingsdosismeter werd voorgesteld. Het meten van een dosis in de vorm van een gekwadrateerde, gewogen versnelling, gesommeerd naar een dagelijkse arbeidstijd werd mogelijk gemaakt door een amendement op de internationale norm ISO 2631, "Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration". Deze aantrekkelijke, en in feite erg eenvoudige, bepaling van de trillingsdosis werd een beetje op losse schroeven gezet door een aantal publicaties waarin de tijdafhanke-lijkheid volgens ISO 2631 aan kritiek werd onderworpen. Veel meer kri-tiek werd gepubliceerd over de in ISO 2631 opgenomen weegkrommes.

Bovendien bleek uit de literatuur dat de verhoging van de "piekfactor" (crestfaktor^{*}) van de nog goed te interpreteren trillingssignalen van 3 naar 6, zoals het amendement vermeldt, zeer twijfelachtig is. Sterker, een nadere analyse van de publicaties op grond waarvan in de oorspronkelijke versie van ISO 2631 een piekfactor van 3 wordt toegelaten doet twijfels over de juistheid daarvan opkomen. Wellicht is indertijd terwille van de eenvoud een beslissing genomen die achteraf niet te rechtvaardigen valt. Deze punten van twijfel worden in dit rapport aan de hand van de beschik-bare literatuur kritisch beschouwd.

Een laatste onderdeel dat bij het meten van trillingen van groot belang is, is het plaatsen van de opnemers. Naast het experimenteel onderzoek van dit onderdeel, zie hoofdstuk 4, is de beschikbare literatuur ook op dit punt onderzocht, zie hoofdstuk 2.9.

In het kader van dit onderzoek leek het zinvol na te gaan hoe de eerste versie van ISO 2631 tot stand gekomen is. Voor hen die belangstelling heb-ben voor de ontstaansgeschiedenis van de norm is hoofdstuk 2.3 geschreven.

* In de "Vocabulary", IS2041 wordt gedefinieerd:

"Crest factor of an oscillating quantity is the ratio of the peak value to the rms value."

De auteur heeft zich hierbij gebaseerd op persoonlijke notities, gemaakt tijdens de internationale werkgroepvergaderingen, en op de officiële werkgroepdocumenten uit de beginfase (1964-1970).

Een onderwerp dat vooral voor de gezondheidsaspecten bij de blootstelling aan trillingen van belang is, is de responsie van verschillende lichaamsdelen op trillingen van verschillende frequenties. Dat is een moeilijk onderwerp, maar de weinige studies die daarop gericht zijn lijken belangrijk genoeg om in een afzonderlijk hoofdstuk (2.4) behandeld te worden.

Veel van de vergaarde kennis over de invloed van trillingen op de mens is via laboratoriumproeven verkregen. In de loop der jaren zijn de methodieken gewijzigd. Omdat het de beoordeling van de waarde van de gepubliceerde onderzoeksresultaten stimuleert is een apart hoofdstuk (2.5.) aan deze experimentele onderzoekingsmethoden gewijd.

Voor het bewerken van verschillende types meetsignalen moeten verschillende technieken worden gebruikt. Hoofdstuk 2.7. is daarom gewijd aan de mogelijkheden en onmogelijkheden bij het bewerken van meetsignalen. Dit hoofdstuk vormt de basis voor de kritische beschouwingen die in hoofdstuk 2.8. worden gewijd aan de bewerking en de interpretatie van meetsignalen zoals die in de aangehaalde literatuur worden vermeld.

2.2. DE NOODZAAK VAN REGELGEVING

Aan het vastleggen van grenzen voor trillingen waaraan mensen in hun omgeving worden blootgesteld is uit velerlei oogpunten niet te ontkomen. De situaties waarin mensen aan trillingen worden blootgesteld en de trillingsniveaus die daarbij optreden lopen sterk uiteen.

Als een bewoner van een binnenstadswoning zich zo gehinderd voelt door verkeerstrillingen, bijvoorbeeld door een bus die nog laat in de avond door de straat rijdt, dat hij zich uiteindelijk tot de rechter wendt, zal deze na het horen van het oordeel van deskundigen een uitspraak doen. Daarbij zal het bestaan van (wettelijke) regels, waarop de deskundigen zich kunnen baseren, de procedure vergemakkelijken. In veel gevallen zullen geschillen dan buiten de rechter om tot een oplossing kunnen komen. In veel mindere mate geldt dit voor personenvervoer. Het is ondenkbaar dat een reiziger bijvoorbeeld de spoorwegen zal willen aanspreken omdat het

rijcomfort op een bepaald traject of in een bepaalde trein volgens hem beneden peil is. Daarentegen verwacht men van vervoersmaatschappijen dat zij alles doen om binnen redelijke kosten het comfort en daarbij hoort o.a. trillingsvrijheid in rij- en voertuigen te optimaliseren. Bij de aankoop van materieel moeten trillingseisen worden gekozen die voor de komende jaren mede de kosten van het vervoer en het comfort zullen bepalen. Hoewel voor verschillende vervoersmaatschappijen de keus van het optimum tussen trillingscomfort en kosten anders kan liggen is het gewenst dat er overeenstemming tussen fabrikant en afnemer bestaat over de wijze waarop het trillingscomfort wordt vastgesteld.

Bij de bediening van machines kan niet altijd worden voorkomen dat mensen aan trillingen worden blootgesteld. Voor de constructeur van een machine is het nodig dat hij kan beoordelen of de te verwachten trillingen de bediening, wellicht na enige uren, ongunstig kunnen beïnvloeden. Een veel sterker argument voor regelgeving is de kwestie of trillingen op de lange duur nadelige gevolgen voor de gezondheid kunnen opleveren. Hoewel men in het algemeen geneigd is nadelige gevolgen te veronderstellen, zijn zij tot nu toe in epidemiologisch onderzoek met betrekking tot WBV (Whole Body Vibration) niet onomstotelijk vastgesteld. Het epidemiologisch onderzoek dat door het Coronel Lab. wordt uitgevoerd zal hopelijk meer duidelijkheid in deze kwestie scheppen.

Uit de bovenstaande voorbeelden blijkt de wenselijkheid van algemeen erkende regels voor de toelaatbaarheid van trillingen duidelijk.

Eén van de eerste pogingen tot regelgeving op dit gebied stamt uit 1931 Reiher e.a. [122]¹⁾. De resultaten waren afkomstig van laboratoriumonderzoek, waarbij men 10 proefpersonen aan trillingen onderwierp en hen vroeg de ondervonden sensatie in te delen in één van 6 categorieën, oplopend van niet-waarneembaar tot en met zeer hinderlijk ("onaangenaam"), zie Figuur 1 (blz.67).

Deze criteria zijn in Nederland jarenlang gebruikt voor de beoordeling van trillingshinder. In West-Duitsland werd in de jaren 50 veel onderzoek

1) Getallen tussen [] verwijzen naar de lijst van geraadpleegde literatuur, hoofdstuk 2.10.

uitgevoerd door Coermann, Dieckmann en Dupuis, hetgeen tot uiting kwam in een VDI-Richtlinie 2057 [120], zie Figuur 2.

De eerder geschetste behoefte aan regelgeving was zo groot dat deze VDI-Richtlinie al spoedig ook op verscheidene plaatsen buiten West-Duitsland werd toegepast. Het was dan ook zeer terecht dat bij de oprichting in 1964 van de internationale technische commissie ISO/TC 108 het normalisatie-instituut van West-Duitsland (DIN) VDI 2057 inbracht als basis voor een toekomstige internationale norm. DIN kreeg het secretariaat toegewezen van een internationale werkgroep (ISO/TC 108/WG7) die de norm moest voorbereiden.

In het volgende hoofdstuk wordt aan de hand van verslagen en documenten het ontstaan van deze ISO-norm geschetst. Dat is van belang, omdat er in de afgelopen jaren een aantal kritische publicaties zijn verschenen van auteurs die bij deze wordingsgeschiedenis niet persoonlijk betrokken waren. Daarmee wil de auteur geenszins beweren dat ze niet zouden mogen oordelen, of dat ze ongelijk hebben. Het blijkt zinvol te zijn achteraf eens na te gaan op grond waarvan we in de internationale werkgroep indertijd bepaalde beslissingen hebben genomen. Soms waren dat namelijk beslissingen die in de loop der jaren aan sterke kritiek hebben blootgestaan en die in de bestaande normalisatie nog steeds doorwerken.

2.3. HET ONTSTAAN VAN ISO 2631

Tijdens de eerste vergadering van ISO/TC 108/WG 7 in Aix-les-Bains (1964) werd een Engelse vertaling van VDI 2057 (1963) gebruikt als basis voor de ontwikkeling van ISO 2631. Dit document bevatte geen beoordeling van de tijdafhankelijkheid, een voorstel daarvoor werd later door de USA ingediend. Coermann maakte in 1965 een eerste conceptvoorstel. Daarin werden krommes voor de frequentieafhankelijkheid bij verschillende K-waarden opgenomen, zie Figuur 3. Deze krommes weken af van de oorspronkelijke VDI 2057 en de vorm varieerde bovendien voor de verschillende K-waarden (trillingsniveaus).

Voor de tijdafhankelijkheid werden formules ingevoerd waarin wonderlijk genoeg de vierde machtswortel van de tijd reeds opdook. In de volgende werkgroepvergadering gehouden te Luik in 1965 werd de principiële beslissing genomen om de vorm van frekwentieafhankelijkheid vast te stellen onafhankelijk van de K-waarde²⁾. Voorlopig werd toen voor de tijdafhankelijkheid voorgesteld de gewogen versnelling evenredig met de log van de tijd te nemen³⁾. Von Gierke, Coermann en het secretariaat bereidden vervolgens een eerste conceptvoorstel 108/7 N7 voor dat in 1966 in Praag ter discussie kwam.

Ter voorbereiding van deze werkgroepvergadering verscheen bovendien een memorandum van Von Gierke waarin hij voorstelde de weegkromme, zie Figuur 4, tussen 1 en 2,8 Hz met $1/\sqrt{f}$ (-3 dB per octaaf) te laten afvallen als compromis tussen vlak (0 dB per oct.) en het oorspronkelijke voorstel $1/f$ (-6 dB per oct.). Deze helling zou de beschikbare gegevens aardig goed benaderen. Het hoogste kantelpunt zou moeten liggen tussen 6 en 15 Hz

-
- 2) Het bovenste kantelpunt was toen nog een punt van discussie. Coermann stelde 8 Hz voor. Volgens Amerikaanse onderzoekers in wegvervoersector moest het bij 20 Hz liggen.
- 3) Zo staat het in de notulen van de vergadering in Luik. Volgens mijn eigen aantekeningen werd een dubbellog verband voorgesteld. In de hierna te noemen notitie van Von Gierke spreekt hij over zijn oorspronkelijke tijdafhankelijkheidskromme als "equal energy curves", hetgeen een dubbellog verband logischer maakt dan het enkellog dat door het secretariaat in de notulen is vastgelegd. Overigens zijn de notulen op dit punt niet gewijzigd.

(gegevens van verscheidene onderzoekers). Voorgesteld werd 11,2 Hz als compromis, zie Figuur 4. 11,2 Hz is de bovengrens van de 8 Hz octaafband, 2,8 Hz is de ondergrens van de 4 Hz octaafband, zie Tabel 1.

ondergrens 4 Hz octaafband
 bovengrens 8 Hz octaafband
 11.2 Hz

2.8 ~ 20 Hz

equal energy

6-15 → 11.2 Hz
 8 Hz

2.8 - 11.2 →

24 - benadigt
 equal energy curves

afvalsafkankelijkheid
 groep vs snelheid $N \log t$
 equivalent equal energy curves → fensellog
 versand

f_c	<u>1</u>	1,25	1,6	<u>2</u>	2,5	3,15	<u>4</u>	5	6,3	<u>8</u>	10
f_g	1,12	<u>1,41</u>	1,78	2,24	<u>2,83</u>	3,55	4,5	<u>5,6</u>	7,1	8,9	
f_c	10	12,5	<u>16</u>	20	25	<u>31,5</u>	40	50	<u>63</u>	80	100
f_g	<u>11,2</u>	14,1	17,8	<u>22,4</u>	28,3	35,5	<u>45</u>	56	71	<u>89</u>	
f_c	<u>100</u>	125	10	200	<u>250</u>	315	400	<u>500</u>	630	800	<u>1000</u>
f_g	112	141	<u>178</u>	224	250	<u>335</u>	450	560	<u>710</u>	890	

Tabel 1: Centerfrequenties f_c en grensfrequenties f_g van tertsbanden en octaaf-banden (onderstreept) in Hz.

Voor de tijdafhankelijkheid werd in dat memorandum een uitgewerkt voorstel gedaan, gebaseerd op gegevens verzameld door Janeway (USA). Daarin zijn opgenomen lijnen volgens Mauzin, Sperling (resultaten van Europees spoorrijtuig onderzoek) en van Nottes (Air Passenger Comfort USA), zie Figuur 7.

Deze lijnen waren gebaseerd op onderzoeksresultaten bij ca. 1 Hz.

Vermoedelijk slaat dat alleen op de lijnen van Mauzin-Sperling. Het is aannemelijk dat de trillingen van vliegtuigen een andere frequentie-inhoud hadden dan die van spoorrijtuigen.

Von Gierke stelt in zijn memorandum dat "gezien de onzekerheid en de spreiding van alle beschikbare gegevens het gerechtvaardigd (justified) is de krommes voor de tijdafhankelijkheid te vereenvoudigen door aan te nemen dat

(a) de krommes voor "ontoelaatbaar", "vermoeidheid" en "comfort" dezelfde vorm hebben (dat wil zeggen dezelfde verhoudingen van trillingsniveaus na een bepaalde duur vertonen).

(b) de kromme voor "ontoelaatbaar" een factor 2 boven die voor

"vermoeidheid" ligt en die voor "comfort" een factor 3.15 onder die voor vermoeidheid.

Deze vereenvoudiging maakt de hele procedure, die ik (Von Gierke) voorstel, betrekkelijk hanteerbaar (manageable) en praktisch uitvoerbaar".

Uit deze voorstellen blijkt dat men toen aannam dat de tijdafhankelijkheid voor alle frequenties en trillingsniveaus gelijkvormig verloopt. In feite komt het er op neer dat de toen voorgestelde krommes voor de tijdafhankelijkheid gebaseerd werden op de vermoeidheid van passagiers in spoorrijtuigen die aan verticale trillingen van ca. 1 Hz werden blootgesteld.

Tijdens de vergadering in Praag, waarbij Von Gierke niet aanwezig was, werden tal van tekstwijzigingen aangebracht. Het secretariaat heeft deze wijzigingen in een nieuwe versie verwerkt (108/7 N11), waarbij ietwat onlogisch het hoofdstuk van de beoordeling vóór het hoofdstuk van de metingen werd geplaatst. In de daarop volgende vergadering werd de hoofdstukken weer in hun oorspronkelijke volgorde geplaatst.

In de discussies botsten toen reeds voortdurend de volgende twee standpunten:

- a. In de norm grenswaarden opgeven (Coermann: "In analogie met VDI 2057". Hoewel dit document K-waarden vastlegt en afzonderlijke richtlijnen geeft hoe die geïnterpreteerd moeten worden) zoals bijvoorbeeld in doc. 108/7 N11 dat buiten Von Gierke om gereed kwam.
- b. Alle grenswaarden in een appendix, niet behorende bij de norm als richtlijn (Von Gierke: "Het is de taak van overheden de grenswaarden vast te leggen") zoals in doc. 108/7 N7.

Dit onderwerp vormde ook in de werkgroepvergadering in Zürich (1967) een belangrijk punt van discussie zonder tot een definitief besluit te leiden. Eén van de andere discussiepunten was de vorm van de weegkromme. Volgens Janeway zou de helling bij lage frequenties steiler moeten zijn. SAE (society of automotive engineers) mensen gaven de voorkeur aan -6 dB/oct van 1 tot 2.8 Hz.

Luchtvaartdeskundigen hadden liever een vlak verloop (0 dB/oct.) maar vonden -3 dB/oct. wel acceptabel.

Er werd een compromis gevonden door de helling van -3 dB/oct. te handhaven, maar het kantelpunt te verleggen naar 4 Hz en vanwege de symmetrie het bovenste kantelpunt naar 8 Hz, een kantelfrequentie waarvoor Coermann n.b. van het begin af aan geijverd had.

Het probleem dat de kantelpunten nu precies in de centerfrequenties van de octaaf en tertsbanden⁴⁾ terecht kwamen, werd terzijde geschoven en zo is de weegkromme voor verticale trillingen tot nu toe gebleven.

Over de weegkromme voor horizontale trillingen ontspon zich een uitgebreide discussie, met als resultaat dat het gewenst zou zijn de weegkrommes overeen te laten stemmen met de richtlijnen van de UIC (Union International de Chemin de Fer).

Wat betreft de frequentie-analyse werd besloten max. een $\frac{1}{2}$ octaaf bandbreedte toe te staan. In de praktijk komt dat neer op de toepassing van tertsbanden ($1/3$ octaafband).

Op grond van nog zeer weinig onderzoeksresultaten o.a. van Dupuis, zie ook [18], werd besloten stochastische (random) trillingen op dezelfde wijze te behandelen als harmonische, uitgaande van de grondgedachte dat de trillingsenergie per tertsband (bedoeld werd de variantie of "Mean Square" per tertsband) bepalend zou zijn.

Bij de bespreking van de tijdafhangelijkheid werd op de verschillen in herkomst van de gegevens gewezen. Die van Mauzin en Sperling zijn gebaseerd op onderzoek naar vermoeidheid onder treinreizigers (Fatigue), die van Nottes op "Decreased Proficiency" van piloten van vliegtuigen en heli-copters. Besloten werd beide termen te gebruiken (FDP = Fatigue, Decreased Proficiency).

4) Opmerking: Een octaafband is een frequentieband waarvan de bovenste afsnijfrequentie een factor 2 boven de onderste afsnijfrequentie ligt. De band wordt aangeduid met een centerfrequentie die $\sqrt{2}$ boven de onderste afsnijfrequentie ligt. De centerfrequenties zijn genormaliseerd door het International Electrotechnical Committee: IEC publication 225 "Octave, half-octave en third-octave band filters intended for the analysis of sound and vibrations".

Een tertsband voldoet aan dezelfde definitie als de octaafband behalve dat de verhoudingen van de afsnijfrequenties hier 1,25 bedragen (3 tertsbanden in 1 octaafband!) en de centerfrequentie die $\sqrt{1,25}$ maal de onderste afsnijfrequentie bedraagt.

De centerfrequenties van tertsbanden van 1 tot 1000 Hz zijn gegeven in Tabel 1.(p.10) De centerfrequenties van de octaafbanden zijn onderstreept.

De berekening van een equivalente blootstellingsduur die in doc. 108/7 N11 is gegeven, was gebaseerd op een door de UIC gebruikte methode. De invloed van herstel werd daarbij buiten beschouwing gelaten.

Horizontale trillingen werden volgens dezelfde weegkromme en tijdafhankelijkheid behandeld, de grenzen lagen echter een factor $\sqrt{2}$ lager (- 3 dB).

De overeengekomen wijzigingen werden door het secretariaat doorgevoerd in het volgende ontwerp 108/7 N22 en vervolgens na enige redactionele wijzigingen (door Von Gierke?) aan het ISO/TC 108 secretariaat gegeven voor circulatie als DP 2631 (doc. 108/N 100).

De commentaren van verscheidene landenleden werden in 1969 tijdens de werkgroepvergadering in Düsseldorf besproken en dat resulteerde in de volgende wijzigingen:

- 1) De perceptiegrens voor trillingen zal de weegkrommes volgen en ligt voor verticaal 4-8 Hz en horizontaal 1-2 Hz bij ca. 10^{-2} ms^{-2} . 0.01
- 2) Metingen in frequentiebanden moeten geschieden per tertsband of nauwere frequentiebanden (dus octaafbanden worden niet langer toegestaan).
- 3) Een duidelijke voorkeur voor de "Rating method" werd uitgesproken: d.w.z. iedere tertsband toetsen aan de toelaatbare waarde. Men nam daarbij aan dat er geen interactie bestaat tussen de effecten van trillingen op de mens bij verschillende frequenties.
- 4) Voor horizontale trillingen (x- en y-richting) komt een nieuwe weegkromme: vlak van 1-2 Hz daarboven oplopend met 6 dB per octaaf. Het niveau van het vlakke deel ligt een factor $\sqrt{2}$ onder dat van de verticale weegkromme (-3 dB).

Deze wijzigingen werden aangebracht in het werkdocument 108/7 N36 (juni 1970), zie Figuur 5. Dit document werd zowel in de werkgroepvergadering in Parijs (1970) als door ISO/TC 108 plenair goedgekeurd en na een vertaling in het Frans naar het ISO Central Secretariat in Genève gezonden voor circulatie als DIS (Draft International Standard).

Deze DIS verscheen in 1971 en werd goedgekeurd door 19 landenleden. Slechts UK en USSR stemden, zonder commentaar, tegen aanvaarding van dit document als International Standard. De eerste versie van ISO 2631 verscheen in 1974.

British Standards Institution (BSI) gaf eveneens in 1974 een Draft voor Development BS-DD 32 uit, met vrijwel dezelfde bewoordingen als ISO 2631-1974. Deze procedure is zeer ongebruikelijk in de internationale normalisatie: verwerping van een voorstel kan alleen met opgaaf van redenen. Vermoedelijk heeft bij de Britten voornamelijk het argument

meegespeeld dat men de tijd voor een (definitieve) normalisatie nog niet rijp achtte, hetgeen blijkt uit de uitgave van een Britse Draft voor Development in plaats van een national standard.

Uit de geschiedenis van het ontstaan van ISO 2631-1974 blijkt kort samengevat het volgende:

De basis voor ISO 2631 werd gevormd door VDI 2057. Er werden geen K-waarden ingevoerd omdat men eigenlijk geen grenzen wilde vastleggen: "Dat is een zaak voor ieder land afzonderlijk" (Von Gierke). Bovendien werden er verschillende weegkrommes ingevoerd voor horizontale (x- en y-richting) en verticale (z-richting) trillingen. Deze weegkrommes weken af van VDI 2057 en zij werden voor alle trillingsniveaus van de waarneembaarheidsgrens tot de kortdurende toelaatbaarheidsgrens (ca. de helft van het niveau van de pijngrens) gelijk genomen.

In afwijking van VDI 2057 werd bovendien een tijdafhankelijkheid ingevoerd, hoofdzakelijk gebaseerd op gegevens over vermoeiing van treinreizigers. D.w.z. gebaseerd op lage frequenties, ca. 1 Hz, en vermoedelijk in een combinatie van horizontale en verticale trillingen. De gegevens werden bovendien geëxtrapoleerd naar 24 uur. Daarbij werd er van uitgegaan dat bij een blootstellingsduur van 24 h de comfortgrens bij de waarneembaarheidsgrens moest uitkomen, waardoor de kromme boven de 4 h afbuigt. Aan de tijdafhankelijkheidskrommes werden voor alle richtingen, alle frequenties en alle trillingsniveaus dezelfde vorm toegekend.

In afwijking van VDI 2057 werd een voorkeur uitgesproken voor de "rating method", dat is het beoordelen van het hoogste gewogen niveau per tertsband, boven de "weighting method". In amendement 1 werd dat in 1982 weer teruggedraaid.

Deze ISO-norm is hoofdzakelijk gebaseerd op comfort/vermoeidheid in voertuigen. Er was geen feitenmateriaal bekend over de schade die door trillingen (whole-body vibration) aan het menselijk lichaam wordt toegebracht.

De "reduced proficiency" boundary werd door Nottes tot ca. 2 uur bepaald. Slechts tot een blootstellingsduur van 20 min. vielen zijn resultaten samen met de vermoeidheidskromme volgens Mauzin. Deze laatste werd naar 24 h geëxtrapoleerd. De tijdafhankelijkheid voor de comfortgrens (RCB) en de Exposure Limit (EL) werden gelijkvormig aan die voor de Fatigue-Decreased Proficiency Boundary (F-DPB) genomen. Zie voor verdere details en kritiek over de tijdafhankelijkheid hoofdstuk 2.6.

2.4. HET EFFECT VAN TRILLINGEN

2.4.1 Gevoelige plaatsen [1,12,18,92,118,119]

Over het effect van trillingen is al tientallen jaren veel te doen geweest. Het is belangrijk voor het interpreteren van de resultaten van experimenteel onderzoek. Een van de eerste wegen die op dit gebied bewandeld werd, was een eenvoudige modellering van het menselijk lichaam waarbij dan werd verondersteld dat bij ongeveer 5 Hz de maag en ingewanden in "resonantie" kwamen. Dat zou zich uiten in relatieve bewegingen die men boven bepaalde niveaus als "onaangenaam" betitelde. Door middel van röntgenfotografie werden dit soort verschijnselen in de 60-er jaren aangetoond. Mechanische impedantiemetingen leverden gegevens op die de overige bevindingen bevestigden en die droegen bij tot meer verfijnde modellen.

Von Gierke [119] verwijst naar een studie van Von Gierke en Coermann uit 1963 waarin een vlak van toelaatbare trillingen aan de bovenzijde wordt begrensd door 3 tolerantiekrommes: 1) voor de ruggegraat en de buik, 2) voor de lendenwervels en het heiligbeen en 3) voor het hoofd. Allan [1] verwijst daarnaast naar werk van Payne uit 1976 waarbij eveneens drie systemen zijn aangegeven: 1) ingewanden, 2) wervelkolom en 3) lichaams-trillingen (body vibration).

Whitham e.a. [118] en Donati [12] voerden onderzoek uit waarbij de plaatsen waar trillingshinder werd ondervonden in kaart werden gebracht. Ook Dupuis [18] geeft een tabel waarin bij 4, 8 en 16 Hz wordt aangeduid op welke plaatsen in het lichaam hinder wordt ondervonden. Rublack [92] heeft in zijn literatuurstudie een tabel volgens Coermann (1962) opgenomen.

We zullen hier niet op de details van dit onderzoek ingaan. Globaal blijkt uit deze onderzoeken dat trillingen bij verschillende frequenties op verschillende plaatsen, en dus door verschillende sensoren, waargenomen worden. Mensen zijn blijkbaar in staat individueel de signalen van deze receptoren tegen elkaar af te wegen.

2.4.2 Individuele variabiliteit [28,29,75,76,77,78,79]

Griffin e.a. [28,29] voerden onderzoek uit naar de variaties van de trillingsoverdracht van de zitting naar het hoofd bij groepen van mannen, vrouwen en kinderen bij frequenties van 4 en 16 Hz. Er bleken in deze

overdrachtsverhoudingen grote variaties voor te komen tussen individuen onderling, maar ook bij ieder mens afzonderlijk, afhankelijk van houding, spierspanning e.d.

Oborne e.a. [75 t/m 79] hebben van 1976 tot 1982 systematisch onderzoek verricht naar de individuele verschillen in de krommes van gelijke gevoeligheid voor verticale trillingen. In [75] laten zij de verschillen zien als gevolg van de houding. Bij rechtop zitten vertoonden zijn krommes 2 minima n.l. bij 5 en bij 13 Hz. Deze resultaten stemmen goed overeen met die van Griffin c.s. In [76] werd de invloed van de instructie aan de proefpersonen onderzocht. Daaruit bleek een verschil boven 20 Hz tussen lijnen van gelijke sensatie (equal sensation) en van gelijk comfort (equal comfort). In [77] werd de invloed van het trillingsniveau beschouwd. Daarbij werden, zoals ook bij veel andere onderzoekers, verschillen in de vorm van de krommes voor gelijke gevoeligheid gevonden. In [78] werden 100 proefpersonen staande aan verticale trillingen onderworpen en in [79] werd de stabiliteit van de individuele gevoeligheidskrommes onderzocht. Het bleek dat deze laatste nog na lange tijd (2 mnd) stabiel waren. De grote verschillen heeft Oborne in 3 groepen verdeeld. Op basis van dit onderzoek [79] oefende Oborne ernstige kritiek op die onderzoekers die steeds met dezelfde, of met kleine aantallen proefpersonen werken.

2.4.3 Adaptatie en actieve compensatie [1,18]

Griffin en Oborne hebben, zoals hierboven vermeld werd, de invloed van de houding op de krommes voor gelijke gevoeligheid voor trillingen gekonstateerd. Het lichaam blijkt nog over een ander middel te beschikken om de aangeboden trillingen beter te kunnen verdragen. Allan [1] noemt dit het regelsysteem dat bij de modellering voor frequenties tot ca. 8 Hz volgens hem zou moeten worden ingebouwd. Dupuis [18] heeft met behulp van EMG's de periodieke spierbewegingen die synchroon verlopen met een aangeboden trilling van 2,5 Hz aangetoond.

Hij liet bovendien zien dat bij stochastische trillingen een dergelijke overeenkomst tussen EMG's en trillingen ontbrak. Dit voerde hem tot de verklaring dat de gevoeligheid voor stochastische trillingen vooral in het laagfrequente gebied groter is dan voor harmonische trillingen.

Helaas is er in de onderzochte literatuur geen aanwijzing gevonden voor een actieve compensatie van periodieke trillingen en zwevingen in het laagfrequente gebied tot ca. 10 Hz. Als die zou ontbreken, zou dat een

Stochastische trillingen
voor harmonische

verklaring kunnen zijn voor de grotere gevoeligheid voor zwevingen. Hiermee zou dan tevens een betere verklaring voor de grotere gevoeligheid voor periodieke trillingen ($2.5 + 5$ Hz) volgens het werk van Cohen e.a. [11] kunnen worden gegeven.

2.5 EXPERIMENTELE TECHNIEKEN BIJ LABORATORIUMONDERZOEK

2.5.1 Trillingsopwekking

Aanvankelijk werden voor het opwekken van trillingen constructies gebruikt die met een excentriek of met een wanwichtexcitator werden bewogen. Na ca. 1960 werden electrodynamische of hydraulische excitatoren gebruikt. Deze werden door een elektrisch signaal gestuurd en waren veel gemakkelijker en nauwkeuriger in te stellen.

Sommige onderzoekers trachtten de omgeving zoveel mogelijk te laten lijken op een praktijksituatie. Enkelen gingen zover dat ze complete cabines bouwden, waarin een aantal proefpersonen tegelijk aan trillingen werden onderworpen. In het algemeen werden voor laboratoriumproeven harmonische trillingen gekozen.

De elektrisch bestuurdde apparatuur gaf bovendien de mogelijkheid stochastische trillingen op te wekken, afkomstig van een random signaalgenerator of van op magneetband opgenomen trillingen van veldonderzoek. De laatste jaren kwam de besturing door met computers gegenereerde signalen opzetten. Vooral bij gecompliceerde onderzoeken vereenvoudigde dat de uitvoering. De resultaten konden rechtstreeks in de computer worden opgeslagen en verwerkt.

2.5.2 De beoordeling van het effect

Bij de eerste proeven werd het effect met semantische methodes bepaald. Daarbij werden lijstjes begrippen zoals waarneembaar, hinderlijk, onaangenaam opgesteld, begrippen die jarenlang de boventoon bij de beoordeling hebben gevoerd (Reiher und Meister [122]). Sociaalpsychologen hebben tegen dit soort beoordelingen bezwaren, ze houden een waarde-oordeel in dat meestal niet "hard" gemaakt kan worden en de beoordelingen hebben daarom slechts een beperkte waarde.

VDI 2057 (1963) spreekt over de waarneembaarheid (K-waarde) waarbij alleen nog maar het begrip "spürbar" wordt gebruikt, in een reeks die loopt van nicht-, gerade-, spürbar, gut-, stark- tot sehr stark spürbar. In par. 2.4.2[76] werd reeds vermeld dat de instructie aan proefpersonen (equal sensation vs equal comfort) invloed had op de resultaten.

Om de spreiding te verkleinen zijn in de loop van de jaren allerlei fysiologische metingen aan de proefpersonen uitgevoerd zoals bloeddruk, hartslag en elektrische geleiding van de huid. Dit soort metingen deden de

spreiding van de resultaten echter juist toenemen. In 1967 verkondigde Coermann nog dat de beste resultaten (dat wil zeggen die met de minste spreiding) werden verkregen met een semantische beoordeling.

2.5.3 Substitutietechnieken

Inmiddels werden door verscheidene onderzoekers substitutietechnieken toegepast. Hierbij wordt de proefpersoon een referentiesignaal aangeboden en wordt hem gevraagd een testsignaal (met een andere frequentie) zodanig in te stellen dat het dezelfde sensatie opwekt. Bij deze techniek hangt veel van de keuze van het referentiesignaal af. Sommigen proberen dat in de loop van hun onderzoeken zo goed mogelijk gelijk te houden (bijv. Griffin c.s. 10 Hz bij $0,8 \text{ ms}^{-2}$ RMS). Het gevolg is dat zij over het algemeen goed reproducerende resultaten verkrijgen, maar of daar een constant blijvende fout in zit valt moeilijk te achterhalen.

Anderen, zoals Dupuis c.s. [18], vergelijken bijvoorbeeld bij hun onderzoek met stochastische trillingen smalle frequentiebanden met harmonische trillingen waarvan de frequentie in de desbetreffende band ligt.

Oborne e.a. [80] en Donati e.a. [13] maakten gebruik van een stap voor stap methode (floating equivalence). Zij beginnen een bepaalde frequentie in te stellen met een bepaald niveau. Zij geven dat als referentietrilling aan de proefpersoon en laten hem vervolgens een testsignaal, dat iets hoger ligt in frequentie (bijvoorbeeld een factor 1,25) gelijk maken aan het referentiesignaal. Deze procedure wordt herhaald tot de uitkomst binnen 10% reproduceert. Vervolgens wordt de testfrequentie de nieuwe referentiefrequentie met het zelf bepaalde niveau als referentieniveau. Een nieuwe testfrequentie wordt dan aangeboden enz. De procedure wordt herhaald tot het gewenste frequentiegebied is doorlopen. Het charmante van deze methode is dat men op dezelfde wijze van hoge naar lage frequenties kan teruggaan. Op die manier heeft men een controle op de betrouwbaarheid van de methode. Immers weer aangekomen bij de oorspronkelijk aangeboden referentiefrequentie zou het niveau bij een perfecte proef hetzelfde moeten zijn als het oorspronkelijk aangeboden referentieniveau. Uit resultaten van Oborne e.a. [80] blijkt deze betrouwbaarheid in het algemeen groot.

Donati [13] heeft op deze methode verfijningen aangebracht. In principe voorkomt men met deze methodes dat de proefpersoon prikkels van zeer verschillende sensoren (aansprekend bij uiteenlopende frequenties) moet vergelijken.

In meer recent werk van Griffin c.s. [24] werd het instellen van het test-niveau vervangen door de beoordeling "groter", "gelijk", "kleiner" van de "test" trilling t.o.v. de referentietrilling. De referenties werden willekeurig aangeboden en de stapjes tussen de referentieniveaus bedroegen steeds een factor 1,25 (2 dB). Deze methode leent zich uitstekend voor een statistische verwerking in de computer die de signalen in willekeurige volgorde genereert en de resultaten in het geheugen opslaat.

2.5.4 Stilstaande voetsteunen

Als we voor WBV (Whole Body Vibration) als definitie aannemen een trilling waarbij het gehele lichaam op alle contactplaatsen met dezelfde trillende omgeving in aanraking is, dan kunnen laboratoriumproeven waarbij de voeten op stilstaande steunen rusten worden beschouwd als de superpositie van WBV en gelijke maar tegengestelde voettrillingen.

Griffin c.s. hebben consequent al hun laboratoriumonderzoek met de stilstaande voetsteunen uitgevoerd. Zij vinden goed reproducerende krommes van gelijke gevoeligheid voor verticale trillingen van zittende proefpersonen. Er zijn duidelijke aanwijzingen dat niet steeds met dezelfde proefpersonen is gewerkt en de overeenkomst tussen resultaten door verschillende onderzoekers verkregen met tussenpozen van enkele jaren wijst dus duidelijk op een redelijke betrouwbaarheid van de resultaten. De gevoeligheidskromme die Griffin e.a. [24] publiceerden in de serie "Vibration and Comfort" is weergegeven in Figuur 6. In deze figuur is ook de weegkromme van ISO 2631 voor 10 Hz, $0,8 \text{ ms}^{-2}$ getekend. Zoals Griffin in [116] opmerkt is de overeenstemming tot 10 Hz zonder meer goed. Bij 11 Hz begint een afwijking die weliswaar ook door sommige andere onderzoekers is gevonden, maar die op het eerste gezicht te wijten zou kunnen zijn aan de kunstmatig veroorzaakte relatieve trillingen tussen voeten en zitting. Resultaten van Parsons e.a. [85], betreffende de gevoeligheid voor trillingen die alleen op de voeten inwerken, zijn ook in deze figuur getekend. De resultaten zijn in overeenstemming met een opgave van Rublack [92] waarbij de spieren van de bovenbenen bij 20-30 Hz in resonantie komen. Donati [13] geeft aan dat bij 8 Hz vrijwel alle proefpersonen trillingen waarnamen in de onderste ledematen, hij ging echter niet hoger dan 10 Hz.

Het blijft een probleem dat Griffin c.s., die zo'n grote bijdrage aan experimentele gegevens hebben geleverd, nooit duidelijk hebben vastgesteld

dat hun methode voor praktische omstandigheden beter is dan die waarbij ook de voeten meetrillen.

Griffin ging zelfs zo ver dat hij op grond van de bij zijn Instituut verkregen resultaten de weegkromme voor verticale trillingen in de long-term revision van ISO 2631 voorstelde te veranderen. Hij verwijst in [116] naar onderzoek van Suggs (1976) waaruit zou blijken dat tussen 1,5 en 32 Hz "the isolation of the footrest from vibration did not increase comfort". Dat kan men uit Griffin's werk echter niet concluderen: juist het tegendeel. Het lijkt van groot belang dat Griffin met dezelfde technieken (en zijn grote vaardigheid!) een onderzoek laat uitvoeren met meebewegende voetsteunen, voordat de weegkrommes volgens ISO 2631 worden gewijzigd.

sens to
increase
discomfort

plaatje!

volgens Griffin zonder te veranderen
gevoel hoge freq → juist
leer discomfort →
strookt niet met

Befind met
Dr. (218)

2.6. TIJDAFHANKELIJKHEID [8,9,18,25,26,32,43,44,97,112]

2.6.1 De tijdafhankelijkheid volgens ISO 2631 [44]

Zoals in hoofdstuk 2.3 is beschreven werd vanaf het begin van de opzet van ISO 2631 een tijdafhankelijkheid voor WBV (Whole-Body Vibration, ofwel lichaamstrillingen) ingevoerd. Die tijdafhankelijkheid werd toen gebaseerd op een onderzoek van de Franse Spoorwegen met betrekking tot comfort d.i. het vermijden van excessieve vermoeidheid door trillingen (Mauzin) en op de vermindering van het prestatievermogen van piloten (Nottes) zie Figuur 7.

De filosofie voor spoor- en tramwegen is voor de hand liggend. Bij lange reizen moet de passagier zich bezig kunnen houden met lezen, schrijven, eten en drinken. Voor korte ritten geldt deze eis minder sterk en kunnen sterkere trillingen worden toegelaten.

dit onderzoek
Het onderzoek van Nottes gaf niet alleen resultaten voor de "Decreased Proficiency" maar ook een tolerantiegrens en een comfortgrens voor passagiers. De Decreased Proficiency grens van Nottes viel tussen 1 en 20 minuten samen met de vermoeidheidsgrens volgens Mauzin-Sperling. In dat stadium van de normgeving was dat een zeer hoopvol teken. Nottes' resultaten werden vertaald in een 6 dB (= 2x) hoger liggen van de tolerantiegrens en een 10 dB (= 3,15x) lager liggen van de comfortgrens.

Uit Figuur 8 blijkt dat dit oorspronkelijke voorstel nauwelijks gewijzigd in ISO 2631 is opgenomen. Alleen het niveau werd verlaagd van $3,4 \text{ ms}^{-2} \text{ RMS}$ in het oorspronkelijke voorstel tot $2,8 \text{ ms}^{-2} \text{ RMS}$ in ISO 2631 (een verlaging van 18%).

2.6.2 De kritiek

Terecht oefenden zowel Clarke [8,9] als Osborne [112] kritiek op de slechte onderbouwing van de voorgestelde tijdafhankelijkheidskromme. Het werk van Mauzin is nooit boven tafel gebracht, zodat een beoordeling van de kwaliteit van het onderzoek onmogelijk is. Studies over de relatie tussen comfort en blootstellingsduur bevestigden niet de in ISO 2631 vermelde tijdafhankelijkheid. Ook bij het teruglopen van het prestatievermogen als functie van de tijd werd een dergelijke tijdafhankelijkheid niet gevonden. Onderzoekers die een teruglopen van het prestatievermogen meenden op te merken, bleken geen controlegroep (met dezelfde taak, maar zonder

trillingen) in hun onderzoek opgenomen te hebben. Zij die dat wel deden vonden geen significante verschillen. Een enkele keer bleek de trilling zelfs een positief effect te hebben, in het bijzonder bij routinematige handelingen, waarbij de aandacht gemakkelijk verslapte.

2.6.3 Laboratoriumonderzoek

Laboratoriumonderzoek wordt meestal met een korte blootstellingsduur uitgevoerd. Aan de proefpersonen wordt gevraagd een schatting te maken van het effect bij een langere blootstellingsduur. Dupuis e.a. [18] controleerden deze extrapolaties die op een half uur blootstellingsduur waren gebaseerd en zij vonden als resultaat 36 ± 13 min. ($\pm$ standaarddeviatie). Dit resultaat zou erop moeten wijzen dat de extrapolaties gemiddeld tamelijk goed waren. Wat er van die bewering overblijft als men uit zou gaan van de premisse dat er geen tijdafhankelijkheid is, laat zich raden. Bovendien laat een resultaat van 36 ± 13 , als die voor een grote populatie zou gelden, de conclusie toe dat de meningen varieerden tussen 0 en 75 min. en dat zegt niet zo veel.

In 1976 vergeleken Griffin en Whitham [32] gedurende 36 min. 4 Hz en 16 Hz sinustrillingen met 16 Hz resp. 4 Hz referentietrillingen. Iedere test- en referentietrilling duurde 10 sec. met een overschakeltijd van 1 sec. Er bleken in die 36 min geen significante verschillen tussen de tijdafhankelijkheid voor 4 Hz of 16 Hz op te treden.

In 1980 publiceerden dezelfde schrijvers [26] de resultaten van een onderzoek van de tijdafhankelijkheid van sinusvormige trillingen van 4, 8, 16 en 32 Hz waarvan de duur maximaal 4 sec. bedroeg (minimaal 1 periode). De trillingen werden vergeleken met een referentie van 1 ms^{-2} , 10 Hz gedurende 1 sec. Griffin baseerde op dit onderzoek zijn voorstel [25] voor de tijdafhankelijkheid van discomfort volgens een verband $a^4 t = \text{constant}$.

Afgezien van alle andere kritiek die mogelijk is op de opzet van het onderzoek, lijkt het irreëel om resultaten die op een blootstellingsduur van $1/32$ tot 4 sec. betrekking hebben, te extrapoleren naar een tijdafhankelijkheid die loopt van 1 min. tot 24 uur. Overigens blijkt de helft van de resultaten beter te stroken met een verband $a^3 t = \text{constant}$!

Overigens werd reeds in een eerste conceptvoorstel voor ISO 2631 van Coermann (1965) een tijdafhankelijkheid $a^4 t = \text{constant}$ genoemd. Coermann

naar
gates
in goed
en had
dit copier

definieerde een K-waarde

$$K_P = \frac{E}{\sqrt[4]{T \cdot t}}$$

waarin E en t afhankelijk waren van de situatie en T de blootstellingsduur was. In dat voorstel liep de constante E/ $\sqrt[4]{t}$ voor verschillende situaties sterk uiteen:

woonhuizen	0,6 - 0,9
vliegtuigen	4,3 - 8,2
treinen	6,1 - 20,4
personenauto's	14
vrachtwagen	26 - 39
trekkers	50 - 60

Deze constantes hadden betrekking op gemeten praktijkomstandigheden. Zij hadden dus niets te maken met de effectkant van het probleem: de toelaatbaarheid van trillingen in de verschillende situaties.

2.6.4 Het Amendement 1 op ISO 2631 [43]

opgevoerd is

Vergelijkt men de tijdafhangelijkheid volgens ISO 2631 met de relaties $a^4 t = c$, $a^3 t = c$ en $a^2 t = c$, zie Tabel 2, dan blijkt er in het gebied van 16 min. tot 4 uur blootstellingsduur een goede overeenstemming met het verband $a^2 t = c$ te bestaan. Maslen⁵⁾ heeft daarop reeds in 1972 gewezen. Hierop baseerde Allen zijn voorstellen die uiteindelijk geleid hebben tot de tijdafhangelijkheid zoals die in het Amendement 1 op ISO 2631 in 1982 van kracht werd.

5) Maslen, K.R. Efficiency under prolonged vibration and the ISO "Guide", Farnborough UK: Royal Aircraft Establishment Technical Memo EP 512.

blootstellingsduur	24 h	16 h	8 h	4 h	2,5 h	1 h	25 min.	16 min.	1 min.
ISO	0,28	0,43	0,63	1,06	1,40	2,36	3,55	4,25	5,6
$a^4 t = c$	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	2,5	2,8	5,6
$a^3 t = c$	0,5	0,57	0,7	0,9	1,05	1,4	1,9	2,2	5,6
$a^2 t = c$	0,14	0,18	0,26	0,36	0,46	0,72	1,1	1,4	5,6
$a^2 t = 9c$	0,42	0,54	0,77	1,08	1,38	2,16	3,3	4,2	16,8
ISO	0,28	0,43	0,63	1,06	1,40	2,36	3,55	4,25	5,6

- 2e blz 2
3,4 → 2,8

Tabel 2: Vergelijking van tijdafhankelijkheid volgens ISO 2631 met de functies $a^4 t = c$, $a^3 t = c$ en $a^2 t = c$. Vergelijkingsbasis 1 min. blootstellingsduur (in ms^{-2} 4-8 Hz verticaal (FDP)).

EL?

Uit Tabel 2 blijkt dat $a^2 t = 9c$ goed overeenkomt met ISO 2631 behalve bij de korte blootstellingsduur van 1 min, en dat er een afwijking optreedt bij de blootstellingsduur langer dan 4 h. Deze afwijking wordt verklaard door het denkbeeld dat Von Gierke in Zürich lanceerde, dat voor de comfortgrens bij 24 h expositieduur de waarneembaarheidsgrens moest worden benaderd. Dit noodzaakte hem van de lijn $a^2 t = c$ af te wijken, zie ook hoofdstuk 2.3. De basis voor dit denkbeeld was de rust in woonhuizen gedurende de nacht. Later werd voorgesteld voor woonhuizen een afzonderlijke addendum toe te voegen, maar de afbuiging in de kromme voor de tijdafhankelijkheid is nooit meer hersteld.

De rapportage van Griffin en Whitman [25], waarin zij een lans breken voor de $a^4 t = c$ relatie, is tendentiekus: zij trekken de lijnen $a^2 t = c$ en $a^4 t = c$ door het punt behorende bij een blootstellingsduur van 1 min. In het Amendement 1 wordt een referentietijd van 10 minuten aangehouden en die lijn ligt dus 10% boven de rij getallen voor $a^2 t = 9c$ in Tabel 2.

2.6.5 De invloed van de blootstellingsduur op schade aan gezondheid

Van hand-arm trillingen is bekend dat klachten pas na een geruime blootstellingsduur optreden. Het lijkt niet onlogisch ook bij WBV te veronderstellen dat, zo er al klachten optreden, deze zich pas na geruime tijd (bijv. na jaren) manifesteren.

dosis
→ Volgens ISO 2631 zou dat pas het geval zijn, wanneer de dagelijkse trillingsdosis $a^2 t = 72.000 \text{ (ms}^{-2})^2 \text{ s} = 72.10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ overschrijdt.

Een dergelijke benadering is erg aantrekkelijk vanuit het oogpunt dat er uit een dosismeting één getal komt.

Voordat een dergelijke dosisbepaling wetenschappelijk verantwoord kan zijn moet eerst worden vastgesteld dat een dergelijke trillingsdosis een duidelijke relatie vertoont met de optredende klachten.

Als men zou veronderstellen dat door trillingen in een bepaald orgaan een schadelijke stof wordt afgescheiden, of dat er een zekere "slijtage" optreedt dan kan men langs wiskundige weg aantonen dat de hersteltijd zeer lang moet zijn in vergelijking met de blootstellingsduur.

Als het herstel zich exponentieel gedraagt met een hersteltijd $\tau = 1 \text{ h}$ zal na een nachtrust met een schone lei worden begonnen.

Bedraagt echter $\tau = 1000 \text{ h}$ dan zal zich een gemiddelde instellen dat zelfs in een vakantie van 4 weken slechts tot ongeveer de helft vermindert.

M Het bepalen van een dagelijkse dosis $a^2 t$ is dus alleen zinvol als er medisch gezien sprake is van herstelprocessen met een lange halfwaardetijd.

Voor bepaalde klachten moet veeleer worden gedacht aan een overschrijding van een toelaatbare belasting. Door sommige onderzoekers worden in verband met rugklachten micro-traumata van de tussenwervelschijven geopperd. Voor dit soort verschijnselen lijkt een dosismeting zoals hierboven geschetst nauwelijks geschikt.

Men komt dan veeleer tot de benadering die past bij éénmalige verschijnselen, zoals de schok die door een schietstoel wordt veroorzaakt [1]. Voor een benadering waarmee de schokbelasting van de wervelkolom kan worden bepaald, wordt verwezen naar de behandeling van schokresponsiespectra in subparagraaf 2.7.4.2 en naar par. 2.8.4.

2.7. SIGNAALBEWERKING

In dit hoofdstuk wordt het principiële onderscheid tussen verschillende types signaalbewerking behandeld. Enig inzicht in deze materie is noodzakelijk voor het begrip van het in het volgende hoofdstuk te bespreken kritiek op de interpretatie van gepubliceerde onderzoekresultaten.

We zullen in de volgende paragrafen de volgende signaaltypes onderscheiden:

- a. harmonische trillingen
- b. periodieke trillingen en zwevingen
- c. stochastische trillingen (random)
- d. kortdurende trillingen, schokken en transients

Strikt genomen is het uit het oogpunt van signaalbewerking niet nodig een onderscheid te maken tussen a. harmonische en b. periodieke trillingen en zwevingen. In verband met het feit dat ISO 2631 voor een groot deel gebaseerd is op harmonische trillingen en omdat er wel wat argwaan is tegen het zonder meer toepassen van ISO 2631 op periodieke trillingen zullen we dit onderscheid hier wel maken.

2.7.1 Harmonische trillingen

Deze trillingen worden ook wel sinusvormige trillingen genoemd. Het is de eenvoudigste signaalvorm die we kennen. Zij kunnen eenvoudig worden beschreven door de formule $a = a_0 \cdot \sin(2\pi ft)$, zie Figuur 9. De grootste waarde die a kan aannemen bedraagt a_0 ; a_0 noemen we de amplitude van de (harmonische) trilling. De frequentie f geeft aan hoeveel perioden (zie Figuur 9) per seconde worden doorlopen. De periode is gedefinieerd als de kortste tijd waarin de trilling zich herhaalt. Uit de formule blijkt dat de harmonische trilling door slechts 2 grootheden wordt gekarakteriseerd: de frequentie f en de amplitude a_0 . Heeft men te maken met een tweede trilling van dezelfde frequentie dan kan die in de tijd verschoven zijn t.o.v. de eerste. Men noemt dat de faseverschuiving ϕ , die meestal als hoek wordt aangeduid, en dat is de derde en laatste karakteristieke grootheid van een harmonische trilling.

De formule voor die tweede trilling kan dan zijn:

$$b = b_0 \sin (2\pi f t + \phi) \quad (\text{zie Figuur 9})$$

De harmonische trilling is in het laboratorium gemakkelijk op te wekken. Een groot deel van de laboratoriumproeven werden dan ook met dit soort trillingen uitgevoerd.

In de praktijk treden zij op, bij voorbeeld als resultaat van een constant lopende, slecht gebalanceerde, motor.

Het is gebruikelijk om van trillingen de RMS-waarde op te geven. Dat is de afkorting van het Engelse Root Mean Square. In het Nederlands wordt die term aangeduid met "middelbare waarde". Het is dus de wortel uit het gemiddelde van de gekwadrateerde momentane waarde zoals de Engelse benaming duidelijk aangeeft. Bedraagt de amplitude a_0 , dan is het gemiddelde van de gekwadrateerde momentane waarde $a_0^2/2$ en dus altijd positief, zie Figuur 10. De RMS-waarde van een harmonische trilling is daarom $\frac{1}{2} a_0 \sqrt{2}$ ofwel $0,707 a_0$.

2.7.2 Periodieke trillingen

Periodieke trillingen worden gevormd door twee of meer harmonische componenten die een gemeenschappelijke periode hebben. Veel voorkomende periodieke trillingen zijn die waarbij de frequenties $1x$, $2x$, $3x$, $4x$, enz. de grondfrequentie f bedragen. De wiskundige beschrijving kan bijvoorbeeld de volgende zijn:

$$a(t) = a_1 \sin 2\pi f \cdot t + a_2 \sin (2\pi 2f \cdot t + \phi_2) + a_3 \sin (2\pi 3f \cdot t + \phi_3) + \dots$$

Het is overzichtelijk zo'n samengestelde trilling in de vorm van een spectrum te tekenen, zie Figuur 11. Langs de horizontale as wordt altijd de frequentie uitgezet, langs de verticale as de amplitude.

Als we te maken hebben met een trilling die in een versnelling is uitgedrukt is de dimensie van de verticale as m/s^2 (dezelfde dimensie als de amplitude). De frequentie wordt uitgedrukt in Hz. In bepaalde gevallen zal een fasespectrum van belang zijn. Daarin worden de hoeken ϕ_i (verticaal) uitgezet als functie van de frequentie. Een amplitude + fasespectrum noemen we de beschrijving van de trilling in het frequentiedomein, in tegenstelling tot het plaatje waarin de momentane versnelling als functie van de tijd wordt weergegeven, wat we de beschrijving van de trilling in het tijddomein noemen. Beide beschrijvingen kunnen in elkaar omgerekend worden. De bewerking van het tijddomein

naar het frequentiedomein noemen we een Fourier Analyse, in omgekeerde richting een Inverse Fourier Analyse. Vaak komt men de term Fourier Transformatie tegen. Daarmee wordt ongeveer hetzelfde bedoeld, alleen moet uit het zinsverband blijken in welke richting (van tijd- naar frequentiedomein of omgekeerd) de transformatie wordt uitgevoerd.

Een speciale vorm van periodieke trillingen krijgt men wanneer de harmonische componenten dicht bij elkaar liggen, bijvoorbeeld:

*1 a wech
00-kerke*

$$a = a_1 \sin 2\pi \cdot 11 \text{ ft} + a_2 \sin 2\pi \cdot 12 \text{ ft}$$

Zoals men in Figuur 12 kan zien, ontstaat een trilling die ogenschijnlijk sinusvormig is, maar waarvan de amplitude varieert. Dat is echter niet het geval: het is pure superpositie. Als $a_1 = a_2$ krijgt men 2x per periode van de verschilfrequentie een volkomen uitdoven van de trilling.

Dit soort trillingen komt men in de praktijk tegen wanneer er twee trillingsbronnen met een klein verschil in toerental werken. Berucht zijn deze trillingen bij schepen met twee schroeven. Dit soort trillingen blijken in de praktijk namelijk veel hinderlijker te zijn dan harmonische trillingen met dezelfde RMS-waarde.

De RMS-waarde van periodieke trillingen kan men eenvoudig berekenen uit het sommeren van de kwadraten van de amplitudes van de afzonderlijke componenten, daaruit de wortel te trekken en die met $1/\sqrt{2} = 0,707$ te vermenigvuldigen:

$$a_{\text{RMS}} = 0,707 \sqrt{(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots)}$$

De fase speelt bij het bepalen van de RMS-waarde geen rol. Dit in tegenstelling tot de piekwaarde, die sterk afhankelijk is van faseverschuiving.

Dit laatste is de voornaamste reden om RMS-waarden te meten. Eventuele faseverschuivingen in de meetapparatuur spelen dan geen rol. In de tijd dat ISO 2631 werd opgesteld speelde dat argument sterker dan nu, omdat aan de faselineariteit van opnemers en versterkers de laatste jaren veel aandacht is besteed en bovendien bij digitale analyse correcties kunnen worden ingevoerd.

2.7.3 Stochastische trillingen

Stochastische trillingen vormen de hoofdmoot van de trillingen die men in de praktijk ontmoet. Het kenmerk van deze trillingen is dat ze niet voorspelbaar zijn. Ze kunnen niet op de manier als we hierboven gedaan hebben in formules worden gebracht. Stochastische trillingen moeten op statistische wijze worden beschouwd. Als men op regelmatige tijdsintervallen de momentane waarde bepaalt, dan moet de verdeling naar grootte een Gausse-verdeling zijn, om op theoretische gronden de hierna te bespreken analyse te kunnen toepassen. In de praktijk voldoen stationaire stochastische trillingen vrijwel altijd aan deze voorwaarde.

Een bekende waarde om een Gausse-verdeling te karakteriseren is de variantie. Dat is voor een verdeling met als gemiddelde waarde nul de som van de kwadraten van alle waarden gedeeld door het aantal. De wortel uit de variantie noemt men de middelbare waarde (= RMS) en deze is volkomen identiek met de middelbare waarde zoals die bij de twee voorgaande types signalen werd behandeld. Gegeven het feit dat er meters in de handel zijn die de middelbare waarde zelf bepalen (True RMS meters) hebben we voor stochastische trillingen een voor de hand liggende vergelijkingsbasis met periodieke trillingen.

De transformatie naar het frequentiedomein is een minder eenvoudige zaak, maar met behulp van (electrische) bandfilters kunnen we de RMS-waarde per frequentieband bepalen. Gebruikt men hiervoor de in ISO 2631 aanbevolen tertsbandfilters dan kan men de RMS-waarde als functie van de centerfrequenties bepalen. In het voorbeeld van Figuur 13 is zo'n gemeten tertsbandgrafiek getekend. De vermoeidheidsgrens voor verticale (a_z) trillingen voor een blootstellingsduur van 16 min. en 1 uur zijn ook ingetekend. Dit meetresultaat wordt volgens ISO 2631 dan als volgt beoordeeld. In de 16 Hz band was de trilling (gewogen) het sterkst. De trilling benaderde de 16 min. FPD grens, deze trilling zou dus maar gedurende korte tijd (18 min.) mogen worden toegelaten.

Als men zo'n tertsbandanalyse op een stochastische trilling uitvoert blijkt de meter, vooral in de banden met lage frequenties sterk heen en weer te slingeren. Dat houdt verband met het aantal (statistische) graden van vrijheid. Is dat aantal klein, dan is de variatie van de aanwijzing groot. Barton [5] noemt $n = 80$ aan de kleine kant, $n = 140$ goed. Het aan-

tal (statistische) graden van vrijheid laat zich berekenen uit de bandbreedte van het filter B en de tijd T waarover gemiddeld wordt, volgens

$$n = 2BT$$

Van de 1 Hz tertsband is de bandbreedte 0,23 Hz. Voor 140 graden van vrijheid heeft men dan een tijd $T = 300$ s voor de middeling nodig. Dit wijst duidelijk in de richting van noodzakelijk lange meettijden om aan de combinatie frequentieresolutie (B) en statistische betrouwbaarheid (n) te voldoen. Voorwaarde voor een goede analyse is altijd het stationair zijn van het proces. Dat nu, in combinatie met een lange meetduur, is in de praktijk moeilijk te verwezenlijken.

Bij de inrichting van laboratoriumproeven kan, en dient, men met deze facetten van de signaalbewerking rekening te houden, hetgeen helaas bij een aantal gepubliceerde onderzoeken niet het geval was. Daarop wordt in par. 2.8.3 verder ingegaan.

De spectrale vorm waarin een stochastische trilling wordt voorgesteld is het dichtheidsspectrum. Een dichtheidsspectrum verkrijgt men als men het meetsignaal door filters met 1 Hz bandbreedte stuurt en de variantie (dat is het kwadraat van de RMS-waarde van de filterresponsie) als functie van de frequentie uitzet. De dimensie van een versnellingsdichtheidsspectrum is dus $(\text{ms}^{-2})^2/\text{Hz}$. In principe is het een continue spectrum, zie Figuur 14. Het gearceerde oppervlak tussen de frequenties f_1 en f_2 heeft als dimensie $(\text{ms}^{-2})^2$ en is de variantie in die frequentieband. Als men uit het oppervlak de wortel trekt, krijgt men de RMS-waarde voor de betreffende frequentieband.

Op dezelfde wijze kan men tertsbanden samen nemen door de RMS-waarden te kwadrateren, te sommeren en uit het resultaat weer de wortel te trekken. Dit is in analogie met wat over periodieke trillingen is gezegd.

2.7.4 Kortdurende trillingen

Schokken en transients onderscheiden zich van de voorgaande 3 signaaltypes door hun éénmalig optreden of het zich met onregelmatige (lange) tijdsintervallen herhalen. Dit type signalen is dus niet-stationair in tegen-

stelling met de voorgaande 3, waarbij het stationair zijn een voorwaarde was voor het beschrijven van de trilling. Iedere methode die op de één of andere manier tracht de schokken of transients als een deel van een stationaire trilling te beschouwen is tot mislukking gedoemd. Dat men desondanks in ISO/TC 108/SC4 Study Group A reeds jarenlang tracht zo'n oplossing te forceren getuigt van het gebrek aan achtergrond op het gebied van de signaalbewerking van schokken.

In het vakgebied van trillingen en schok (dynamica) is het een erkend feit dat er over trillingen veel vakliteratuur bestaat en tientallen leerboeken zijn geschreven, maar dat over schok zeer weinig algemeen bekend is.

Binnen ISO/TC 108 maakte men zich over dit gebrek aan kennis bij de vele trillingsexperts zo'n zorg, dat een speciale secretariaatsstuurcommissie voor schok in het leven geroepen is (ISO/TC 108/SSCS)!

In Duitsland woedt de discussie over het meten van stoten in trillingen al jarenlang zeer heftig. Maar naar de (weinige) Duitse specialisten op het gebied van schok wordt daar helaas niet geluisterd. Dat is jammer, niet zozeer voor die specialisten, maar voor al die wetenschappers die vele uren besteden om - vaak op zeer ingenieuze wijze - een oplossing te vinden voor een principieel onoplosbaar vraagstuk.

Het probleem bij dit soort zaken is dat men foefjes verzint om de wél begrepen effecten van stoten tegemoet te komen. De resultaten zullen in een aantal praktijkgevallen beter uitvallen, maar toegepast als algemeen aanvaarde methode kan het de werkelijke problemen versluieren, omdat de methode principieel (uit het oogpunt van signaalbewerking) fout is.

2.7.4.1 De Fourier Integraal

Door Fourier werd in 1807 een methode aangegeven waarmee elke éénmalige functie door een reeks sinusvormige trillingen kan worden benaderd. De exacte oplossing is als de Fourier Integraal bekend geworden en vormt in zijn numerieke vorm de basis voor de moderne digitale Fourier Analyzers. We zullen hier niet op de details ingaan. We vermelden slechts dat indien men een éénmalig verschijnsel zich regelmatig laat herhalen de Fourier analyse van het dan periodieke signaal, vermenigvuldigd met de periode T , punten oplevert die liggen op de Fourier integraal. Kiest men voor de periode een andere waarde dan krijgt men uiteraard andere punten, maar deze vallen ook weer samen met de resultaten van de Fourier integraal. Deze belangrijke ontdekking vormt de basis voor de analyse van schokken en

kortdurende trillingen. Een Fourier spectrum van een schok geeft evenals het Fourier spectrum van een periodieke trilling informatie over de grootte en over de fase.

De numeriek uitgevoerde Fourier integraal levert via een inverse transformatie weer het oorspronkelijke signaal op. Tussen de Fourier analyse en de Fourier integraal zit echter één verschil, waarop niet genoeg nadruk kan worden gelegd: er is een dimensieverschil. Zoals we in paragraaf 2.7.2 al zagen blijft bij een Fourier analyse de dimensie onveranderd. Bij de Fourier integraal wordt de dimensie met de eenheid van tijd vermenigvuldigd. Een versnellingssignaal, zoals getekend in Figuur 15 levert een modulusspectrum met als dimensie m.s^{-1} (of liever $\text{m.s}^{-2}/\text{Hz}$ om verwarring met snelheid te voorkomen) en een fasespectrum.

Wie zou proberen op dezelfde wijze als bij het dichtheidspectrum (Figuur 14) een deeloppervlak van het spectrum te bepalen stuit op 2 problemen. De eerste is hoe breng ik de fase in rekening, de tweede is de dimensie: die wordt weer gewoon versnelling (dus geen RMS). Deze operatie is niet zinvol, hij wordt alleen genoemd om nogmaals duidelijk te maken dat we bij schokken met een ander type signaal te maken te hebben namelijk: een niet-stationair signaal, waarvoor andere bewerking- en interpretatiemethodes gelden. Het willen bepalen van RMS-waarden of het hoe dan ook willen vergelijken van kortdurende verschijnselen met stationaire trillingsverschijnselen werkt alleen maar verwarrend.

Voor de signaalbewerking in verband met de bepaling van de invloed van trillingen op de mens geeft ISO 2631 geen enkele aanvaardbare oplossing voor schokken en kortdurende trillingen. Uit het gezichtspunt van de signaalbewerkingstheorie blijft als enige praktische uitweg de schok-responsieanalyse, zoals hierna wordt beschreven.

Noot (red.) 2. Naast de genoemde mathematische bewerking van een schoksignaal is in ISO-verband ook gewerkt aan een meer direkte beschrijving van het effect van een schok.

ISO TC 108 / SC4 (studiegroep A) stelt in het werkdokument N 142 van juni 1983 beschrijvingen ter discussie van drie procedures die het mogelijk zouden moeten maken om de speciale effecten van kortdurende signalen te beschrijven. Naast de schokresponsie methode (zie 2.7.4.2) worden twee methoden gegeven die uitgaan van een berekening van een dosis-effekt onder de aanname dat kortdurende verschijnselen met grote amplitude een grotere bijdrage leveren dan continue verschijnselen met een vergelijkbare r.m.s.-waarde. De beschrijving van zowel de "Quad vibration values" als van de "impulse extended value" wordt hier overgenomen uit het bovengenoemde dokument ISO / TC 108 / SC4 N 142. Daarin wordt overigens niet aannemelijk gemaakt dat deze beide bewerkingen resultaten opleveren, die in overeenstemming zijn met enige subjektieve gewaarwording. In de genoemde kommissie wordt met name op de "Quad vibration" methode veel kritiek gehoord.

1. Quad Vibration Values

1.1 The Quad Vibration Dose is defined as the integral over the forth power of the weighted acceleration $a_w(t)$. The report of measurements has to include a definition of the frequency weighting use. The dose values of individual exposure periods may be added directly.

$$\text{Quad Vibration Dose} = \int_{t=0}^{t=T} a_w^4(t) dt$$

Where $a_w(t)$ is the frequency-weighted acceleration time history, and T the total period of time over which the acceleration history is recorded.

1.2 The Root Mean Quad (RMQ) value uses the same time dependency as the Quad Vibration Dose. It is however the fourth root of the mean value of the Quad Vibration Dose.

typisch dat de wet
dat de erg
komt dat de
va dat frequentie
vergelijkbaar
waarschijnlijk is
geen op geluiden!

$$\text{RMQ} = \left(\frac{\text{Quad Vibration Dose}}{T} \right)^{\frac{1}{4}}$$

The procedures of the quad value measurements are thus analogous to the ones used for RMS measurements except that the square and the square root are replaced by fourth power and fourth root. A quad value measurement will always yield higher values than a RMS measurement. The difference will tend to be greatest with signals having high crest factors. For sinusoidal signals the quad mean values will be approximately 10% higher than RMS values. The difference increases as the signal becomes more impulsive. Provisionally, RMQ measurements may be compared with guidance presented as RMS values by allowing for this 10% difference. (As originally defined the RMQ value is calculated without the use of any exponential time averaging.

It would be possible to calculate RMQ with exponential averaging under certain restriction in the low frequency range. If RMQ values are determined with exponential averagings they they should be referred to as RMW and the time constant should be quoted.

2. Impulse Extended Values

- 2.1 The Impulse Extended Dose (IED) is defined as the integral over the square of the impulse extended RMS signal with a time constant of 125 ms for the RMS detection, and a time constant of 60 s for the impulse extension:

The RMS-signal is defined by the integral equation

$$\text{RMS}_{125}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t \exp\left(-\frac{\xi}{\tau}\right) a_w^2(t - \xi) d\xi}$$

The squared RMS-signal is extended by an RC-time constant of 60 s in such a way that the momentary out

put is always equal or greater than the momentary RMS₁₂₅-signal. When the momentary RMS-signal decays the impulse extended signal will follow but with a decaying rate of an TC-time constant of 60 s. In this way the residual value of the impulse extended signal will usually be higher than the momentary RMS-signal.

The Impulse Extended Dose is determined as the integral over the impulse extended signal.

Impulse Extended Dose =

$$\int_0^T (\text{Impulse Extended RMS-signal})^2 dt$$

Where T is the total period of time over which the vibration history is recorded.

- 2.2 The Impulse Extended Mean value (IEM) uses the same time dependency as the Impulse Extended Dose. It is however the root of the mean value of the IED.

$$\text{IEM} = \left(\frac{\text{Impulse Extended Dose}}{T} \right)^{\frac{1}{2}}$$

The procedures of the impulse extended value measurements are thus analogous to the ones used for RMS measurements except that an additional impulse extension gives rise to higher weighting of signals with varying magnitude. An impulse extended measuring procedure will yield identical values as a pure RMS method for sinusoidal signals. The difference will tend to increase with signals having high crest factors.

2.7.4.2 Het schokresponsiespectrum

Schokken zijn zo oud als de aarde is. Iedereen weet hoe fataal aardbevingen kunnen zijn. Op de vele breukvlakken waar aardbevingen vaak voorkomen zijn in de loop der eeuwen eigen oplossingen gevonden om de schade te beperken of snel te kunnen herstellen. In de USA heeft men het

over de wetenschappelijke boeg gegooid. In de dertiger jaren werd daar reeds gepubliceerd over een mechanisch instrument dat responsiespectra op aardbevingen registreerde. Het bestond uit een aantal systemen elk bestaande uit een massa die aan een bladveer was bevestigd. Aan die massa zat een naald die over een registratierol bewoog. De andere zijde van de veer was aan de bodem verankerd. Ieder systeem had een andere eigenfrequentie. Na een beving werd de registratierol verwijderd en kon men zien hoe de verschillende systemen op de beving gereageerd hadden, Figuur 16. Globaal kwam men op den duur tot de ontdekking dat alle systemen beneden 0,2 Hz ongeveer dezelfde snelheid registreerden en boven 2 Hz de versnelling maatgevend was voor de responsie van de systemen. Uiteraard gold zo'n vergelijking voor elke schok afzonderlijk en hing de grootte van de responsie af van de sterkte van de beving. Deze bevinding die in de loop der jaren werd opgedaan vormde een eerste stap tot het "dynamisch construeren" van gebouwen.

Een soortgelijke ontwikkeling vertoonde circa 10 jaar later het schokonderzoek aan oorlogschepen bij het Naval Research Laboratory in Amerika. Ook daar werden schokken, veroorzaakt door onderwaterexplosies, gemeten met massa-veer systemen zoals hierboven beschreven. Uiteraard waren deze meetsystemen kleiner van afmeting en hadden zij hogere eigenfrequenties, maar principieel was het dezelfde meetmethode. In de loop der jaren werd deze meetmethode vervangen door de berekening van de schokresponsie van een massa-veer systemen op de gemeten versnelling van een schok. Tegenwoordig is de schokresponsieanalyse gemeengoed geworden in de wereld van de mechanische schok en zijn verscheidene berekeningsmethodes voor het bepalen van de dynamische sterkte van constructies hierop gebaseerd.

IWECO-TNO, dat veel schokonderzoek voor de KM verricht, maakt bijna dagelijks gebruik van de schokresponsieanalyse zowel bij berekeningen als bij schokbeproevingen.

We zullen nu eerst proberen te begrijpen wat deze analyse ons kan leren: bepalen we ons tot 1 enkel massa-veersysteem met een eigenfrequentie f_0 , zie Figuur 17. Laten we op het einde van de veer een éénmalige sinusvormige versnelling werken, dan reageert het massa-veersysteem als een versnellingsmeter wanneer de duur van de schok $\tau \gg 1/f_0$, zie Figuur 17a. Dit is gemakkelijk voor te stellen: bij zeer lage frequenties beweegt het systeem vrijwel onvervormd met de opgedrongen versnelling mee. De versnelling $\ddot{y}$ die op de massa m werkt is vrijwel even groot als de aangeboden versnelling $\ddot{x}$. De op de veer k uitgeoefende kracht F is volgens de

wet van Newton $F = m \cdot \ddot{y} \approx m \ddot{x} = m a \sin 2\pi \frac{t}{\tau}$ (voor $0 < t < \tau$). De indrukking z van de veer bedraagt dan

$$z = \frac{F}{k} = \frac{m}{k} a \sin 2\pi \frac{t}{\tau} = \frac{a}{(2\pi f_0)^2} \sin 2\pi \frac{t}{\tau}$$

en de maximale indrukking is dan

$$z_{\max} = a/(2\pi f_0)^2.$$

Het systeem gedraagt zich dus als een versnellingsmeter. Men kan dat vergelijken met de reactie van het menselijk lichaam in een lift waarbij de maag reageert op de verandering van de beweging.

In de andere extreme situatie is de aangeboden versnelling zo snel beëindigd dat de massa, vanwege zijn traagheid nog nauwelijks heeft kunnen reageren, zie Figuur 17c. De veerindrukking is dus ongeveer gelijk aan de afgelegde weg x . Behalve van de aangeboden versnelling a is de indrukking nu ook afhankelijk van de duur van de aangeboden versnelling τ . De maximale indrukking bedraagt

$$z_{\max} = a\tau^2/2\pi$$

Als bijvoorbeeld $\tau = 1/(5 f_0)$ is de maximale indrukking bij een korte pulsduur ongeveer 0,25 maal de max. indrukking bij een zeer lange duur van een puls met dezelfde versnelling.

Het berekende schokresponsiespectrum van zo'n éénmalige sinuspuls is in Figuur 18 getekend. Zo'n diagram is geen spectrum in de echte zin des woords, het is slechts een verzameling punten die de maximale responsie (indrukking van de veer) van een reeks één-massa-veer systemen weergeeft. Het wordt op zgn. 4 coördinatenpapier getekend, zodat naar behoefte de max. indrukking, de max. snelheid van die indrukking en de maximale versnelling van de indrukking kan worden afgelezen.

Uit Figuur 18 blijkt dat één-massa-veersystemen met verwaarloosbare demping en eigenfrequenties kleiner dan 10 Hz een max. indrukking van 41 mm of iets minder vertonen. De grootste versnelling treedt op bij het systeem met 22 Hz eigenfrequentie en bedraagt 315 ms^{-2} , dus ruim 3x zo groot als de aangeboden versnelling.

Zo'n schokresponsiespectrum geeft een goede indruk van de hevigheid van de responsie van een ongedempte constructie op een schok. Het is niet moge-

lijk om uit het schokspectrum het aangeboden versnellingssignaal te reconstrueren.

Men kan de schokresponsiespectra ook berekenen met gedempte één-massa-veersystemen om een betere aansluiting te krijgen met de dynamische eigenschappen van het menselijk lichaam, zoals die bijvoorbeeld uit admit-tantiemetingen zijn gevonden. Een voorbeeld met een demping van de één-massa-veersystemen van 35% van de kritische demping is in Figuur 18 gestippeld weergegeven. Men leest daaruit af dat de maximale indrukking van het systeem met 1 Hz nog 37,5 mm bedraagt. De max. versnelling treedt nu op bij het 25 Hz systeem en bedraagt daarbij 142 ms^{-2} , een vergroting van de aangeboden versnelling van slechts 142.

Dit soort schokresponsiespectra leent zich wellicht goed voor het bepalen van de dosis van trillingen waarin plotselinge stoten voorkomen. Het gedempte schokresponsiespectrum kan namelijk ook op stationaire trillingen (harmonische, periodieke of stochastische) worden toegepast zoals uit onderzoek is gebleken. (zie Noot (red.) 4) Zo nodig kan de kracht op de massa i.p.v. de veerindrukking als criterium worden genomen.

Noot (red.) 3 Het bezwaar van de beschrijvingen van een schok middels één van de in werkdokument N 142 genoemde methoden is dat meetapparatuur geschikt voor het meten van de gewogen RMS-waarde van het aangeboden signaal, niet zonder meer gebruikt kan worden om het aandeel van kortdurende signalen te bepalen. Waar het in de praktijk veelal niet bekend is hoe het schok- en trillingsmilieu is opgebouwd, wordt door het toepassen van een eenvoudig en zo mogelijk reeds bestaand meetinstrument vrijwel onmogelijk. Zou kunnen worden aangetoond dat één van de genoemde bewerkingsmethodieken zinvolle resultaten geeft, dan zou ook een ingrijpende wijziging nodig zijn van de normgeving op het gebied van meetinstrumenten voor lichaamstrillingen (zie noot 6 op pag 83).

Zolang we echter niet beschikken over een éénduidig dynamisch model van het menselijk lichaam, samen met voldoende kennis van de grenzen die gesteld moeten worden een optredende krachten of vervormingen, blijft elke discussie over de manier van schokbewerking zinloos en leidt af van de werkelijke problematiek.

Noot (red.) 4 De auteur doelt op niet gerapporteerd EI onderzoek (eigen initiatief speurwerk) van TNO-IWECO, dat is uitgevoerd anticiperend op eventuele vervolgoopdrachten van DGA.

2.8. INTERPRETATIE

De aanbevelingen die in ISO 2631 worden gedaan betreffende de interpretatie van verschillende soorten signalen worden in dit hoofdstuk geanalyseerd. Daarbij wordt gebruik gemaakt van enige theoretische achtergronden van de signaalbewerking, om de publicaties van verscheidene onderzoekers, waarin de aanbevelingen volgens ISO 2631 worden bekritiseerd, te analyseren.

Noot (red.) 5 Verwezen kan in dit verband worden naar de navolgende literatuur:

- ISO / DIS 4865 Vibration and shock - Methods for analysis and presentation of data (1983).
- Bendat J.J. and Piersol A.G. Randon data - Analysis and Measurement procedures, New York, Wiley Int. 1971.
- Randall R.B. Application of Brüel and Kjaer instruments to Frequency Analysis, Kopenhagen.
- Harris CM, Crede E: Shock and Vibration handbook, New York, Mc Graw - Hill 1976.
- Broch J.T.: Mechanical Vibration and Shock measurements, Brüel and kjaer 1980 (revised edition).

In de genoemde schokanalyse-methoden wordt niet gerekend met het aantal schokken per tijdseenheid. Uit de literatuur is overigens weinig of niets bekend over het effect van het aantal schokken per tijdseenheid op het toelaatbare schok- en trillingsniveau.

2.8.1 Harmonische trillingen

Bij harmonische trillingen is de toepassing van ISO 2631 geen enkel probleem. Uitkomsten verkregen met de "weighting method" en met de "rating method" zijn gelijk. Afgezien van meetproblemen (plaats van de opnemers, zie Hoofdstuk 2.9) en van de individuele variabiliteit van de krommes voor gelijke trillingsgevoeligheid (zie par. 2.4.2) zijn er bij de interpretatie geen problemen te duchten.

Tenslotte is het grootste deel van de laboratoriumproeven waarop ISO 2631 stoelt met harmonische trillingen uitgevoerd.

2.8.2 Periodieke trillingen [5,11,18,21,96]

Bij periodieke trillingen moet men rekening houden met een verschil tussen de uitkomsten van de "rating method" en de "weighting method". In het algemeen zullen de componenten in verschillende tertsbanden liggen en volgens de "weighting method" gesommeerd worden volgens de wortel uit de som van de kwadraten van de gewogen componenten terwijl bij de "rating method" alleen de grootste gewogen component in de beoordeling betrokken wordt. ISO 2631 zegt dat bij een wezenlijk verschil (bijvoorbeeld goedkeuren-afkeuren) de "rating method" de doorslag moet geven. Over het toepassen van ISO 2631 op periodieke trillingen zijn een aantal publicaties verschenen die elkaar op wezenlijke punten tegenspreken.

het is relatief voor de praktijk

Zo vonden Cohen e.a. [11] dat bij de uitvoering van een coördinatietaak met alle vier de ledematen gedurende 2,5 h, de reactiesnelheid bij $0,7 \text{ ms}^{-2}$ RMS periodieke trilling (2,5 en 5 Hz) significant lager lag dan bij harmonische trillingen met 2,5 Hz en 5 Hz en dezelfde versnelling van $0,7 \text{ ms}^{-2}$ RMS. De reactiesnelheid liep t.o.v. geen trilling significant terug met 8% bij 2,5 Hz, 14% bij 5 Hz en 24% bij de periodieke trilling. Zij opperen dat de piekfactor hierbij een rol zou hebben gespeeld. Barton [5] spreekt dit tegen, de piekfactor bedroeg 1,76 en het signaal had volgens hem veel meer het karakter van een periodieke stoot. De mening van de auteur hierover is dat niet het trillingssignaal bepalend is voor de vermindering van de reactiesnelheid, maar de responsie van het menselijk lichaam op de trilling. Wellicht speelde een verminderde actieve compensatie voor periodieke trillingen hierbij een rol (zie hoofdstuk 2.4). Deze is blijkbaar bij 2,5 Hz harmonisch beter dan bij 5 Hz harmonisch. Voor de veronderstelling dat de actieve compensatie bij periodieke trillingen minder is dan bij harmonische trillingen is in de onderzochte literatuur geen andere aanwijzing gevonden.

a

Dupuis e.a. komen in deel III van [18] eveneens tot de conclusie dat een beoordeling op grond van de wortel uit de kwadraten van de gewogen componenten van periodieke trillingen ("Schwingungsgemische") niet altijd juist is. In hun conclusie noemen zij een gemiddeld 35% lagere tolerantiegrens. Uit hun Figuur 13 blijkt dat bij een "Grundkomponent" van 8 Hz de "Zusatzkomponente" van 3 tot 6 Hz leiden tot een bijna 2x zo lage tolerantiegrens.

Fothergill e.a. [21] komen tot de conclusie dat de beoordeling volgens de wortel uit de kwadraten van de gewogen componenten ("weighting method")

veel beter is dan de beoordeling van de afzonderlijke componenten ("rating method"). Zij vonden echter een van ISO 2631 afwijkende weegkromme, zoals die in al het werk bij het Institute of Sound and Vibration in Southampton (Griffin) wordt gevonden, zie par. 2.5.4.

Schoenberger [96] komt eveneens tot de conclusie dat de "weighting method" een betere beoordeling geeft dan de "rating method".

Alle bovenvermelde proeven hebben betrekking op verticale (z-as) trillingen van zittende personen.

Fothergill e.a. [21] concludeert aan het eind van sec. 4 dat een of andere vorm van correctie voor zwevingen met een (zwevings)periode langer dan 1 s nodig is. Deze conclusie sluit aan bij de opmerking in par. 2.7.2 over de grotere hinderlijkheid van zwevingen dan die van harmonische trillingen met dezelfde RMS-waarde.

2.8.3 Stochastische trillingen [3,5,9,10,13,16,18,22,31,35,36,65,84,89,91,96, 102,113,117,123,124]

In 1967 besloot ISO/TC 108/WG 7 dat stochastische (random) trillingen op dezelfde wijze beoordeeld konden worden als harmonische en periodieke trillingen (zie Hoofdstuk 2.3).

Er was toen nog zeer weinig onderzoek op dit gebied uitgevoerd. Onderzoekingen waarbij stochastische trillingen een rol speelden werden hoofdzakelijk nadien gepubliceerd.

Ashley [3] gebruikte een kunstmatig gegenereerd stochastische signaal als referentie voor het bepalen van krommes voor gelijke gevoeligheid voor trillingen van staande personen. In de appendix geeft hij een "crestfactor" op van 9.8. Uit een statistische beschouwing blijkt direct hoe gering de kans is op het bereiken van een piek van 9.8σ (σ is de middelbare waarde = standaarddeviatie van een stochastisch proces met een zeer grote populatie). Barton merkt in [5] zeer terecht op dat het opgeven van een crestfactor van een stochastische trilling weinig zinvol is. Wanneer de momentane waarden van een meting afwijken van een Gausse-verdeling moet men zich eerder afvragen of er aan de voorwaarde van een stationair stochastisch proces is voldaan, dan kunstmatig pieken in het proces opmerken die een afzonderlijke behandeling zouden behoeven. In een goed opgezette meting komen de pieken normaliter niet boven $3,5x$ de RMS-waarde van de stochastische trilling uit.

Veel van de aangehaalde literatuur heeft betrekking op veldonderzoek. Deze verschaft informatie over gemeten dichtheidsspectra in allerlei voertuigen zonder een relatie tussen ISO 2631 voor harmonische en stochastische trillingen te leggen. Een uitzondering hierop vormen de publicaties van Donati [13], van Dupuis [18] en van Griffin [31].

7 Donati e.a. [13] concludeerden dat de proefpersonen in het algemeen gevoeliger waren voor stochastische trillingen dan voor harmonische trillingen. Gemiddeld over het gebied van 1-10 Hz was het verschil slechts 1 dB (12%) maar voor de lagere frequenties was het verschil groter dan 2 dB (25%) voor verticale trillingen tussen 2 en 3,5 Hz. Ook voor 1,5 Hz in dwarsrichting (y-as) verschilden de resultaten ca. 20%. Een verdere uitwerking van de in hun Appendix 2 gegeven bandbreedte leidt tot een relatieve bandbreedte van 0,15 à 0,20 (een tertsband heeft een relatieve bandbreedte van 0,23). Dat betekent dat het aantal (statistische) graden van vrijheid bij een gemiddelde insteltijd van 100 sec. $n = 2 \text{ BT} < 70$ was voor 2 Hz en < 350 voor 10 Hz. Bij de lage frequenties werd dus veel te weinig tijd genomen om het gelijkwaardige stochastische signaal in te stellen.

2 Dupuis e.a. [18] concludeerden aan het eind van deel IV van de geciteerde publicatie een grotere gevoeligheid voor stochastische trillingen. Hun onderzoekopzet was minder geavanceerd dan die van Donati c.s., maar zij vergeleken wel harmonische trillingen die qua frequenties overeenkwamen met smalle band stochastische trillingen. Hun verschillen liepen op van 1,05 bij 12 Hz tot 1,33 bij 2,5 Hz en zelfs 1,7 bij 1,5 Hz verticale trillingen.

Griffin e.a. [31] vonden voor stochastische trillingen met een bandbreedte van tertsbanden, octaafbanden en over banden ter breedte van 3 octaven geen significante verschillen met harmonische trillingen. Zij vergeleken de trillingen steeds met de gebruikelijke referentie van 10 Hz $0,75 \text{ m/s}^2$ RMS. De stochastische trillingen bestreken het frequentiegebied van 2,8 tot 22,4 Hz, de harmonische trillingen werden oplopend met een factor 1,25 gekozen tussen 3,15 en 20 Hz. Ook bij deze proef rustten de voeten weer op een stilstaande steun.

Pradkov e.a. [113] voerden het begrip "absorbed power" in voor de beoordeling van stochastische trillingen. Barton [5] gaat daar diep op in en

toont aan dat deze beoordeling dezelfde resultaten geeft als een beoordeling op gewogen dichtheidsspectra. Dezelfde kwestie speelt ook bij de beoordeling van hand-arm trillingen. In het literatuurrapport over hand-armtrillingen [125] is op het verband tussen dichtheidsspectra, mechanische impedantie en vermogensdissipatie reeds dieper ingegaan.

Barton e.a. [124] maken in deze publicatie een vergelijking van de trillingen die een bedieningsman in een grondverzetmachine ondervindt met de trillingen van het hoofd die optreden bij hard lopen of wandelen. Voor zover bekend was Simic de eerste die in zijn proefschrift (T.U. Berlin, 1970) deze vergelijking maakte. Volgens de auteur van deze literatuurstudie is het onwaarschijnlijk dat een versnelling veroorzaakt door het actief bewegen van het lichaam ook altijd passief verdragen kan worden zonder schade aan de gezondheid te berokkenen. Daarvoor lopen de houdingen en de spieractiviteit bij lopen en zitten te veel uiteen. Men moet bovendien rekening houden met de gebruikte meetplaats (het gebit), die een heel andere is dan de in ISO 2631 voorgeschreven meetplaats, zie ook Bosman's rapportage over "Plaatsing opnemers" [126 en hoofdstuk 4]

In weegkrommes zoals voorgesteld door Coermann in 1965 (zie Figuur 3) en van later onderzoek door Dupuis (zie Figuur 19) komen bij ca. 1,5 Hz, - de "wandelfrequentie" -, inderdaad gebieden van verminderde gevoeligheid voor trillingen voor. Sommige onderzoekers interpreteren dit als een aanpassing van het lichaam voor deze "natuurlijk" voorkomende trilling. Anderen beschouwen het als het overgangsgebied tussen de gevoelige frequentie voor WBV bij ca. 5 Hz en de gevoelige frequentie voor kinetose bij ca 0,15 Hz (waarbij het versnellingsniveau veel lager ligt dan dat van WBV).

Hoe het zij, de interpretatie van Barton en Simic, - de versnellingen optredend bij actieve beweging van het lichaam toe te passen op passieve situaties -, lijkt zonder verder onderzoek niet van gevaar voor de gezondheid ontbloot.

Tenslotte moet nog worden gewezen op een publicatie van Griffin [123] die ook doorwerkt in zijn voorstellen voor de Long Term Revision van ISO 2631. In deze publicatie wordt een "Hazard Dose Value" gedefinieerd die gebaseerd is op de integraal van de vierde macht van de momentane versnelling. Griffin laat zien dat hiermee een 18% grotere gevoeligheid voor stochastische trillingen wordt ingecalculeerd (en stelt tussen de regels door vast, dat dat vermoedelijk niet genoeg is, wat dan weer in tegenstelling is met zijn eigen publicatie [31]). De 4e machtsregel werd

reeds bij de tijdafhankelijkheid genoemd, zie par. 2.6.3 en 2.6.4. Een van de belangrijkste overwegingen van Griffin is het verkrijgen van een compensatie voor pieken die als afzonderlijke verschijnselen over het random signaal voorkomen. Als voorbeeld noemde hij als mogelijke oorzaak verkeersdrempels. Er is geen enkele fysische of signaalbewerkings-basis voor deze keuze van een vierde macht. Uit dit gezichtspunt is er geen reden om af te wijken van gefundeerde methodes (dichtheidsspectra, RMS-waarden).

De interpretatie van kortdurende verschijnselen dient evenals die van de andere types trillingen op een gefundeerde methode te stoelen. We verwijzen hiervoor naar par. 2.7.4 en naar de volgende paragraaf 2.8.4.

2.8.4 Kortdurende trillingen [1,17,58,112,119]

Het optreden van schokken tijdens random trillingen wordt als zeer onaangenaam ervaren. Dupuis [17] illustreert dat met een voorbeeld waarin een stochastische trilling met $1,7 \text{ ms}^{-2}$ RMS (K-waarde = 27) als onaangenaam werd ervaren. Een kleinere stochastische trilling waarop schokken waren gesuperponeerd met $1,1 \text{ ms}^{-2}$ RMS (K-waarde = 18) werd als zeer onaangenaam ervaren. Schokken zullen in het bijzonder wanneer het gaat om gezondheidsaspecten een belangrijke rol bij de beoordeling spelen.

We zullen schokken afzonderlijk beschouwen, d.w.z. niet tezamen optredend met (stochastische) trillingen. In par. 2.7.4 is reeds duidelijk gemaakt dat schokken een afzonderlijke signaalbewerkingsmethode vereisen.

De literatuur op het gebied van schokinvloeden op de gezondheid bestrijkt hoofdzakelijk de militaire sector van de dynamica. Veel onderzoek is er namelijk uitgevoerd in verband met het verlaten van vliegtuigen met behulp van schietstoelen. Een belangrijk deel is gebaseerd op mechanische modellen van het menselijk lichaam en een aantal van de bestudeerde literatuuropgaven hebben met dit onderwerp te maken.

Een tamelijk breed overzicht werd door Von Gierke in 1964 gepubliceerd [119]. Daarin zijn vooral van belang de citaten van Payne⁶⁾ die een een-

6) Stech, E.L.; Payne P.R. (1964) "Dynamic Models of the Human Body AMRL-TDR: Wright-Patterson, AFB Ohio.

is wel
eig. ~~aanpak~~

voudig model bestaande uit 1 massa, 1 veer en 1 demper gebruikt voor de berekening van de beschadiging van de wervelkolom door een rechthoekig verlopende versnellingspuls. Hij komt voor een 50% waarschijnlijkheid van beschadiging op een snelheidsprong van ca. 5 m/s en een maximum versnelling van 100 ms^{-2} bij een pulsduur langer dan 50 ms. Volgens Griffin [112] neemt Glaister⁷⁾ een (verticale) snelheidsprong van 5 m/s en een maximum versnelling van 50 ms^{-2} bij een (rechthoekige) pulsduur langer dan 100 ms als tolerantiegrens voor zittende personen aan.

Allen [1] is op deze materie veel dieper ingegaan en heeft getracht een relatie te vinden tussen de hem beschikbare gegevens over letsel en schietstoelversnellingen. Hij maakt verder gebruik van het door Payne voorgestelde model en de maximum responsie daarvan op half sinusvormige pulsen en op transients. Deze methode werd gebruikt om verscheidene schokken per dag te relateren aan de Exposure Limit volgens ISO 2631.

Allen toonde met deze berekeningen [1] aan dat een crestfactor van 6 voor de ISO 2631 Exposure Limit niet altijd toelaatbaar is. Voor het bepalen van de invloed van schokken op de mens is zijn publicatie vooral leerzaam

a) omdat uitgegaan wordt van een correcte signaalbewerkingsmethode, n.l.

een vorm van schokresponsie-analyse,

b) omdat er een relatie tussen schokken en ISO 2631 voor trillingen wordt gelegd.

Allen noemt in het tweede deel van zijn publicatie vier elementen die van belang zijn bij het beoordelen van trillingen en schokken met behulp van bio-dynamische modellen:

- (i) de aard van de input
- (ii) de fysische eigenschappen van het analoge model
- (iii) de verschillende (output) responsies van het model
- (iv) de criteria (gezondheid, prestatievermogen, comfort) en in verband daarmee de aard van de output. Hij laat zien (zie Figuur 20) dat voor ieder criterium een eigen responsiekromme geldt. Met name voor een snelheidscriterium (dat komt overeen met vermogensdissipatie) geldt een kromme waarbij de inputversnelling symmetrisch verloopt om een lijn voor $f = f_0$ (kromme 1 in Figuur 20). Voor de maximale kracht geldt een kromme 2 die vooral onder de eigenfrequentie

⁷⁾ Glaister, D.H. (1978), Human tolerance to impact acceleration. Injury 9, 191-198.

daarvan afwijkt, maar voor hogere frequenties ook aan een lijn evenredig met f raakt. Een maximale veerindrukking verloopt voor lage frequenties als voor het criterium maximale kracht, maar voor hogere frequenties raakt de kromme 3 aan een lijn evenredig met f^2 . Tenslotte de absolute verplaatsing: onder f_0 evenredig met f^2 (vanwege de versnellingsinput) en boven f_0 evenredig met f^3 (kromme 4).

Allen komt dan tot de conclusie dat voor de verschillende beoordelingsgrenzen verschillende responsiegrootheden van belang zijn. Gaat het om veiligheid (gezondheidsbescherming, het voorkomen van pijn en letsel) dan zullen krachten in het systeem bepalend zijn. Bij prestatievermogen: de absolute of relatieve verplaatsing. Bij comfort: wellicht het snelheids- of het kracht criterium.

Allen's overwegingen zijn van zoveel belang dat een onderzoek met een aangepast schokresponsieprogramma, gebaseerd op de maximale kracht als criterium en met een demping van $\zeta = 0,22$, op stootvormige signalen gewenst lijkt⁸⁾.

Mertens e.a. [58] beschrijven onderzoek aan een uitgebreider model van het menselijk lichaam. Op grond van statische metingen komen zij tot niet-lineaire veer- en dempingskarakteristieken van de billen, de ruggegraat, de buik en borst. Zij gebruiken dit (niet-lineaire) model om aan te tonen dat de stijgtijd van de versnellingsimpuls een belangrijke rol speelt bij het berekenen van de responsie op schietstoelversnellingen. Het is vooral bij het optreden van grote stootvormige versnellingen bij zittende mensen belangrijk om aan het niet-lineaire gedrag van lichaamsdelen bij grote vervormingen aandacht te besteden.

2.8.5 ISO 2631

Samenvattend kunnen we concluderen:

Dat ISO 2631 voor harmonische trillingen goede richtlijnen geeft, als men rekening houdt met de individuele variabiliteit van de responsie

8) ζ is de relatieve demping, dat is de demping gedeeld door de kritische demping van het systeem. $\zeta = 0,22$ ontleend aan publicaties van Payne.

(gevoeligheidskromme).

Dat periodieke en samengestelde trillingen vermoedelijk het beste via een "overall weighting" kunnen worden beoordeeld ("weighing method" voorkeur boven "rating method").

→ Dat bij stochastische trillingen de RMS-waarde van het gewogen signaal vooral bij de frequenties beneden 10 Hz lagere grenzen zou vereisen dan ISO 2631 aangeeft.

→ Dat voor de bepaling van de invloed van stoten de methode van ISO 2631 principieel ongeschikt is en indien toch toegepast een onderschatting van de responsie op trillingen gecombineerd met stoten tot gevolg heeft. Met name bij de bepaling van de invloed van trillingen en schokken op de gezondheid kan dat in een onderzoek naar dosis-effect relaties tot verkeerde conclusies aanleiding geven.

2.9. PLAATS VAN DE OPNEMERS [52,83,85,102,113,116,124,126]

Krause e.a. [52] signaleerden dat er meetfouten kunnen optreden bij de toepassing van een zittingplaat met opnemers. Zij ontwikkelden daarvoor een eenvoudig model bestaande uit een één-massa-veer-dempersysteem voor de mens en een veer-dempercombinatie voor de zitting. Later voerden zij ook massa's voor de opnemer en de zittingplaat in. Op grond van experimentele resultaten bevalen zij de toepassing van anatomisch gevormde zitplaten aan.

Wasserman e.a. [102] gaven een uitgebreide beschrijving van de meettechniek die bij het meten aan grondverzetmachines gebruikt werd. Het (rubber) zitkussen met triaxopnemer en de "Bite Bar", - een opnemer bevestigd aan een staafje dat tussen de kiezen worden geklemd -, waren de belangrijkste hulpmiddelen voor het meten van lichaamstrillingen en van de responsie van het hoofd. Zij gaven geen nauwkeurigheid van de gebruikte methodes.

Pradko e.a. [113] gaven resultaten van gemeten seat-head transmissibility. Deze gegevens worden vergeleken met die van eigen TNO-IWECO onderzoek, zie [126] en hoofdstuk 4.5. en 4.6.

Barton e.a. [124] vermeldden de toepassing van zittingplaat en "Bite Bar" eveneens zonder nadere informatie over de nauwkeurigheid.

In de onderzochte literatuur wordt ook gesproken over het meten van hoekversnellingen. Uit onderzoek van Parson e.a. [83,85,124] blijkt na omwerking van de Figuren 11, 12 en 13 [83] dat een slingersnelheid (roll) van 0,2 rad/s RMS een gelijkwaardige responsie geeft als de verticale referentietrilling van $0,8 \text{ ms}^{-2}$ RMS bij 10 Hz. Voor de dompsnelheid (pitch) geldt een overeenkomstige waarde van 0,3 rad/s RMS en voor de giersnelheid (yaw) 0,5 rad/s RMS. Om een idee van de grootte te geven berekenen we de hoekamplitude ϕ voor slingeren m.b.v. de formule

$$\phi \cdot 2\pi f = 0,2 \sqrt{2} \text{ rad/s (amplitude)}$$

waaruit dan volgt

$$\phi = 2,5/f \text{ graden (f in Hz)}$$

De verticale referentietrilling van $0,8 \text{ ms}^{-2}$ RMS bij 10 Hz komt overeen met een Exposure Limit vlgs ISO 2631 voor 8 h.

De 8 h Exposure Limit voor horizontale trillingen (y-as) ligt bij 10 Hz op $2,26 \text{ ms}^{-2}$ RMS ofwel een snelheid van de trilling van $0,036 \text{ m/s}$ RMS.

Een rotatie om de x-as met een rotatiepunt $0,18 \text{ m}$ onder het zitvlak en een rotatiesnelheid van $0,2 \text{ rad/s}$ RMS geeft een horizontale (y-richting) beweging van $0,036 \text{ m/s}$ RMS.

Vergelijking van deze getallen met de bovenvermelde waarden leert ons dat alleen wanneer het draaipunt van de rotatietrilling veel dichterbij het zitvlak ligt dan de genoemde $0,18 \text{ m}$ een rotatiemeting noodzakelijk is.

Deze kan vermoedelijk het beste worden uitgevoerd met twee verticale versnellingsopnemers die op starre constructiedelen worden gemonteerd. De opnemers moeten in één vlak dwars op het voertuig worden gemonteerd. De afstand tussen de opnemers moet bekend zijn. Uit het verschil van de gecombineerde signalen en na deling door de afstand tussen de opnemers wordt de rolhoekversnelling verkregen.

LITWBV.

2.10 LIJST VAN GERAADPLEEGDE LITERATUUR

2.10.1 Bronindex

AA : Applied Acoustics
AE : Applied Ergonomics
AG : 1979 Agard-CP-253
AGA: 1975 Agard-CP-145
AP : Acta Physiol Pol
ATZ: ATZ Automobil Technische Zeitschrift Berlin
AV : Aviation, Space and Environmental Medicine
BT : Biomedizinische Technik
E : Ergonomics
EB : Ergonomische Berichte
H : Human Factors in Transport Research, Academic Press London
I : Industrial Health
IA : Ingenieur-Archiv
IC : The 6th International Congress on Acoustics, 1968
IE : Ingenieursbuero fuer Ergonomie, Munich
IN : Inter Noise
J : Journal of Sound & Vibration
JA : Journal Acoustic Soc Am
JE : Journal of Environmental Sciences
SH : Shock & Vibration Bulletin
SVD: Shock & Vibration Digest
T : Tijdschrift voor de Sociale Geneeskunde
TB : Tiefbau-BG
V : VDI-Z
Z : Zeitschrift fur die Gesamte Hygiene und ihre Grenzgebiete

JA 1980.

2.10.2 Literatuurlijst Whole-Body Vibration

- 1 ALLEN, G. Part 1: The use of a spinal analogue to compare human tolerance of repeated shocks with tolerance of vibration, Part 2: A critical look at biodynamic modelling in relation to specifications for human tolerance of vibration and shock (AG).
- * 2 ALLEN, G. Human reaction to vibration (JE, 1971).
- 3 ASHLEY, C. Equal annoyance contours for the effect of sinusoidal vibration on man (SH, 1970).
- * 4 BARNES, G.R., RANCE, B.H. The transmission of angular acceleration to the head in the seated human subject (AGA).
- 5 BARTON, J.C. Off-road machine operator vibration measurement methods (1982 SAE 810695).
- * 6 BELYTSCHKO, T. A three dimensional discrete element dynamic modal of the spine head and torso (AG).
- * 7 BOBBERT, G. Die Beurteilung von Schwingungs- und Stosseinwirkungen auf den Menschen in der Normung (V, 1973).
- 8 CLARKE, M.J. Human vibration response and ISO 2631 (H, 1980).
- 9 CLARKE, M.J. A study of the available evidence on duration effects on comfort and task proficiency under vibration (J, 1979).
- 10 CLEVENSON, S.A. Leatherwood, J.D. On the development of passenger vibration ride acceptance criteria (SH, 1973).
- 11 COHEN, H.H., WASSERMAN, D.E., HORNING, R.W. Human performance and transmissibility under sinusoidal and mixed vertical vibration (E, 1977).

- 12 DONATI, P., BAKIRZADE, J.P., DI-RENZO, N., ROURE, L. Localisation des zones de perception des vibrations mecaniques. Cas de vibrations sinusoidales, de basses frequences, transmises a l'ensemble du corps de sujets assis (1982 INRS rapport no. 1101/RE).
- 13 DONATI, P., GROSJEAN, A., MISTROT, P., ROURE, L. The subjective equivalence of sinusoidal and random vibration in sitting position (1981 INRS rapport no. 1065/RE).
- * 14 DUDEK, R.A., AYOUB, M.M., EL-NAWAWI, M.A. Optimal work-rest schedules under prolonged vibration (E, 1973).
- * 15 DUPUIS, H., HARTUNG, E. Zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens von Fahrersitzen fur Erdbaumaschinen nach ISO/DIS7096 (TB, 1981).
- 16 DUPUIS, H., Human exposure to WBV in military vehicles and evaluation by application of ISO/DIS2631 (AGA).
- 17 DUPUIS, H., KLEINHANSS, G. Schockversuche mit Testpuppen und ihre Beurteilung (V, 1973).
- 18 DUPUIS, H., HARTUNG, E., LOUDA, L. Vergleich regelloser Schwingungen eines Begrenztes Frequenzbereiches mit sinusformigen Schwingungen hinsichtlich der Einwirkung auf den Menschen (E, 1972).
- * 19 EWING, C.L., THOMAS, D.J., LUSTICK, L. Multiaxes dynamic response of the human head and neck to impact acceleration (AG).
- * 20 FLEMING, D.B., GRIFFIN, M.J. A study of the subjective equivalence of noise and whole-body vibration (J, 1975).
- 21 FOTHERGILL, L.C., GRIFFIN, M.J. The evaluation of discomfort produced by multiple frequency whole-body vibration (E, 1977).
- 22 FOTHERGILL, L.C., GRIFFIN, M.J. The use of an intensity matching technique to evaluate human response to whole-body vibration (E, 1977)
- * 23 FOTHERGILL, L.C., GRIFFIN, M.J. The subjective magnitude of WBV (E, 1977).

- 24 GRIFFIN, M.J., WHITHAM, E.M., PARSONS, K.C. Vibration and comfort.
1. Translational Seat Vibration (E, 1982).
- 25 GRIFFIN, M.J., WHITHAM, E.M. Time dependency of WBV discomfort (JA, 1980).
- 26 GRIFFIN, M.J., WHITHAM, E.M. Discomfort produced by impulsive WBV (JA, 1980).
- * 27 GRIFFIN, M.J. Biodynamic response to WBV (SVD, 1981).
- 28 GRIFFIN, M.J., LEWIS, C.H., PARSONS, K.C., WHITHAM, E.M. The biodynamic response of the human body and its application to standards (AG).
- 29 GRIFFIN, M.J., WHITHAM, E.M. Individual variability and its effect on subjective and biodynamic response to WBV (J, 1978).
- * 30 GRIFFIN, M.J., WHITHAM, E.M. Assessing the discomfort of dual-axis WBV (J, 1977).
- 31 GRIFFIN, M.J. Subjective equivalence of sinusoidal and random WBV (JA, 1976).
- 32 GRIFFIN, M.J., WHITHAM, E.M. Duration of WBV exposure: its effect on comfort (J, 1976).
- * 33 GRUBER, G.J. Relationship between WBV and morbidity pattern among interstate truck drivers (1976).
- * 34 HALES, F.D. Ride and handling dynamics of road vehicles (a review of recent literature) (SVD, 1978).
- 35 HANSSON, J.E., WIKSTROM, B.O. Comparison of some technical methods for the evaluation of WBV (E, 1981).
- 36 HANSSON, J.E. Gezichtspunten met betrekking tot de toepassing van de ISO-norm op de Zweedse situatie (voordracht voor de Zweedse Academie voor Ingenieurswetenschappen, 1980) (vertaling van Bert van Hattem).

- * 37 HANSSON, J.E., WIKSTROM, B.O. Vergelijking van een aantal technische methoden voor de beoordeling van trillingen van het hele lichaam (Brochures Arbeid en Gezondheid 1979:23, Zweedse arbeidsinspectie) (vertaling van Bert van Hattem).
- * 38 HARRAY, C.B., SCHOENBERGER, R.W. Effect of body supination angle on subjective response to WBV (AV, 1981).
- * 39 HEIDE, R., SEIDEL, H. Folgen langzeitiger beruflicher Ganzkörper-vibrationsexposition (Kurzfassung einer Literaturstudie) (Z, 1978).
- * 40 ILGMANN, W., Ergonomic study of the influence of rotary vibrations (IE, 1979).
- * 41 ISO Draft Proposal: Mechanical transmissibility of the human body 1981 (ISO/TC 108/SC 4N).
- * 42 ISO Second Draft Proposal: Earth moving machinery-operator seat-measurement of transmitted vibration. 1979 (ISO/TC 108/SC 4/WG 2 N 78).
- 43 ISO Draft Amendment ISO 2631/DAM1: Guide for the evaluation of human exposure to WBV. 1980 (ISO 2631/DAM1).
- 44 ISO Guide for the evaluation of human exposure to WBV. 1978 (ISO 2631).
- * 45 ISO Draft Proposal on standard biodynamic co-ordinate systems. 1977 (ISO/TC 108/SC 4/WG1).
- * 46 JANSEN, D.J. De medische effecten van mechanische trillingen (1981).
- * 47 JONES, A.J., SAUNDERS, D.J. A scale of human reaction to WBV vertical sinusoidal vibration (J, 1972).
- * 48 JONES, A.J., SAUNDERS, D.J. Equal comfort contours for WBV vertical pulsed sinusoidal vibration (J, 1972).

- * 49 KAZARIAN, L.E., VON GIERKE, H.E. The validation of biodynamic models (AG).
- * 50 KING, A.I., NAKHLA, S.S., MITAL, N.K. Simulation of head and neck response to -Gx and +Gz Impacts (AG).
- * 51 KLEINHANSS, G., PIEKARSKI, C. Bewertung von Ganzkörperschwingungen hinsichtlich ihrer Wirkung beim sitzenden oder stehenden Menschen (BT, 1982).
- 52 KRAUSE, P., PANZKE, K.J. Probleme der Ankopplung der Schwingungsaufnehmer bei der Messung von Ganskorpervibrationen (EB, 1975).
- * 53 LORENZ, H., VOGT, M.D. Effects of transient vibration on human safety and performance (AGA).
- * 54 MANOHAR, M., PANJABI, D. A three dimensional mathematical analogue of the spine structure, a comprehensive approach (AG).
- * 55 MEIER-DORNBERG, K.E. Reference parameters for shock inputs and shock tolerance limits (AG).
- * 56 MEIER-DORNBERG, K.E. Kenngrößen zur Beschreibung von Schockwirkungen und Schockverträglichkeitsgrenzen (V, 1973).
- * 57 MEISTER, F.J. Zur Vereinheitlichung der dynamischen Schwingungsbewertung und ihrer Zuordnung zu den Stevensschen Powerfunktionen (V, 1980).
- 58 MERTENS, H., VOGT, L. The response of a realistic computer model for sitting humans to different types of shocks (AG).
- * 59 MIWA, T. Guides for human exposure to WBV (IN, 1975).
- * 60 MIWA, T. Mechanical impedance of human body in various postures (I, 1975).
- * 61 MIWA, T., YONEKAWA, Y. Evaluation methods for vibration (AA, 1974).
- * 62 MIWA, T., YONEKAWA, Y. Problems concerning mounting of pickups for vibration level meter (I, 1971).

- * 63 MIWA, T., YONEKAWA, Y. Evaluation methods for vibration effect.
Part 10. Measurement of vibration attenuation. Effect of cushions (I, 1971).
- * 64 MIWA, T., YONEKAWA, Y. Evaluation methods for vibration effect.
Part 9. Response to sinusoidal vibration at lying posture (I, 1969).
- 65 MIWA, T. Evaluation methods for vibration effect.
Part 8. The vibration greatness of random waves (I, 1969).
- * 66 MIWA, T. Evaluation methods for vibration effect.
Part 7. The vibration greatness of the pulses (I, 1968).
- * 67 MIWA, T. Evaluation methods for vibration effect.
Part 6. Measurement of unpleasant and tolerance limit levels for sinusoidal vibrations (I, 1968).
- * 68 MIWA, T. Evaluation methods for vibration effect.
Part 5. Calculation method of vibration greatness level on compound vibrations (I, 1968).
- * 69 MIWA, T. Evaluation methods for vibration effect.
Part 4. Measurement of vibration greatness for whole body and hand in vertical and horizontal vibrations (I, 1968).
- * 70 MIWA, T. Evaluation methods for vibration effect.
Part 2. Measurement of equal sensation level for whole body between vertical and horizontal sinusoidal vibration (I, 1967).
- * 71 MIWA, T. Evaluation methods for vibration effect.
Part 1. Measurement of threshold and equal sensation contours of whole body for vertical and horizontal vibrations (I, 1967).
- * 72 MIWA, T., YONEKAWA, Y. Psychological scales for evaluation of vibration (IC).
- * 73 MULLER, P.C., POPP, K., SCHIEHLEN, W.O. Berechnungsverfahren fur stochastische Fahrzeugschwingungen (IA, 1980).

- * 74 NAUGHTON, T.J., PEPLER, R.D. Truck ride quality and drivers health: an assessment (1981 SAE 810044).

- 75 OBORNE, D.J., BOARER, P.A. Subjective response to WBV, the effects of posture (E, 1982).

- 76 OBORNE, D.J., BOARER, P.A. Variability in human response to WBV. The effect of instruction (E, 1982).

- 77 OBORNE, D.J., BOARER, P., HEATH, T.O. Variations in response to WBV. Intensity dependent effects (E, 1981).

- 78 OBORNE, D.J., HEATH, T.O., BOARER, P. Variation in human response to WBV (E, 1981).

- 79 OBORNE, D.J. The stability of equal sensation contours for WBV (E, 1978).

- 80 OBORNE, D.J., HUMPHREYS, D.A. Individual variability in human response to whole-body vibration (E, 1976).

- * 81 OBORNE, D.J. A critical assessment of studies relating WBV to passenger comfort (E, 1976).

- * 82 PARSONS, K.C., GRIFFIN, M.J., WHITHAM, E.M. Vibration and comfort. III. Translational vibration of the feet and back (E, 1982).

- 83 PARSONS, K.C., GRIFFIN, M.J. Vibration and comfort. II. Rotational seat vibration (E, 1982).

- 84 PARSONS, K.C., WHITHAM, E.M., GRIFFIN, M.J. Six axes vehicle vibration and its effects on comfort (E, 1979).

- 85 PARSONS, K.C., GRIFFIN, M.J. The effect of the position of the axis of rotation on the discomfort caused by WBV roll and pitch vibrations of seated persons (J, 1978).

- * 86 PARSONS, K.C., GRIFFIN, M.J. The effect of rotational vibration in roll and pitch axes on the discomfort of seated subjects (E, 1978).

- * 87 PASMOOLIJ, C.K., V.D. GRINTEN, M.P. Cabines van grondverzetmachines. Een ergonomische veldstudie en constructieve aanbevelingen (1982, rapport NIPG-TNO).

- * 88 PEARCY, M.J., EVANS, J.H. A failure criterion for human, vertebral, cancellous bone (AG).

- 89 RAO, B.K.N. Bio-dynamic response of human head during WBV conditions (SH, 1982).

- * 90 RAO, B.K.N. Some studies on the capabilities and limitations of human to judge frequency of vibration applied to whole-body (J, 1976).

- 91 RICHARDS, L.G., JACOBSON, I.D., BARBER, R.W., PEPLER, R.C. Ride quality evaluation in ground based vehicles: passenger comfort models for buses and trains (E, 1978).

- 92 RUBBLACK, H. Wirkungen mechanischer Schwingungen auf den Organismus (Z, 1978).

- * 93 SCHEIBE, W. Beurteilung von Belastung, Aktivitat und Beanspruchung des menschen bei Kontinuierlicher und unterbrochener Exposition mit vertikaler Fahrzeugschwingungen in Simulations- und Feldexperimenten (V, 1979).

- * 94 SCHOENBERGER, R.W. Psychophysical assessment of angular vibration: comparison of vertical and roll vibration (AV, 1979).

- * 95 SCHOENBERGER, R.W. Research related to the expansion and improvement of human vibration exposure criteria (SH, 1979).

- 96 SCHOENBERGER, R.W. Intensity judgement of non sinusoidal vibrations: support for the ISO weighting method (AV, 1978).

- 97 SEIDEL, H., BASTEK, R., BRAUER, D., BUCHHOLZ, C., MEISTER, A., METZ, A.M., ROTHE, R. On human response to prolonged repeated WBV (E, 1980).
- * 98 STENSCHKE, R. Abhangigkeit des subjectiv empfundete Fahrkomforts und der dynamischen Radlasten von Strassenunebenkeiten (V, 1978).
- * 99 STURGES, D.V., BADGER, D.W., SLARVE, R.N., WASSERMAN, D.E. Laboratory studies on chronic effects of vibration exposure (AGA).
- * 100 VOY, C. Beitrag zur optimierung des Fahrkomforts von Kraftfahrzeugen (ATZ, 1979).
- * 101 VOY, C. Die Simulation vertikaler Fahrzeugschwingungen (V, 1977).
- 102 WASSERMAN, D.E., ASBURRY, W.C., DOYLE, T.E. Human response to vibration and shock (SH, 1979).
- * 103 WISS, J.F., PARMELEE, R.A. Human perception of transient vibration (ASCE Journal of the Structural Division, 1974).
- * 104 YONEKAWA, Y. Evaluation of whole body transient vibration by fingertip plethysmogram (I, 1978).
- * 105 YONEKAWA, Y. Emotional responses to one shot shock motions (I, 1977).
- * 106 ZAGORSKI, J., JAKUBOWSKI, R., SOLECKI, L., SADEO, A., KASPEREK, W. Studies on the transmission of vibrations in human organism exposed to lower-freq whole-body vibration (AP, 1976).
- * 107 Vibratiebelasting (T, 1982). Auteur onbekend.
- * 108 Franklin Research Center. Biological effects of exposure: whole body vibration (Rough Draft) (NIOSH, 1980).
- * 109 MEIER-DORNBERG, K.E. Schockvertraglichkeit des Menschen-Beurteilungskriterien und Grenzwerte (V, 1973).

- * 110 DUPUIS, H. Vibration exposure of sitting or lying persons in motor vehicles and ambulances (H, volume 2).
- * 111 LINDER, G.S. Mechanical vibration effects on human beings. (Aerospace Medicine 1962).
- 112 OBORNE, D.J. Whole-body vibration and international standard ISO 2631: a critique (Human Factors, 1983).
- 113 PRADKO, F., LEE, R., KALUZA, V. Theory of human vibration response. (ASME, 66-WA/BHF-15, 1966).
- * 114 TROUP, J.D.G., Driver's back pain and its prevention. A review of the postural, vibratory and muscular factors, together with the problem of transmitted road-shock (AE, 1978).
- * 115 BRYCE, W.D. A human criterion for the acceptance of transverse seat vibration (J, 1966).
- 116 GRIFFIN, M.J., PARSONS, K.C., WHITHAM, E.M. Vibration and comfort. 4. Application of experimental results (E, 1982).
- 117 BOULANGER, MISTROT, POIROT, ROURE. Evaluation of the amount of exposure to vibrations transmitted to the whole body. Case of vibrations due to a loader mounted on caterpillar tracks, a fork-lift truck and a hydraulic excavator (RAE Library Translation of: INRS report no. 245/RE, 1976).
- 118 WHITHAM, E.M., GRIFFIN, M.J. The effects of vibration frequency and direction on the location of areas of discomfort caused by whole-body vibration (E, 1978).
- 119 VON GIERKE, H.E. Biodynamic response of the human body (Appl. Mech. Rev. Vol. 17 nr. 12, 1964).
- 120 VDI Richtlinie 2057. Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen (VDI, 1963).
- * 121 NF. Guide pour l'évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps (NFE 90-401, 1980).

- 122 REIHER, H., MEISTER, F.J. Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschuetterungen (Forschung a.d. Gebiete des Ingenieurswesens Vol. 2, Nr. 12, 1931).
- 123 GRIFFIN, M.J. The definition of hazard dose values for whole-body vibration and shock (Paper presented at the U.K. informal group meeting on human response to vibration, London, 1982).
- 124 BARTON, J.C., HEFNER, R.E. Whole-body vibration levels: a realistic baseline for standards (SAE paper 760415, 1976).
- 125 FRANCKEN, A.J., BOSMAN, B. Literatuurstudie handarmtrillingen (IWECO-rapport 5075411-84-1, 1983).
- 126 BOSMAN, B. Trillingen op de arbeidsplaats - Meettechniek - Plaatsing opnemers (IWECO-rapport 5032022-84-2, 1984).

* Literatuur waarnaar in deze studie niet wordt verwezen

2.10.3 Auteursindex

ALLEN, G.	(1,2)
ASBURY, W.C.	(102)
ASHLEY, C.	(3)
AYOUB, M.M.	(14)
BADGER, D.W.	(99)
BAKIRZADE, J.P.	(12)
BARBER, R.W.	(91)
BARNES, G.R.	(4)
BARTON, J.C.	(5,124)
BASTEK, R.	(97)
BELYTSCHKO, T.	(6)
BOARER, P.A.	(75,76,77,78)
BOSMAN, B.	(125,126)
BOULANGER	(117)
BRAUER, D.	(97)
BRYCE, W.D.	(115)
BUCHHOLZ, C.	(97)
BOBBERT, G.	(7)
CLARKE, M.J.	(8,9)
CLEVENSON, S.A.	(10)
COHEN, H.H.	(11)
DI-RENZO, N.	(12)
DONATI, P.	(12,13)
DOYLE, T.E.	(102)
DUDEK, R.A.	(14)
DUPUIS, H.	(15,16,17,18,110)
EL-NAWAWI, M.A.	(14)
EVANS, J.H.	(88)
EWING, C.L.	(19)
FRANCKEN, A.J.	(125)
Franklin Research Center (NIOSH)	(109)
FLEMING, D.B.	(20)
FOTHERGILL, L.C.	(21,22,23)
VON GIERKE, H.E.	(49,119)
GRIFFIN, M.J.	(20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32, 82,83,84,85,86,116,118,123)
GRINTEN, M.P. v.d.	(87)

GROSJEAN, A.	(13)
GRUBER, G.J.	(33)
HALES, F.D.	(34)
HANSSON, J.E.	(35,36,37)
HARRAY, C.B.	(38)
HARTUNG, E.	(15,18)
HEATH, T.O.	(77,78)
HEFNER, R.E.	(124)
HEIDE, R.	(39)
HORNUNG, R.W.	(11)
HUMPHREYS, D.A.	(80)
ILGMANN, W.	(40)
ISO	(41,42,43,44,45)
JACOBSON, I.D.	(91)
JAKUBOWSKI, R.	(106)
JANSEN, D.J.	(46)
JONES, A.J.	(47,48)
KALUZA, V.	(113)
KASPEREK, W.	(106)
KAZARIAN, K.	(49)
KING, A.I.	(50)
KLEINHANSS, G.	(17,51)
KRAUSE, P.	(52)
LEATHERWOOD, J.D.	(10)
LEE, R.	(113)
LEWIS, C.H.	(28)
LINDER, G.S.	(111)
LORENZ, H.	(53)
LOUDA, L.	(18)
LUSTICK, L.	(19)
MANDHAR, M.	(54)
MEIER-DORNBERG, K.E.	(55,56,109)
MEISTER, F.J.	(57,97,122)
METZ, A.M.	(97)
MERTENS, H.	(58)
MISTROT, P.	(13,117)
MITAL, N.K.	(50)
MIWA, T.	(59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71, 72)

MULLER, P.C.	(73)
NAKHLA, S.S.	(50)
NAUGHTON, T.J.	(74)
OBORNE, D.J.	(75,76,77,78,79,80,81,112)
PANJABI, D.	(54)
PANZKE, K.J.	(52)
PARMELEE, R.A.	(103)
PARSONS, K.C.	(24,28,82,83,84,85,86,116)
PASMOOIJ, C.K.	(87)
PEARCY, M.J.	(88)
PEPLER, R.D.	(74,91)
PIEKARSKI, C.	(51)
POIROT	(117)
POPP, K.	(73)
PRADKO, F.	(113)
RANCE, B.H.	(4)
RAO, B.K.N.	(89,90)
REIHER, H.	(122)
RICHARDS, L.G.	(91)
ROTHE, R.	(97)
ROURE, L.	(12,13,117)
RUBLACK, H.	(92)
SADEO, A.	(106)
SAUNDERS, D.J.	(47,48)
SCHEIBE, W.	(93)
SCHIEHLEN, W.O.	(73)
SCHOENBERGER, R.W.	(38,94,95,96)
SEIDEL, H.	(39,97)
SLARVE, R.N.	(99)
SOLECKI, L.	(106)
STENSCHKE, R.	(98)
STURGES, D.V.	(99)
THOMAS, D.J.	(19)
TROUP, J.D.G.	(114)
VOGT, L.	(58)
VOGT, M.D.	(53)
VOY, C.	(100,101)
WASSERMAN, D.E.	(11,99,102)
WHITHAM, E.M.	(24,25,26,28,29,30,32,82,84,116,118)

WIKSTROM, B.O.

(35,37)

WISS, J.F.

(103)

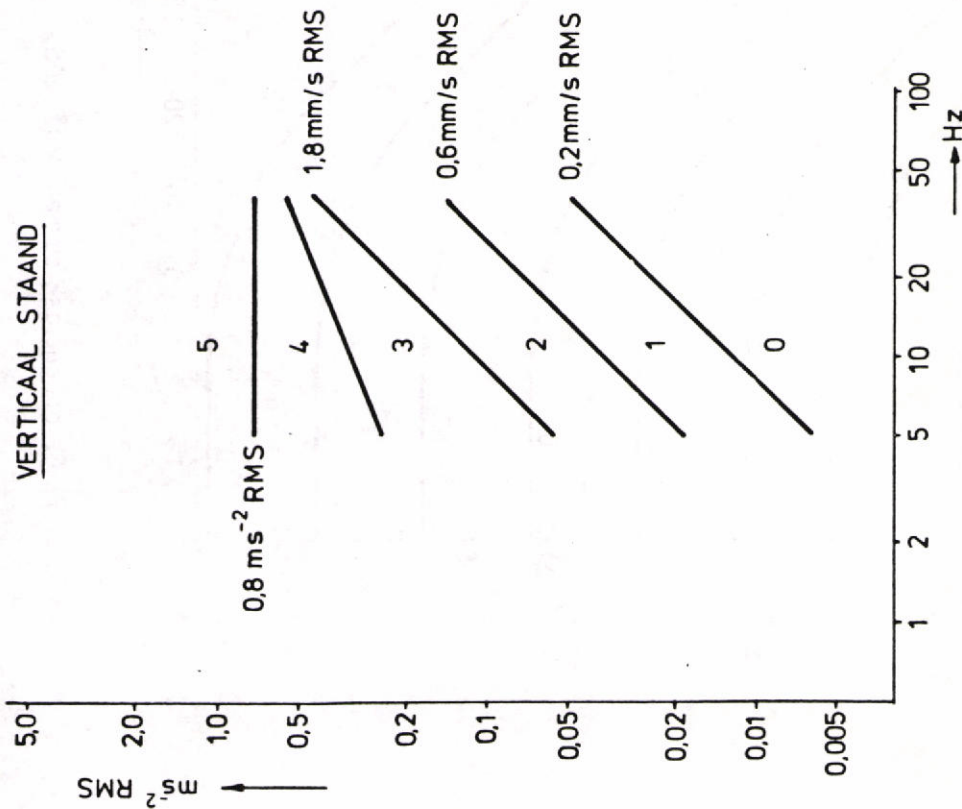
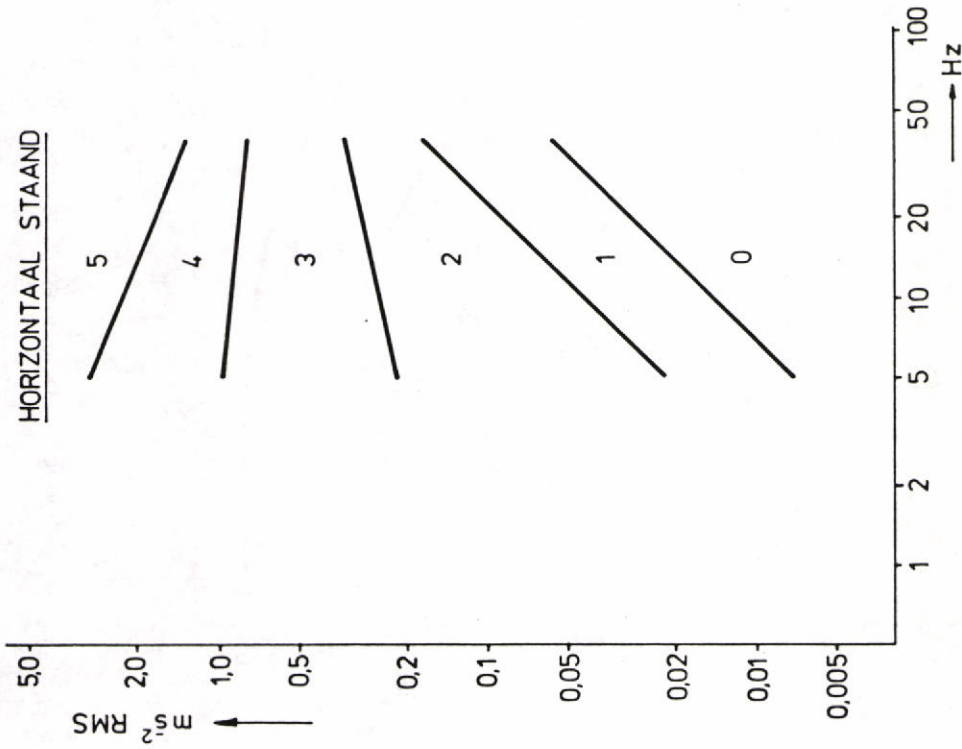
YONEKAWA, Y.

(61,62,63,64,72,104,105)

ZAGORSKI, J.

(106)

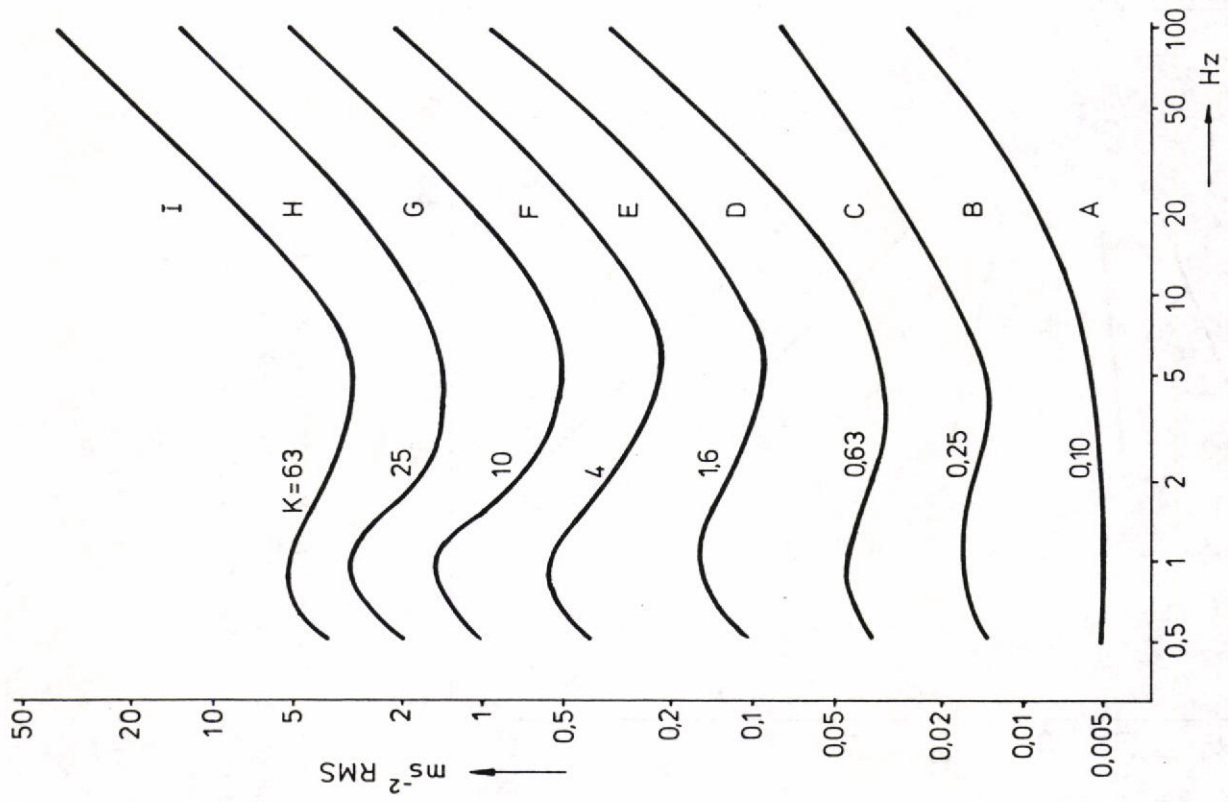
2.11. Illustraties



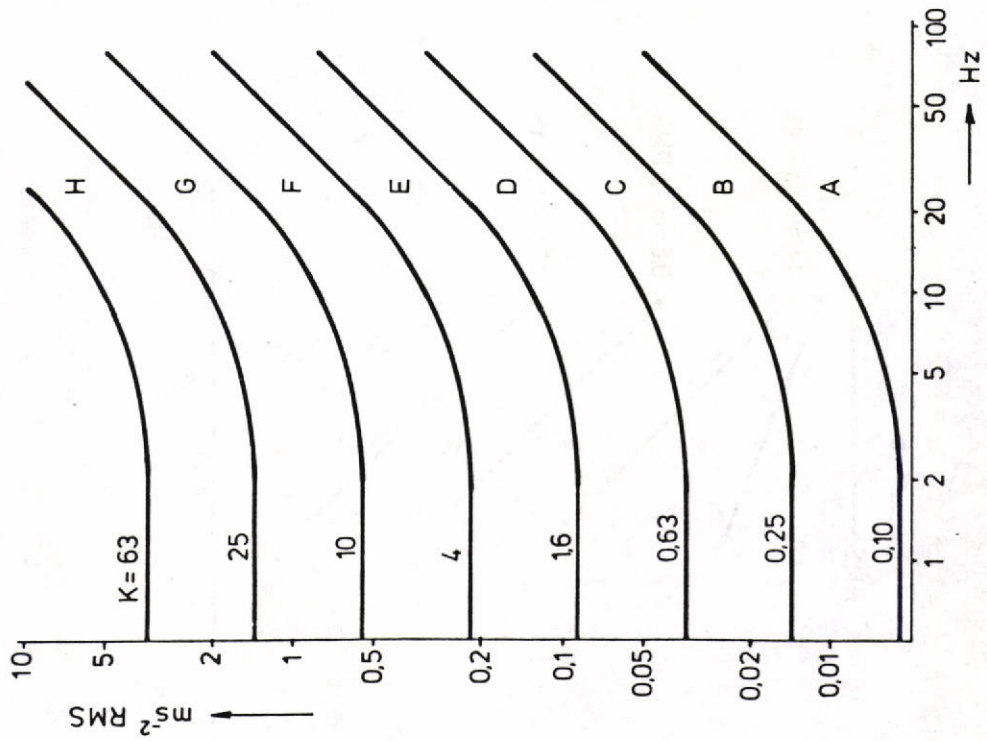
5	Ondragelijk
4	Onaangenaam
3	Hinderlijk
2	Goed waarneembaar
1	Juist waarneembaar
0	Niet waarneembaar

Opmerking: Om vergelijking met volgende figuren te vergemakkelijken zijn dezelfde schalen gekozen en zijn de gegevens van Reiher en Meister omgewerkt naar ms⁻² RMS

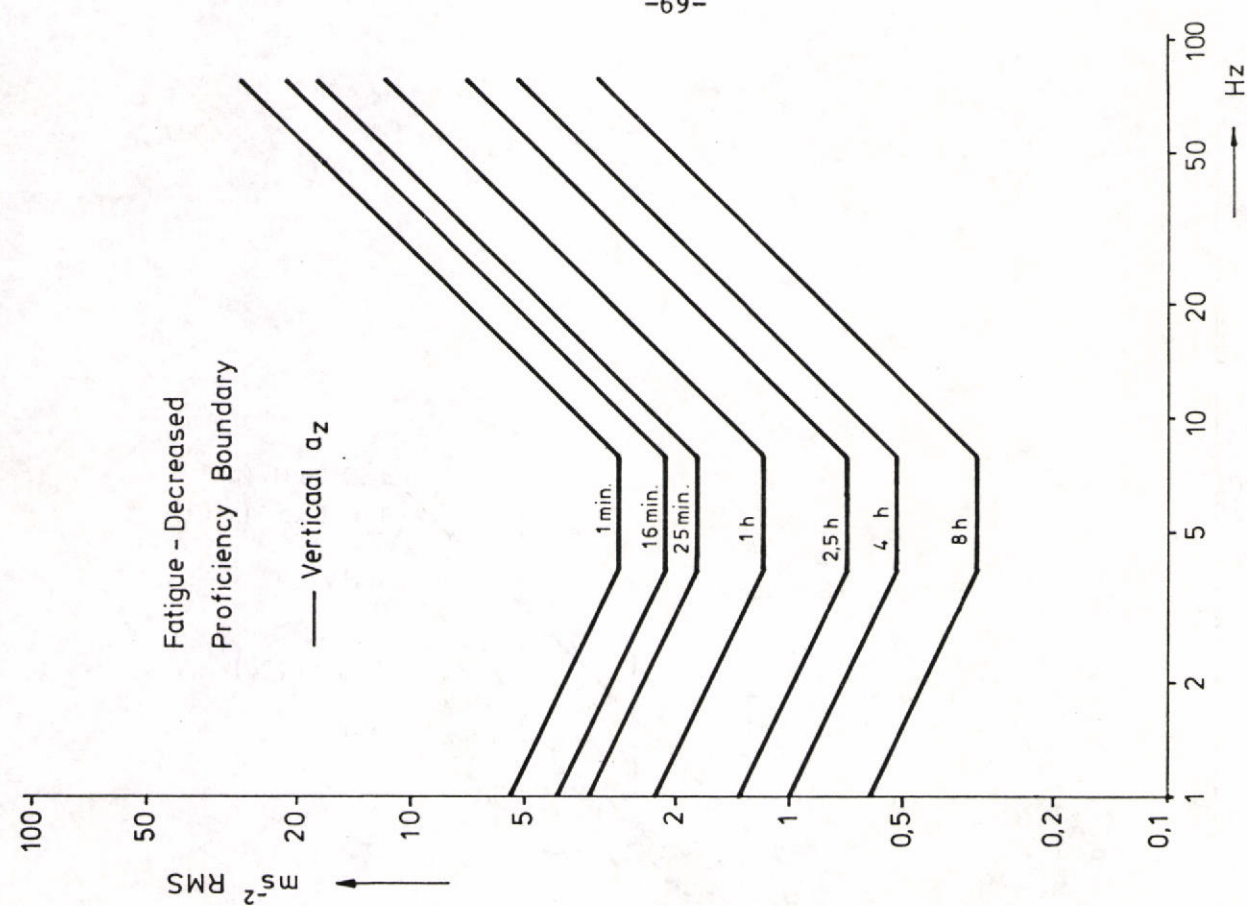
Figuur 1. Indeling van trillingshinder volgens Reiher en Meister (1931) [122]



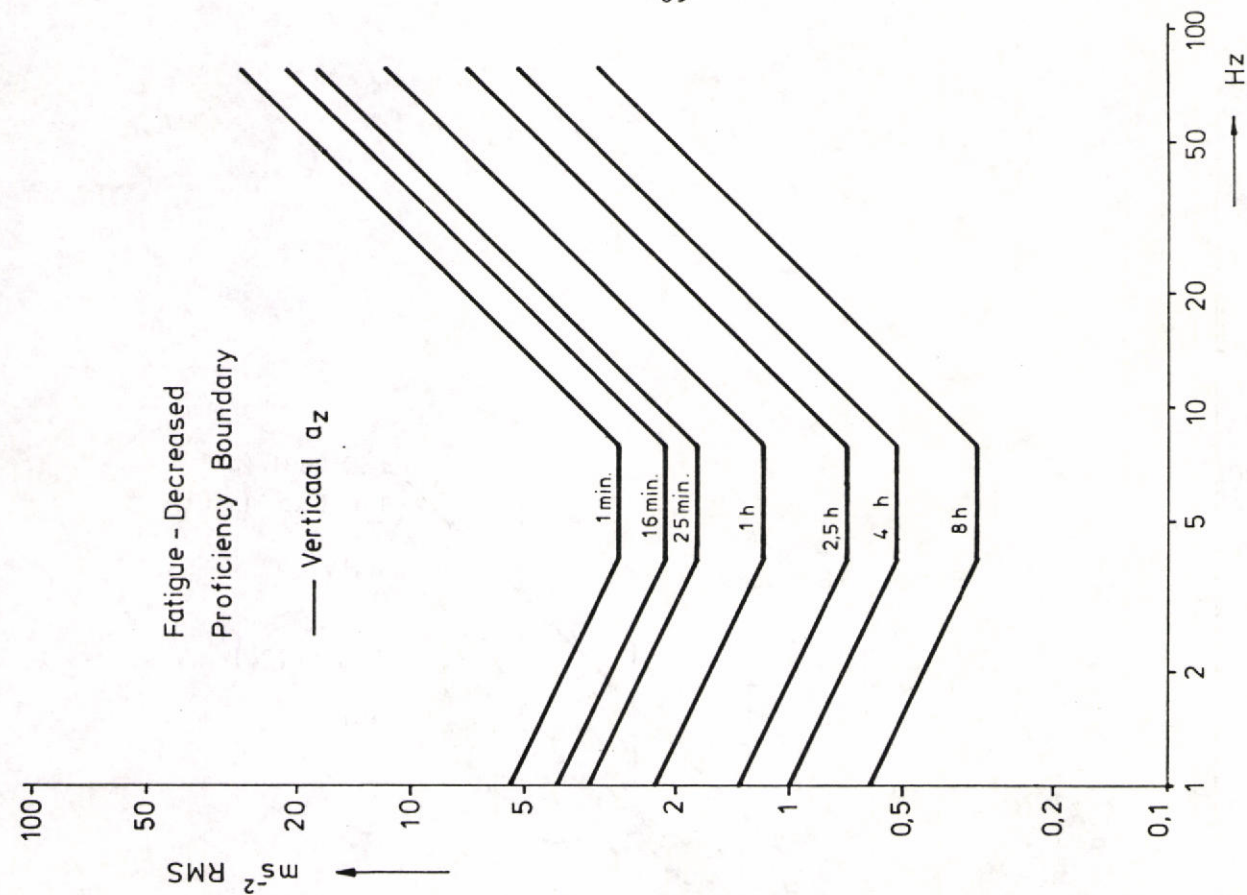
Figuur 3. Gevoeligheidskrommen Coerman 1965



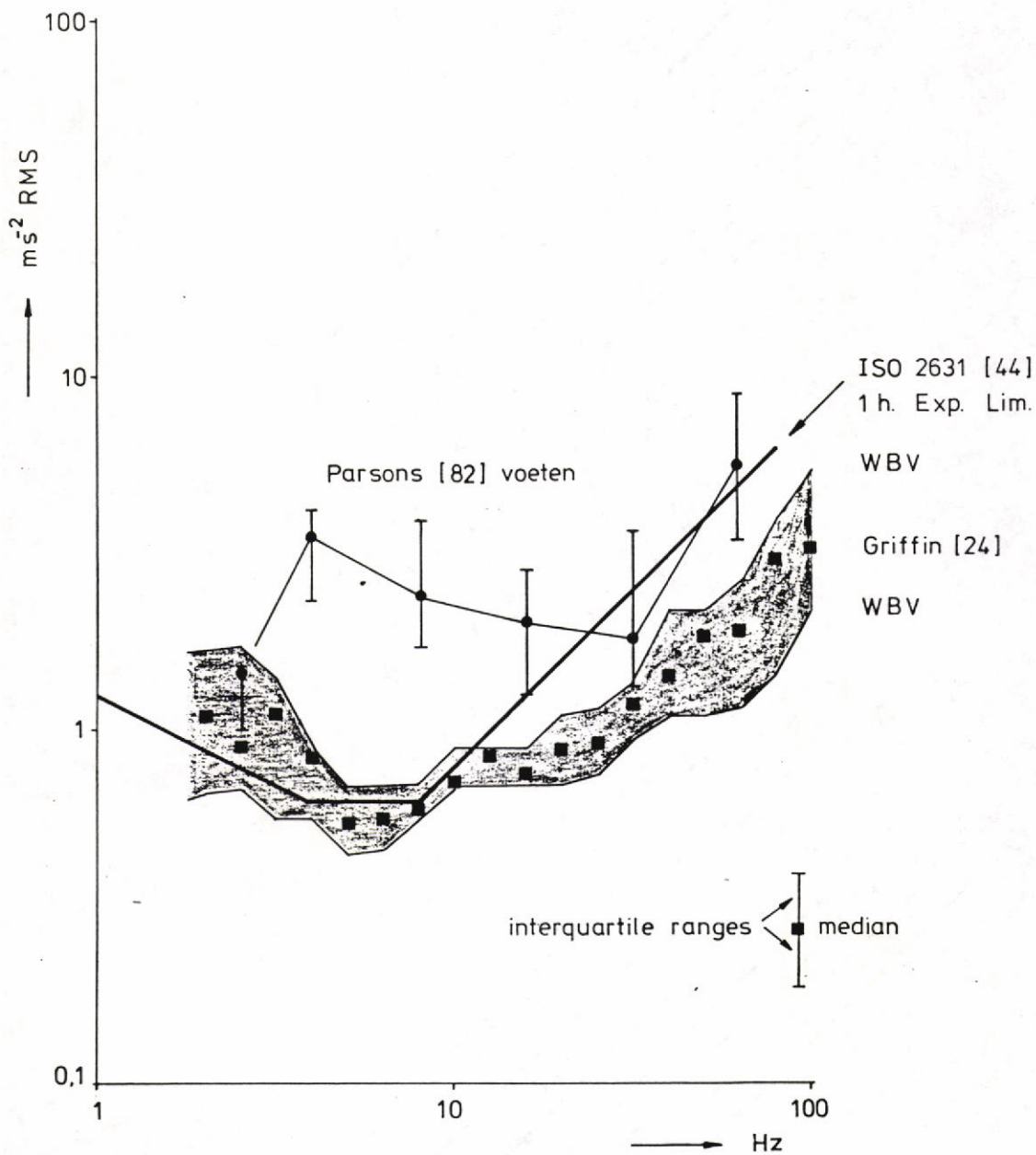
Figuur 2. Gevoeligheidskrommen VDI 2057



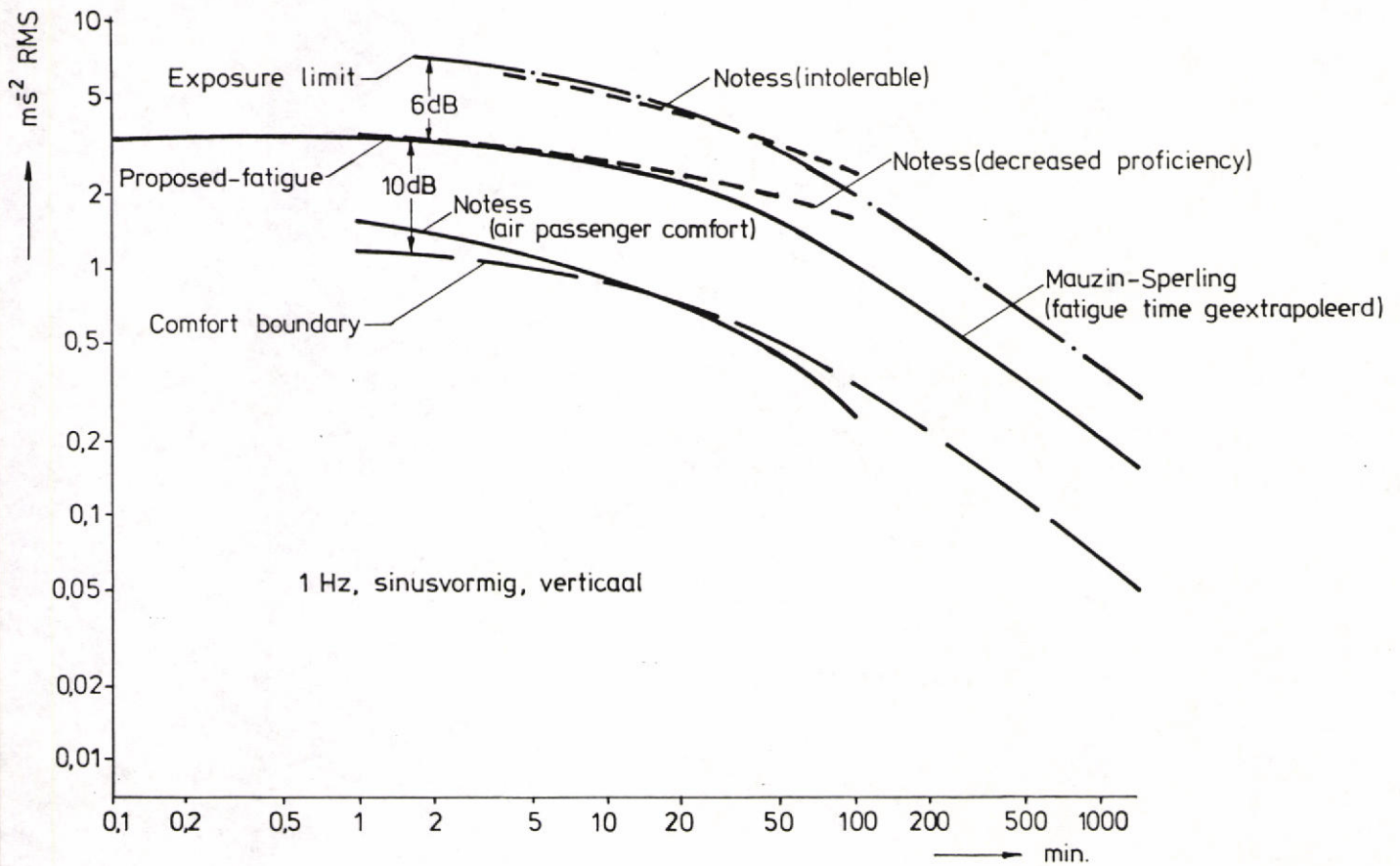
Figuur 4. Weegkrommes volgens voorstel 108/7N7 (1966)



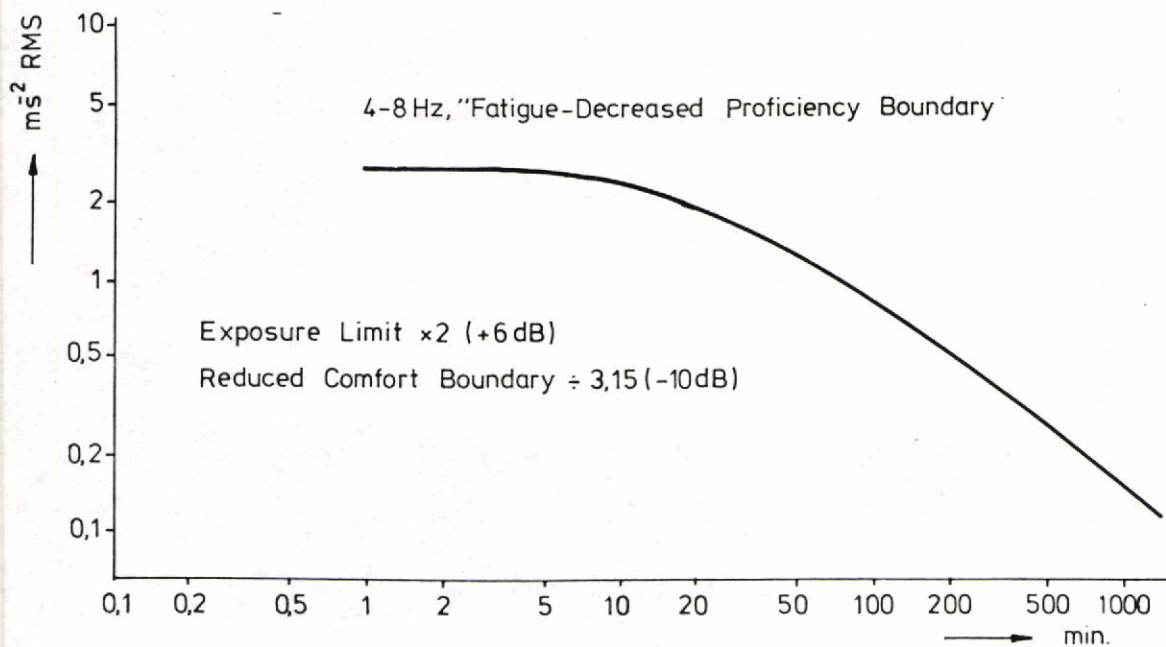
Figuur 5. Weegkrommes volgens voorstel 108/7N36 (1970)



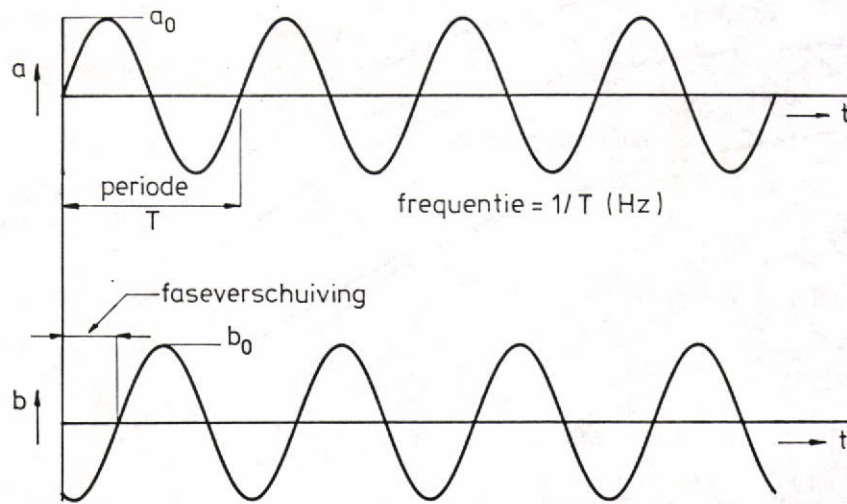
Figuur 6. Discrepantie tussen ISO 2631 en Griffin's werk



Figuur 7. Oorspronkelijke voorstel tijdafhankelijkheid WBV (ISO/TC/ WG 7N6)



Figuur 8. Tijdafhankelijkheid volgens ISO 2631



Figuur 9. Harmonische trillingen

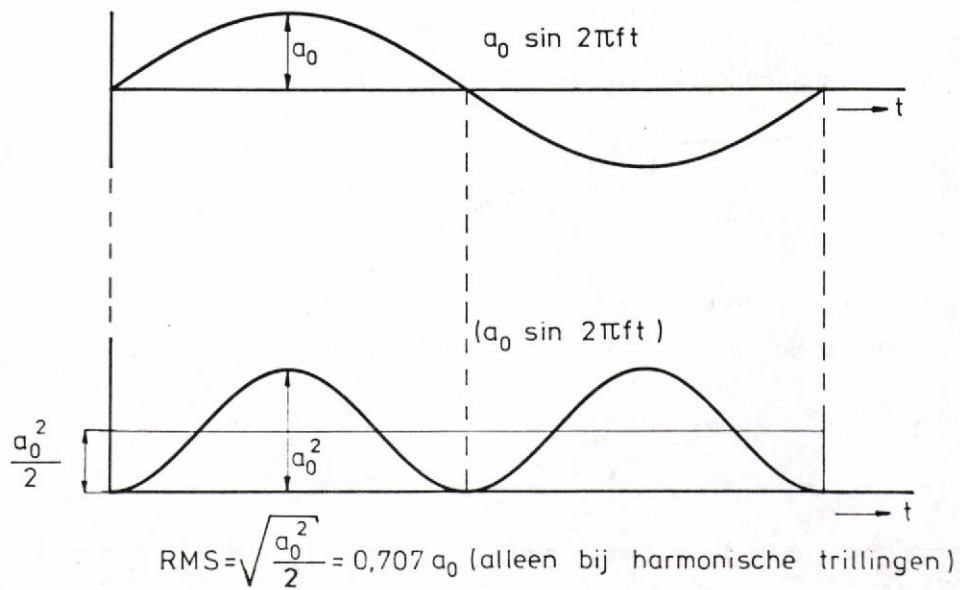
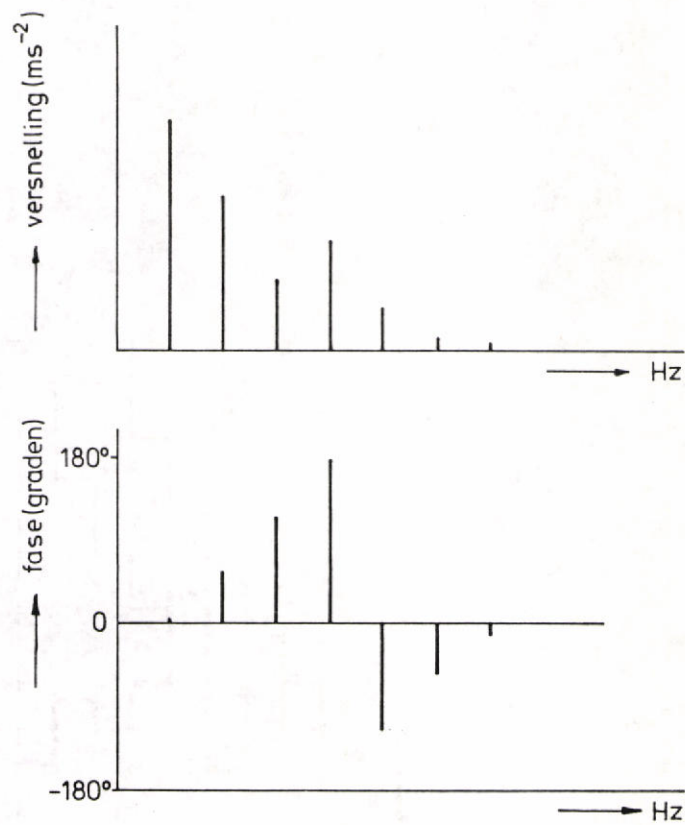
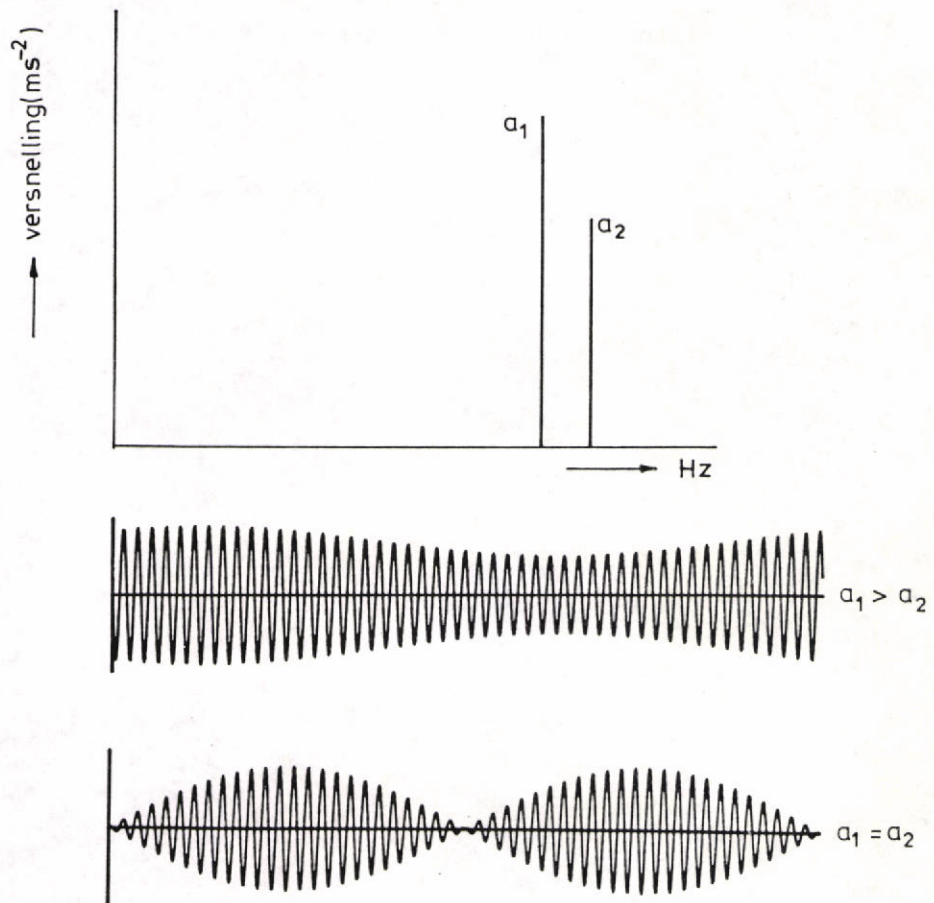


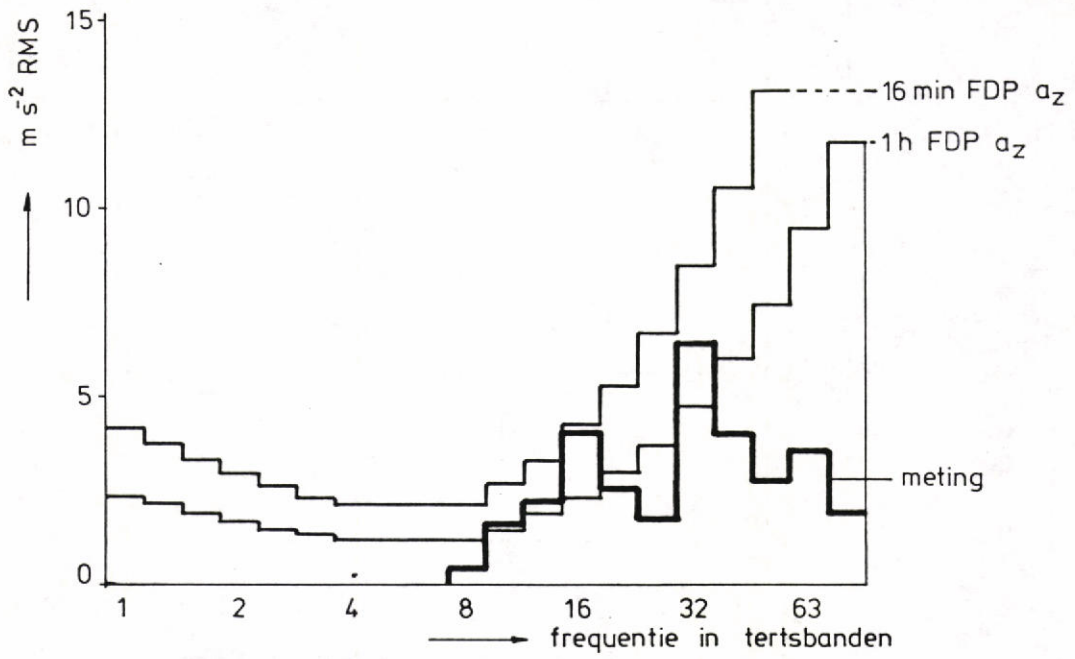
Fig. 10. RMS bepaling



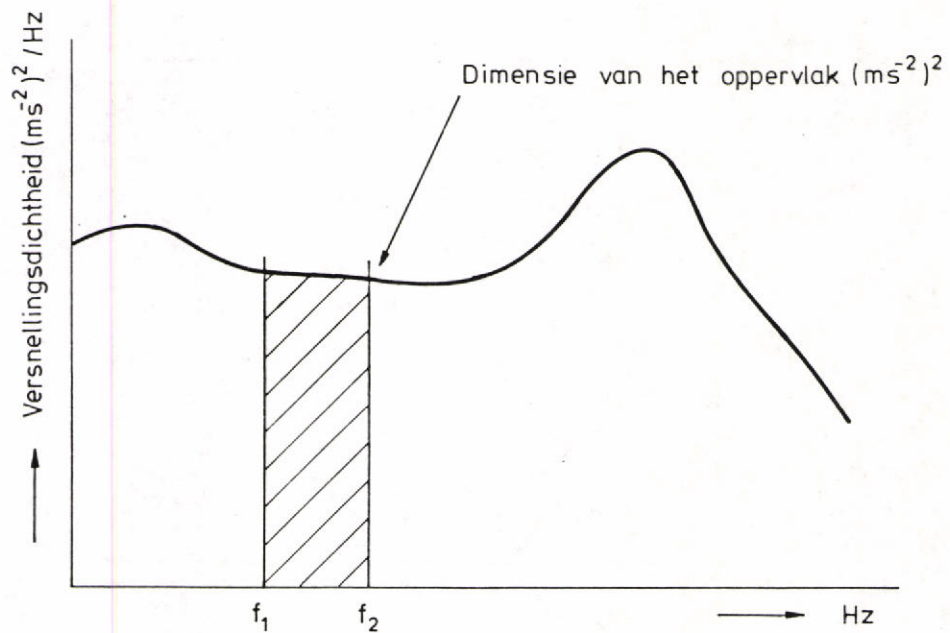
Figuur 11. Spectrum van een periodieke trilling



Figuur 12. Spectrum van een zweeping

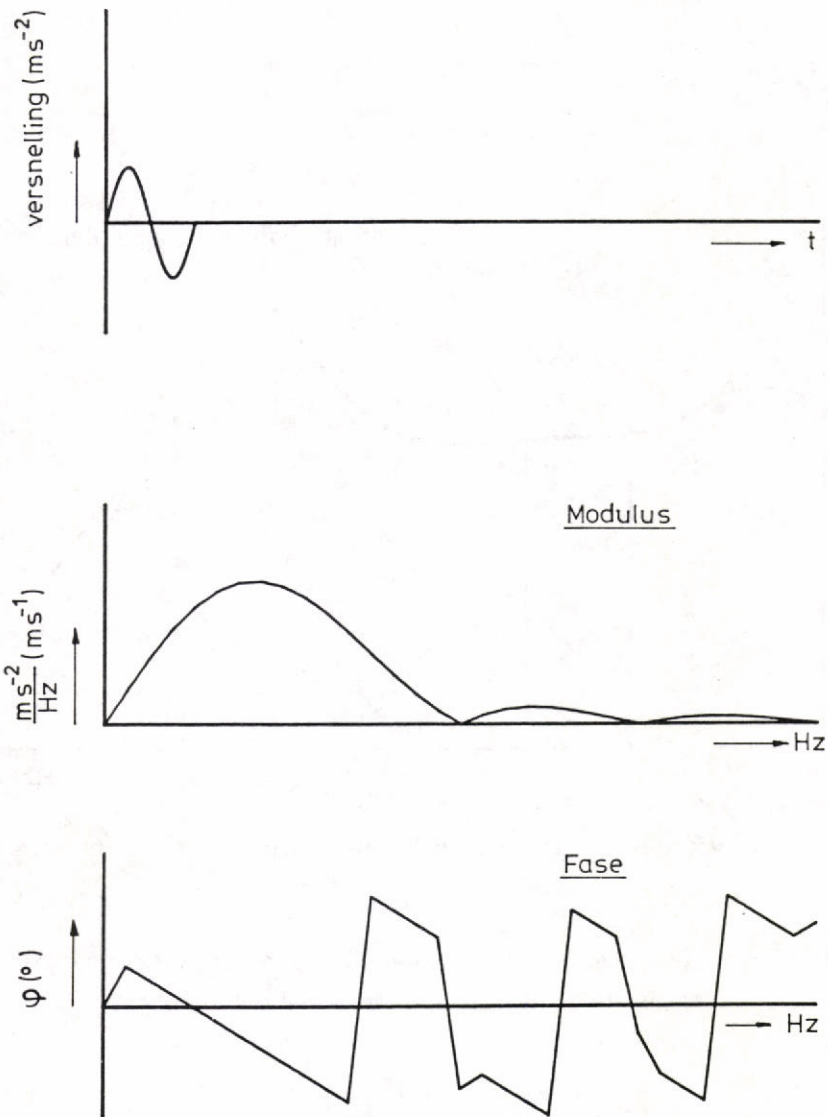


Figuur 13. Tertsband meting vergeleken met FDP grenzen voor 1h en voor 16 min.

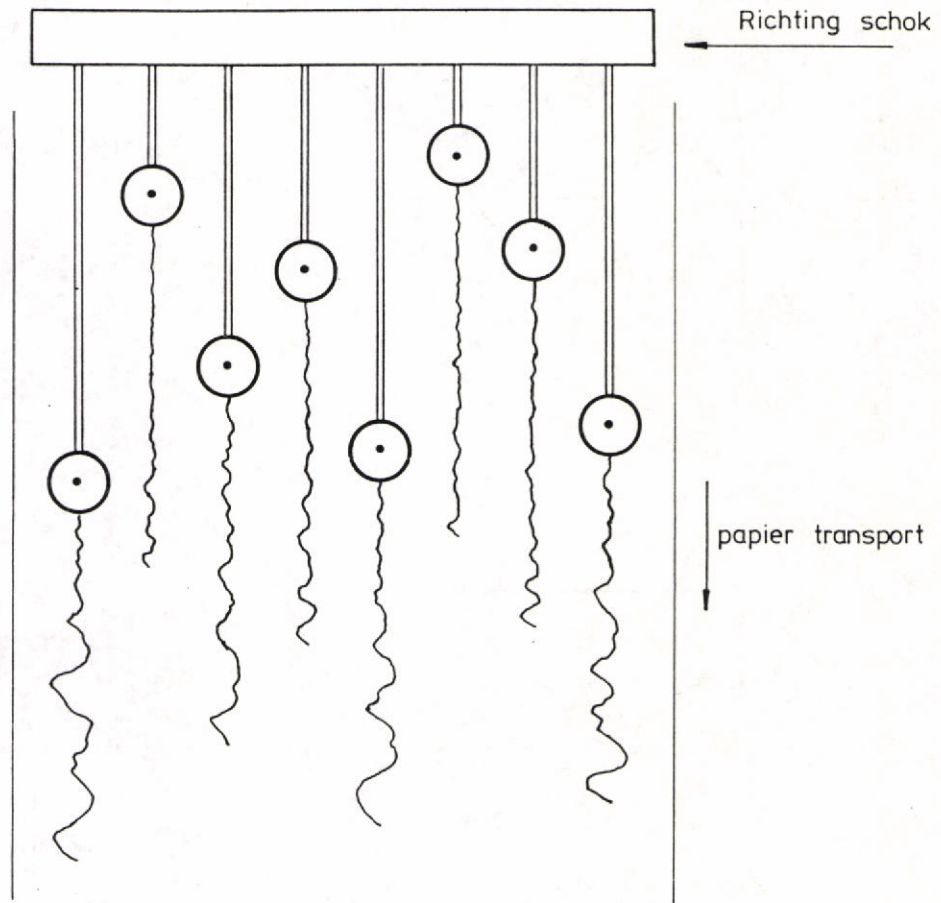


Figuur 14. Voorbeeld van het dichtheidspectrum van een versnelling

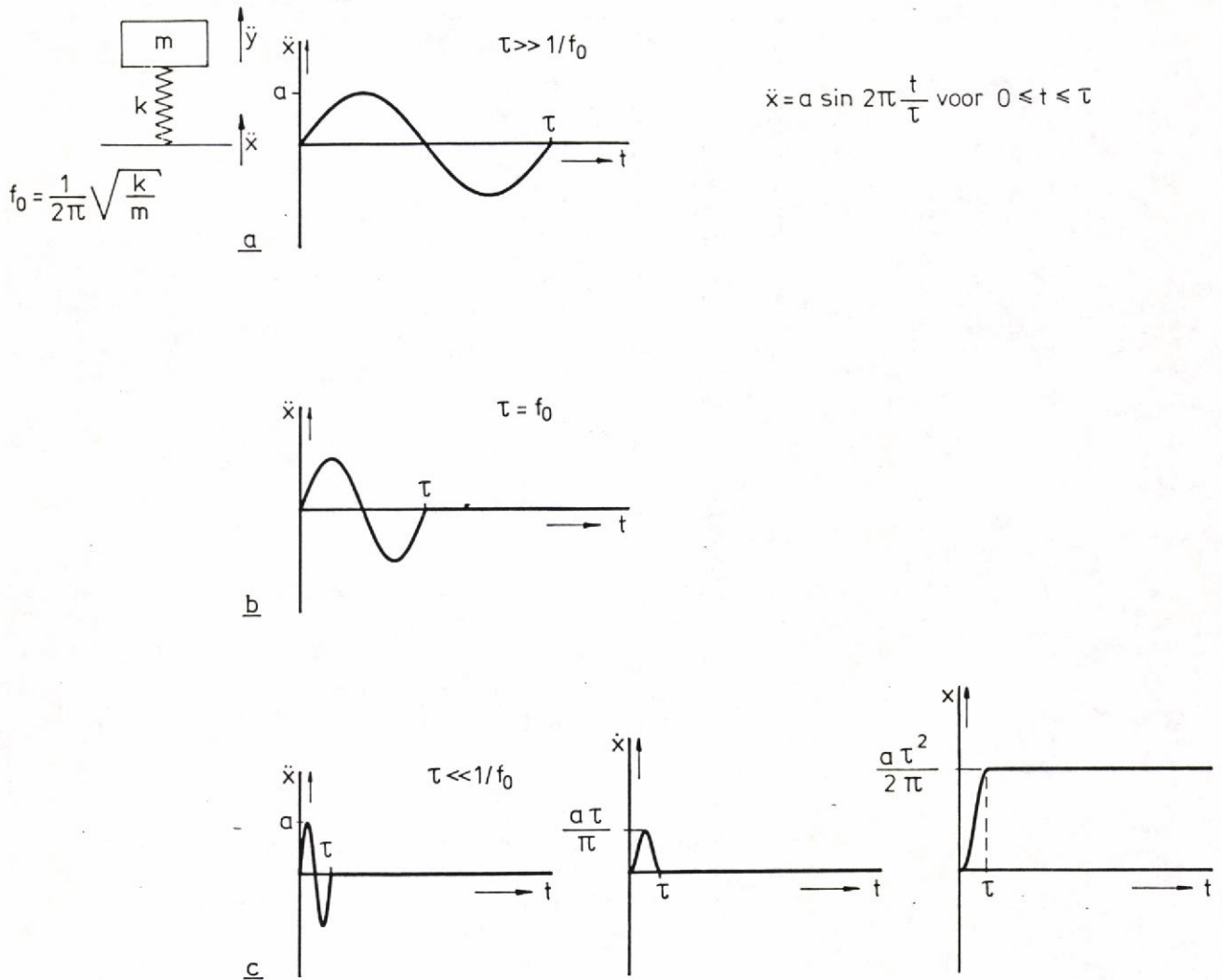
Opmerking: De versnellingsdichtheid is een scalaire grootheid, er is dus geen fase informatie aanwezig



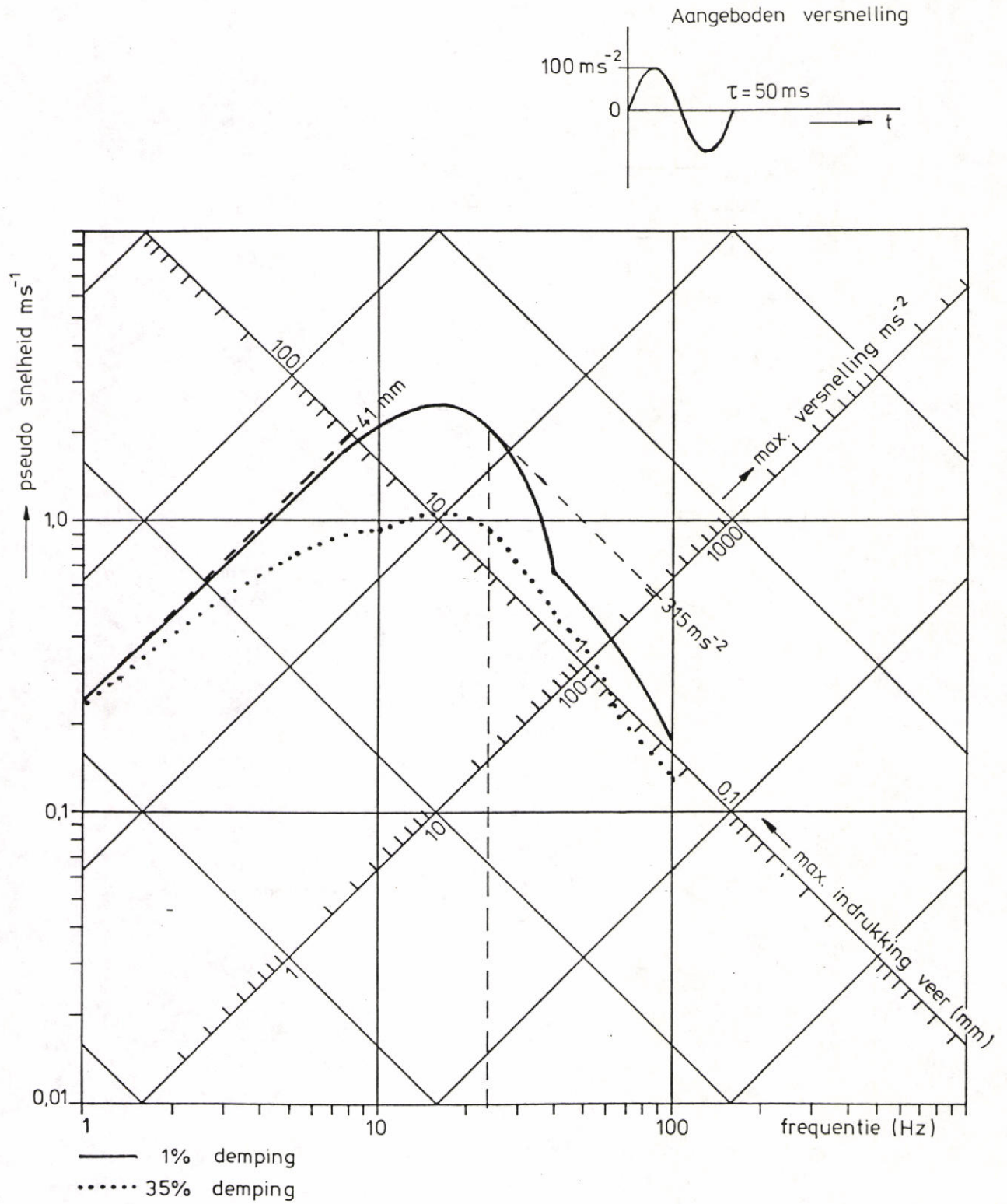
Figuur 15. De Fourier transformatie van een stoot



Figuur 16. Schets van reedgage voor schokresponsie analyse



Figuur 17. De responsie z op versnellingsschokken met een duur groter, gelijk en kleiner dan de eigenperiode van een een-massa-veer systeem



Figuur 18. Schokresponsie spectrum van de aangeboden versnelling

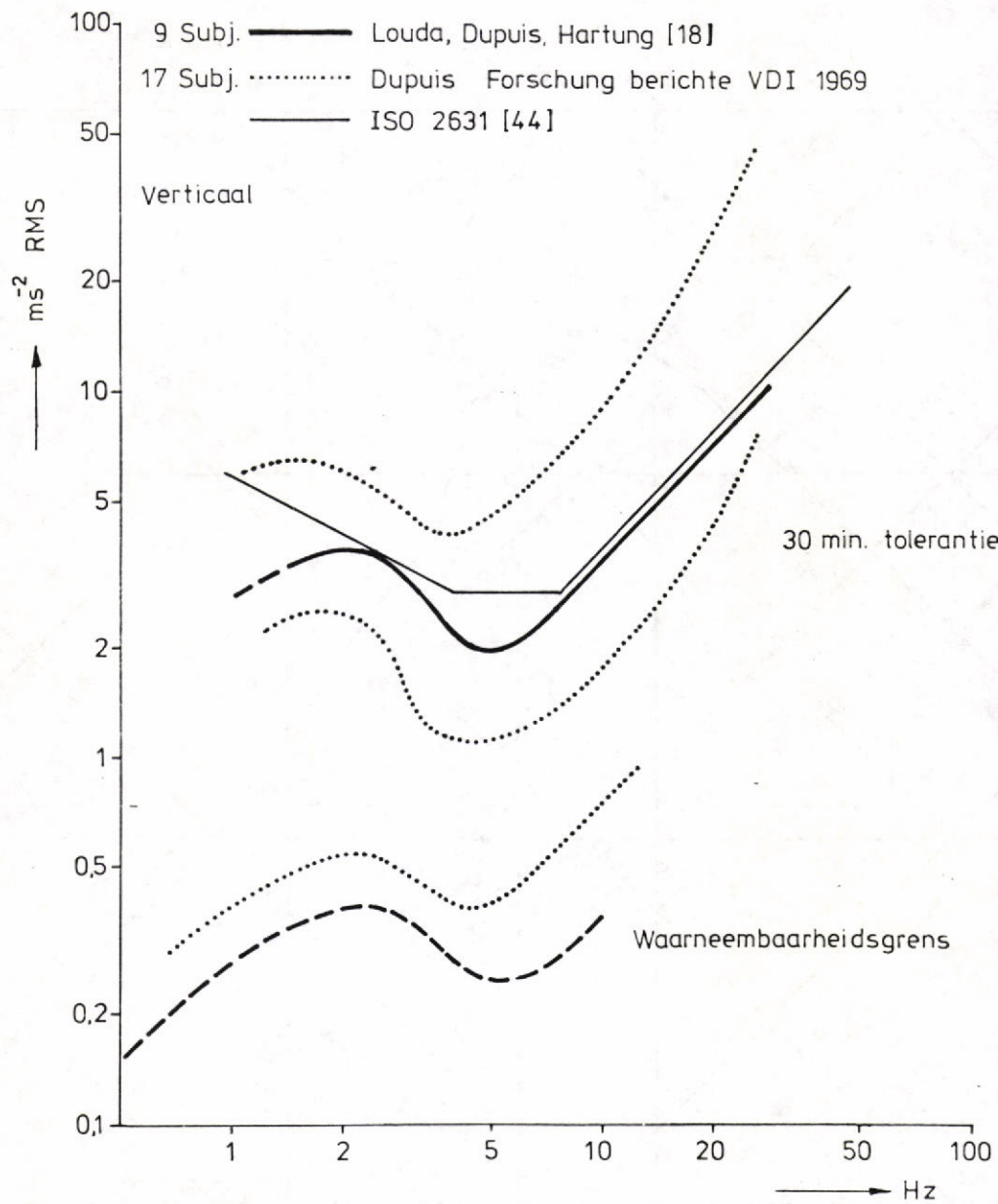
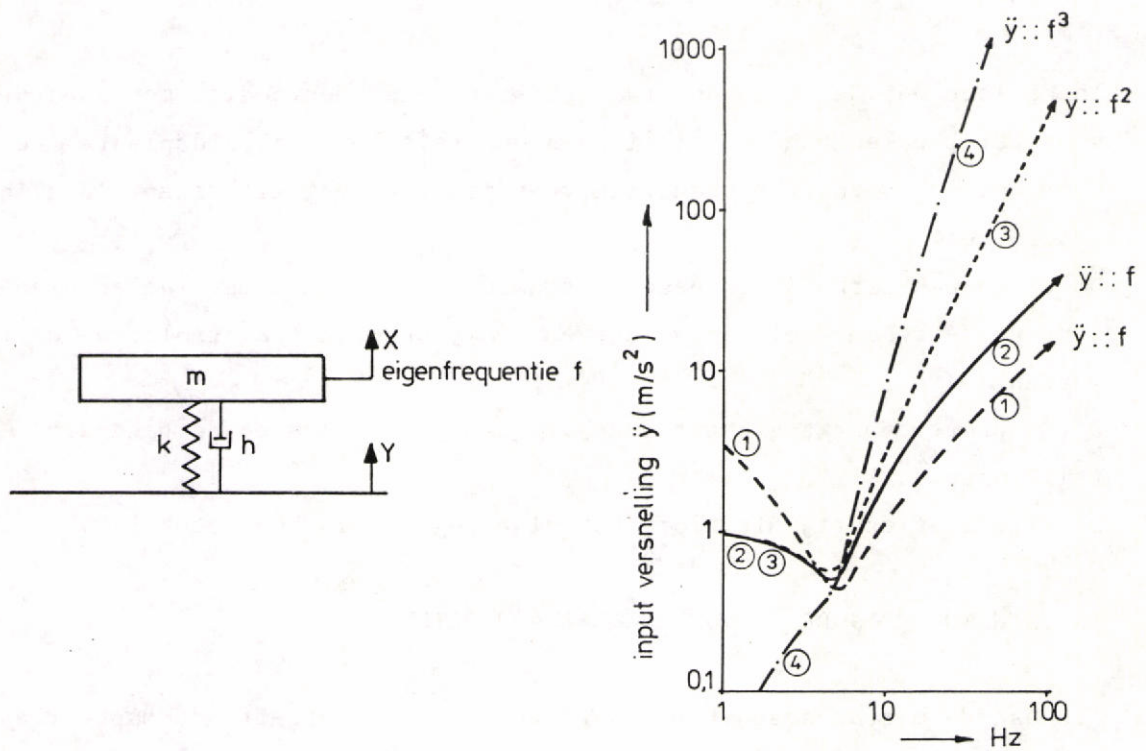


Fig. 19. Gevoeligheidskrommes van Dupuis 1969 in vergelijking tot ISO 2631



- criterium ① gedissipeerd vermogen 0,25 W
- criterium ② totale kracht $m\ddot{x} = 50$ N
- criterium ③ max. veerindrukking $(x-y) = 1$ mm (veerkracht 50 N)
- criterium ④ max. absolute verplaatsing $x = 1$ mm

Figuur 20. Eenvoudig mechanisch model en de verschillende responsiegrootheden als functie van de frequentie volgens Allen (1)

3. EVALUATIE meetapparatuur

3.1. INLEIDING bij de evaluatie meetapparatuur

In de loop der jaren is de vraag ontstaan naar eenvoudige meetapparatuur voor het bepalen van de trillingsintensiteit op de arbeidsplaats. De hiervoor ontworpen instrumenten zijn voorzien van weegfilters en middelingsprocedures.

Om de toepasbaarheid van deze instrumenten te kunnen beoordelen dienen de door de fabrikant geleverde gegevens besproken en gecontroleerd te worden.

Dit rapport beperkt zicht tot de lichaamstrillingen en de hand-arm trillingen.

De illustraties bij dit hoofdstuk zijn gegeven in hoofdstuk 3.9.

3.2. IN DE HANDEL ZIJNDE EENVOUDIGE MEETAPPARATUUR

Als aan de meetapparatuur eisen gesteld worden betreffende hanteerbaarheid en eenvoud van bediening komen slechts enkele instrumenten in aanmerking.

Voor lichaamstrillingen is dat:

- Brüel & Kjaer 2512 human-response-vibration meter.

Voor hand-arm trillingen zijn dat:

- Brüel & Kjaer 2512 human-response-vibration meter.
- Brüel & Kjaer 2513 integrating vibration meter.

Endevco heeft een ride-meter (type RM-1) met zittingsopnemer in de handel gehad. Met dit instrument konden lichaamstrillingen volgens ISO/DIS 2631 worden gemeten. Bepaald werden de gewogen root-mean-square versnelling en de piek root-mean-square versnelling (root-mean-square is de middelbare waarde; dit is de wortel uit het gemiddelde van de gekwadrateerde momentane waarden). Dit instrument is echter uit de produktie genomen omdat de vraag veel te klein was.

Genoemd dient ook te worden de zogenaamde comfortmeter zoals bijvoorbeeld de ride-indexer. Dit instrument bepaalt de gewogen root-mean-square versnelling over een tijdsduur naar keuze tussen 4 en 240 seconden en wordt hoofdzakelijk gebruikt voor het bepalen van het comfort in auto's, treinen, bussen etc.

De figuren 1 t/m 4 geven een beeld van de genoemde apparatuur.

Voor het meten van lichaamstrillingen heeft Brüel & Kjaer een zittingsopnemer type 4322 in de handel gebracht.

Voor het meten van hand-arm trillingen is door Brüel & Kjaer een handadaptor type BA 0234 ontwikkeld.

Noot (red.) 6. Opgemerkt kan worden dat de B en K apparatuur model staat voor een ISO norm "human response vibration measuring instrumentation", momenteel als derde draft proposal ISO / DP 8041 (July 1984) in behandeling.

De "scope" van de norm wordt als volgt aangegeven.

"This international standard specifies measuring instrumentation for the measurement of time-weighted vibration in a given frequency range for determination of vibration as experienced by human beings. It applies to instrumentation for the measurement of hand-arm vibration and/or whole-body vibration.

The purpose of the international standard is to ensure accuracy of results and reproducibility of measurements realized with different measuring instrumentation."

De draft proposal gaat niet in op de problematiek rond het meten en beoordelen van niet-sinusvormige signalen.

"The knowledge about subjective characteristics of human sensation is limited. It is, however, important for the consistency of reported results to use well-defined characteristics. Standardization of the time-weighting characteristics does not imply that the relationship between subjective perceived impulse vibration magnitudes and the physical characteristics of vibration is there by precisely represented".

Speciaal ten aanzien van pulsvormige signalen wordt gesteld:

"A wide dynamic range, overload indication and a high crest factor capability, are necessary for the accurate measurement of short-duration vibratory motion, and these characteristics are specified in this international standard."

Aanbevolen wordt om de r.m.s. waarde van het signaal te meten met een lineaire integratie over 60 seconden (1_{eq}).

3.3. BESCHRIJVING VAN DE BRUEL & KJAER 2512 HUMAN-RESPONSE-VIBRATION METER

Met genoemd instrument kunnen lichaamstrillingen, hand-arm trillingen en de trillingen verantwoordelijk voor bewegingsziekte gemeten worden. De lichaamstrillingen worden volgens ISO 2631-1978 en amendement 1 gemeten. Voor de hand-arm trillingen wordt de draft international standard ISO/DIS 5349 van 18 januari 1979 gebruikt. Bewegingsziekte gaat volgens draft addendum to ISO 2631 DAD 2 van 16 september 1980.

Dit instrument is batterijgevoed. De afmetingen zijn 133x210x200 mm en de massa is 3,1 kg. Externe voeding is ook mogelijk.

Met dit instrument kan slechts 1 signaal (meetrichting) gelijktijdig worden verwerkt c.q. geregistreerd, hoewel er wel 3 ladingsversterkers zijn ingebouwd. Hierbij zijn de volgende waarden digitaal uit te lezen:

- de meetduur in tienden van minuten (6 sec);
- de piekwaarde van het signaal in dB. Nauwkeurigheid: ± 1 dB ($\pm 12\%$);
- de "equivalent continuous vibration level" volgens het gelijke energie principe over de totale meetduur. (meetijd 1000 s of langer) Geeft iedere 8 sec. een vernieuwde waarde in dB. Nauwkeurigheid: beter dan $\pm 0,5$ dB ($\pm 6\%$).

$$\text{Formulevorm: } L_{eq} = 20 \log \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (a(t)/10^{-6})^2 dt}$$

$a(t)$ = gewogen versnelling

referentie versnelling = 10^{-6} m/s^2 .

- "de equivalent exposure dose" in procenten van de toegestane dosis.

Nauwkeurigheid:

bij lichaamstrillingen $\pm 15\%$ of beter.

bij hand-arm trillingen $\pm 5\%$ of slechter (slechter bij de niveaustappen die bij een toegestane blootstellingstijd van 0,5, 1, 2, 4 en 8 uur liggen).

Deze waarden zijn ook met behulp van een printer uit te lezen uit de interface bus. De root-mean-square waarde is van een analoge meter af te lezen (root-mean-square is de middelbare waarde; dit is de wortel uit het gemiddelde van de gekwadraterde momentane waarden). Sturing kan met een minicomputer via de interface bus plaatsvinden (IEC-bus).

Verder is het mogelijk om de weegfilters uit te schakelen en zo een ongewogen gemiddelde versnelling te meten. Ook een eigen externe weegfilter kan aangesloten worden, al dan niet met uitschakeling van het ingebouwde weegfilter.

In het instrument is een referentieoscillator ingebouwd, waarmee de werking gecontroleerd kan worden.

Op het instrument zijn 3 ingangen gebouwd, zodat een triaxiaal opnemer direkt aangesloten kan worden. Met een keuzeschakelaar kan dan het gewenste kanaal (X, Y of Z) ingeschakeld worden.

De L_{eq} waarde heeft een bereik van 104 tot 139,5 dB ($\sim 0,16$ tot $9,4 \text{ m/s}^2$) voor lichaamstrillingen en van 124 tot 159,5 dB ($\sim 1,6$ tot 94 m/s^2) voor de hand-arm trillingen (de referentieversnelling is 10^{-6} m/s^2).

De maximale toegestane crestfactor is (afhankelijk van het signaalniveau) in het ongunstigste geval 3. Over het algemeen zal een hogere crestfactor mogelijk zijn. (ISO 2631 noemt een maximum toegestane crestfactor van 6) (crestfactor = piekwaarde gedeeld door de root-mean-square waarde).

Een meting kan, afhankelijk van het signaalniveau, maximaal tussen de 17 en 53 minuten duren.

Bij lichaamstrillingen heeft de piekwaarde een bereik van 100 tot 146 dB ($\sim 0,1$ tot 20 m/s^2) en bij hand-arm trillingen van 120 tot 166 dB (~ 1 tot 200 m/s^2).

Overloadindicatie is ingebouwd voor de piekwaarde, de L_{eq} -waarde en de equivalent exposure dose waarde.

De gevoeligheid van de opnemer dient voor metingen van lichaamstrillingen $1 \mu\text{C}/(\text{m/s}^2)$ te zijn.

De afgelezen root-mean-square waarde dient bij hand-arm metingen (opnemergevoeligheid is $0,1 \mu\text{C}/(\text{m/s}^2)$) met een factor 10 vermenigvuldigd te worden (bij de dB-schaal dient dus 20 dB opgeteld te worden).

Er is een aansluiting om het, al dan niet gewogen, signaal af te takken.

De gevoeligheid bedraagt hier $200 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ voor lichaamstrillingen en $20 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ voor hand-arm trillingen.

Ook is het mogelijk het root-mean-square signaal af te takken met een niveau van 100 mV/dB, waarbij 0 V = 100 dB voor lichaamstrillingen en 0 V = 120 dB voor hand-arm trillingen.

3.4. BESCHRIJVING VAN DE BRUEL & KJAER 2513 INTEGRATING VIBRATION METER

Met dit instrument kunnen hand-arm trillingen volgens ISO/DIS 5329-1979, machinetrillingen (severity) en ongefilterde trillingen over een breed spectrum worden gemeten. Dit instrument is batterijgevoed. De afmetingen zijn 187x72x22 mm en de massa is 350 gram.

Met dit instrument kan slechts 1 signaal (meetrichting) gelijktijdig worden verwerkt c.q. geregistreerd. Hiervan zijn de volgende waarden door middel van led's uit te lezen (iedere led correspondeert met een amplitude die 11% groter is dan die van de vorige led. Als de amplitude tussen 2 led's in ligt lichten ze beiden op hetgeen een resolutie van 6% oplevert):

- De maximum root-mean-square waarde die is opgetreden sinds de meting begon.
- De root-mean-square waarde (wordt met een tijdkonstante van 1 seconde bepaald).
- De piekwaarde. (De maximum responsiesnelheid is 6% (0,5 dB) per microseconde. De tijdkonstante is 1 seconde).
- De Leq-waarde en de piekwaarde beiden na 60 seconden.

Overload indicatie wordt gegeven door het knipperen van de led's.

De gevoeligheid van de meegeleverde opnemer bedraagt $1 \text{ pC}/(\text{m/s}^2)$. De opnemer is met behulp van de meegeleverde magneet snel op vlakke metalen delen te bevestigen.

Voor hand-arm trillingen moet het instrument in de H/A-stand en op 1 van de snelheidschalen gezet worden. Omdat het weegfilter tevens een versterking van 10 maal introduceert wordt de gewogen RMS-snelheid in cm/s en niet in mm/s gegeven (bij een opnemergevoeligheid van $1 \text{ pC}/(\text{m/s}^2)$).

Omdat de weegkromme vanaf 16 Hz ofwel $\omega = 100 \text{ s}^{-1}$ (dat is hoofdzakelijk het voor hand-arm trillingen interessante frequentiegebied) een lijn van konstant snelheidsniveau volgt, geldt:

$$1 \text{ cm/s RMS gewogen snelheid} \cong 1 \text{ m/s}^2 \text{ RMS gewogen versnelling.}$$

Noot (red.) 7b Meerdere onderzoekers zijn van mening dat vooral bij weinig of nauwelijks stationaire trillingsverschijnselen de metingen in drie richtingen simultaan moeten worden uitgevoerd. Middels een optie op de 2513 is het mogelijk de meetsignalen van een triaxiale versnellingsopnemer op te nemen op bijvoorbeeld magneetband en later uit te werken. Bij een dergelijke meetketen ontstaat al snel de behoefte

om middels een referentie-sigitaal de meetketen te controleren, een faciliteit die bij de onderzochte instrumenten ontbreekt.

Wanneer we de ervaringen van verschillende onderzoekers samenvatten, dan blijkt er een groeiende behoefte te bestaan naar een ideaal meetapparaat voor trillingsintensiteit op de arbeidsplaats. Een dergelijk apparaat zou moeten voldoen aan de volgende kenmerken:

1. klein, licht en transportabel
2. batterij-gevoed
3. mogelijkheid om drie kanalen simultaan te meten, c.q. te registreren
4. zo mogelijk voorzien van omschakelbare filters voor zowel hand-arm trillingen als voor lichaamstrillingen volgens ISO standards/drafts
5. eenvoudige bediening en een handleiding die voldoende en relevante informatie geeft voor een "intelligente leek op het gebied van trillingsmeettechniek"

3.5. METING FILTERKARAKTERISTIEKEN VAN DE BRUEL & KJAER 2512

Om een indruk te krijgen van de nauwkeurigheid van de ingebouwde filterkarakteristieken, zijn de filterkarakteristieken van de B&K 2512 gemeten.

Voor de meting van de filterkarakteristieken is gebruik gemaakt van de Fourier-analyzer HP 5451C.

Als ingangssigitaal zijn sinussweeps gebruikt. Ingangssigitaal (de sweep) en het uitgangssigitaal van het te testen weegfilter worden beiden in de Fourier analyzer ingelezen. Tussen ingangssigitaal en uitgangssigitaal van het te testen weegfilter is de overdrachtsfunctie bepaald.

Om de nauwkeurigheid te vergroten is ieder filter met drie verschillende sinussweeps doorlopen. De signalen werden ingelezen bij een blokgruote van 2048 samples met een "total time" van respektievelijk 20, 2 en van 0,2 sec. Dit houdt voor de transferfuncties een delta frequency van 0,05 Hz, 0,5 Hz en van 5 Hz in.

Tevens is de overdrachtsfunctie van ingang tot AC uitgang, bij uitgeschakelde weegfilter bepaald.

3.6. DE MEETRESULTATEN

De gemeten weegfilters worden grafisch weergegeven in de figuren 5 t/m 7. In de tabellen 1 t/m 3 zijn, bij een aantal frequenties, de verzwakking van het weegfilter en de volgens ISO gewenste verzwakking gegeven. Uit de resultaten moet gekonkludeerd worden dat de gemeten weegfilters aan de volgens ISO gestelde toleranties voldoen.

freq. [Hz]		1	5	6,3	8	25	31,5	40	63	80
	ingang									
WBV-a(z)	Z [dB]	-6,7	0,4	0,6	-1,0	-9,8	-11,5	-13,7	-17,7	-21,3
vlgs.	ISO [dB]	-6	0	0	0	-10	-12	-14	-18	-20

Tabel 1: WBV-Z filter toleranties volgens ISO:

voor 6,3 Hz en 31,5 Hz +/-1 dB

alle overige freq. +/-2 dB

freq. [Hz]		1	1,25	1,6	8	25	31,5	40	63	80
	ingang									
WBV-a(xy)	X [dB]	1,9	3,2	3,3	-8,8	-18,5	-20,2	-22,4	-26,4	-29,9
	Y [dB]	1,8	3,2	3,3	-8,6	-18,6	-20,2	-22,4	-26,4	-30,1
vlgs.	ISO [dB]	2,9	2,9	2,9	-9,1	-19,1	-21,1	-23,1	-27,1	-29,1

Tabel 2: WBV-XY filter toleranties volgens ISO:

voor 1,25 Hz en 31,5 Hz +/-1 dB

voor alle andere freq. +/-2 dB

freq. [Hz]		6,3	8	10	16	20	160	800	1000
H/A	ingang								
	X [dB]	-1,8	-0,7	0,5	-0,6	-1,5	-19,8	-33,6	-36,1
	Y [dB]	-1,8	-0,6	0,5	-0,6	-1,5	-19,8	-33,3	-36,2
	Z [dB]	-1,8	-0,6	0,6	-0,6	-1,5	-19,8	-33,8	-36,1
volgens ISO [dB]		0	0	0	0	-2	-20	-34	-36
toleranties		+1-4	+1-2	+/-1	+1-2	+/-1	+/-0	+/-1	+/-2

Tabel 3: H/A filter

De ladingsversterkers hebben een versterking van 1 mV/pC. Bij ingeschakeld weegfilter bleek bij zowel hand-arm- als lichaamstrillingen, aan de AC-uitgang, afgezien van de filterkarakteristiek een versterking van 200 maal aanwezig. Bij uitgeschakeld weegfilter bleek bij lichaamstrillingen nog steeds een versterking van 200 maal aanwezig. Voor hand-arm is de versterking dan echter teruggevallen tot 2 maal.

Noot (red.) 8. 3.7. De Ride Indexer

De firma Euchel Electronics b.v. in st. Michielsgestel vervaardigt de Ride Indexer, een verbeterde versie van de bij de TH delft, afdeling Voertuigtechniek ontwikkelde comfortmeter. De Ride Indexer is speciaal bedoeld voor het meten van het rij-comfort in rail- en wegvoertuigen. Ride Indexer II is de laatste versie, een handzaam draagbaar instrument, 30 x 24 x 13 cm, gewicht 5 kg, werkt met oplaadbaar accu's. Twee kanalen (horizontaal en verticaal) worden simultaan gemeten. De gewogen versnellingen (weegkrommes volgens IS 2631) worden omgerekend tot k- en tot Wz- waarden met:

$$K_v = 20 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{vw}^2 dt} \quad \text{en} \quad \left(\frac{k}{h} \right) = 28 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{hn}^2 dt}$$

waarin a_{vw} en a_{hn} de verticale en de horizontale gewogen versnellingen zijn en T de meettijd.

k_h in index

$$W_z = 6,67 \sqrt{\frac{1}{T}} \int_0^T a_w^2 dt,$$

waarin a_w de gewogen versnelling, horizontaal of verticaal. De k-waarden volgens de Duitse norm VDI 2057, de W_z waarden zijn bij de Europese spoorwegen in gebruik zijnde niveau-indicaties.

De tijdsduur voor de lineaire integratie kan worden ingesteld tussen 4 seconden en 4 minuten, terwijl de metingen automatisch in een bepaald sequentie kunnen worden herhaald.

De meetresultaten kunnen worden afgelezen op een LCD-display en afgedrukt op een thermische printer. De filters en de versterkers werken analoog, de verwerking van de signalen is digitaal middels een ingebouwde micro computer. De trillingsniveau's worden gegeven als r.m.s. waarde. Volgens de ontwerper zou het eenvoudig mogelijk zijn het instrument zo te programmeren dat naast de r.m.s-waarden ook de piekwaarden worden gegeven, en desgewenst de berekende crest factor.

Voor het ontwikkelen van een prototype dat aan alle eisen voldoet, zou een redelijke belangstelling moeten worden aangetoond.

3.7. TOEPASBAARHEID VAN DE GEEVALUEERDE APPARATUUR

De B&K 2512 is geschikt voor het bepalen van de trillingsintensiteit volgens ISO 2631 (lichaamstrillingen) en volgens ISO/DP 5349-1979 (hand-arm trillingen). Met de B&K 2513 kan de trillingsintensiteit van hand-arm trillingen volgens ISO/DP 5349-1979 worden bepaald.

Voor de inventarisatiemetingen (het vaststellen van de trillingsintensiteit en de trillingsvorm op een bepaalde arbeidsplaats in opdracht van de vakgroep veiligheidkunde van de TH-Delft zijn ook dichtheidspectra en/of tertsbandspectra gewenst zodat deze apparatuur daar niet geschikt voor is. Bovendien moeten de 3 meetrichtingen bij de inventarisatiemetingen gelijktijdig geregistreerd worden.

Omdat de meetduur van de geëvalueerde apparatuur beperkt is, kan deze apparatuur niet gebruikt worden voor het bepalen van de dagelijkse dosis. Wel kan deze apparatuur gebruikt worden om de verschillende arbeidsplaatsen globaal met elkaar te vergelijken als voldoende rekening gehouden wordt met de beperkingen die de ISO-norm aangeeft.

Noot (red.) 9. In onderstaande tabel worden de belangrijkste gegevens van de besproken meetapparaten vergeleken.

FABRIKANT	Brüel and kjaer 25/2	Brüel and kjaer 25/3	Euchel electronics
APPARAAT	Human response vibration meter	Integrating vibration meter	Ride Indexer II
Whole body vibration	x	-	x

Hand arm vibration	x	x	-
True r.m.s. value	x	x	x
Piekwaarde	x	x	-
Batterij- of accuvoeding	x	x	x
Gewicht [kg]	3,1	0,35	5
Aantal signalen (simultaan)	1	1	2
Tijdsduur L_{eq} [sec]	meetduur, max. 53 min.	60	4 tot 240
Uitlezing	LCD	Led's	LCD + printer
Overload indicator	x	x	x
Frequentie gebied [Hz]	0,03 - 2000	10 - 10.000	0,4 - 100
Mogelijkheid tot aanpassing ontwerp	-	-	x
Handelbaarheid	goed	zeer goed	zeer goed

Alle apparaten zijn geschikt voor metingen "in het veld". Een bezwaar van de Brüel and kjaer apparatuur is het oneigenlijke gebruik van dB's als eenheid naar analogie van de in de acoustiek gebruikelijke eenheid dBA. Met name bij het berekenen van de crest factor kan dit aanleiding geven tot verwarring. De fabrikant argumenteert het gebruik van dB als eenheid voor de gewogen versnelling omdat hiermee onderscheid kan worden gemaakt tussen de gemeten versnelling (in m/s²) en de gewogen versnelling.

omdat hiermee onderscheid kan worden gemaakt tussen de gemeten versnelling (in m/s^2) en de gewogen versnelling. Alle drie genoemde apparaten zijn, ongeacht hun beperkingen, goed te gebruiken. Voor een dergelijk meetinstrument kan en mag niet worden verwacht dat "slimme" elektronika antwoorden kan geven op nog onvoldoende geformuleerde vragen.

Hierbij denken we dan vooral aan de bewerking van signalen met een hoge crestfactor en de betrouwbaarheid van de weegkrommen in de ISO normen onder dergelijke omstandigheden, evenals de realisatie en het nut van dosismetingen, zolang nog niet veel bekend is over de dosis-effekt relaties en de mogelijke "recovery" tijden in het menselijk lichaam.

De "instruction manuals" zijn in alle gevallen geschreven onder de vooronderstelling van een uitgebreide kennis van het onderwerp trillingsmeettechniek. Een aanvulling ten behoeve van de toekomstige gebruiker zal zeker gewenst zijn.

3.8. LITERATUUR

1. ISO 2631-1978.
2. Draft amendment to ISO 2631/DAM 1.
3. Draft International standard ISO/DIS 5349-1979.
4. Instruction manual Brüel & Kjaer 2512 human-response-vibration meter.
5. Instruction manual Brüel & Kjaer 2513 integrating-vibration meter.

3.9. Illustrations

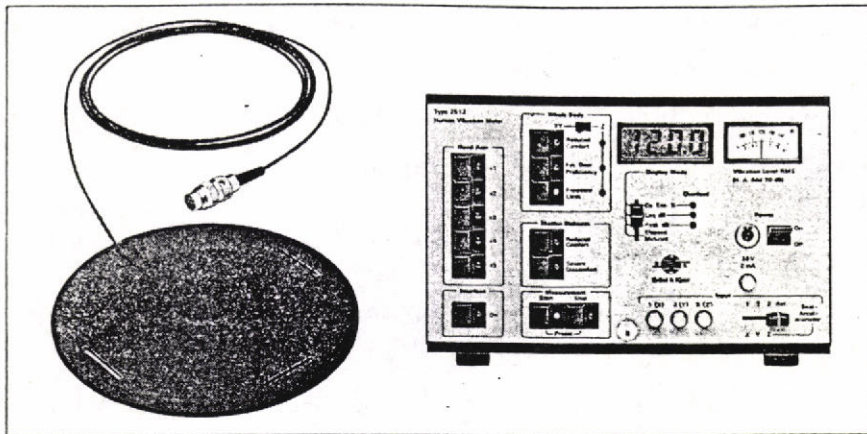


Fig. 1. Human vibration meter type 2512 and triaxial seat accelerometer type 4322

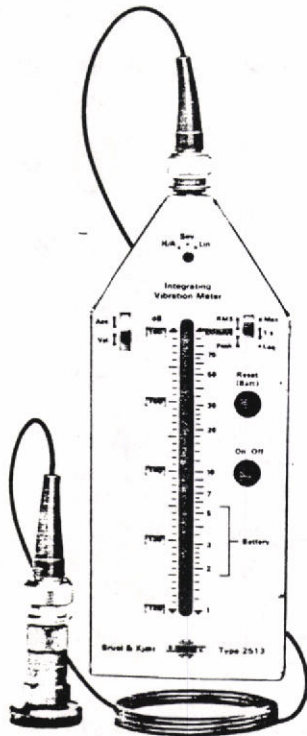


Fig. 2. Integrating vibration meter type 2513

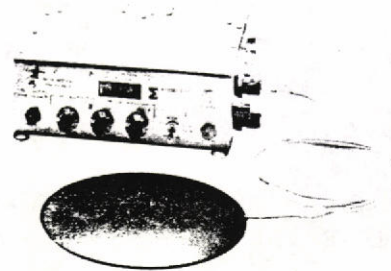


Fig. 3. RM-1 ride meter

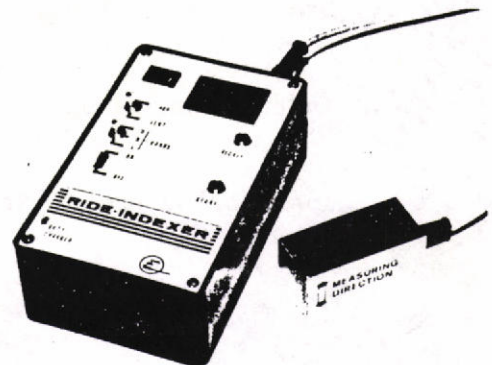
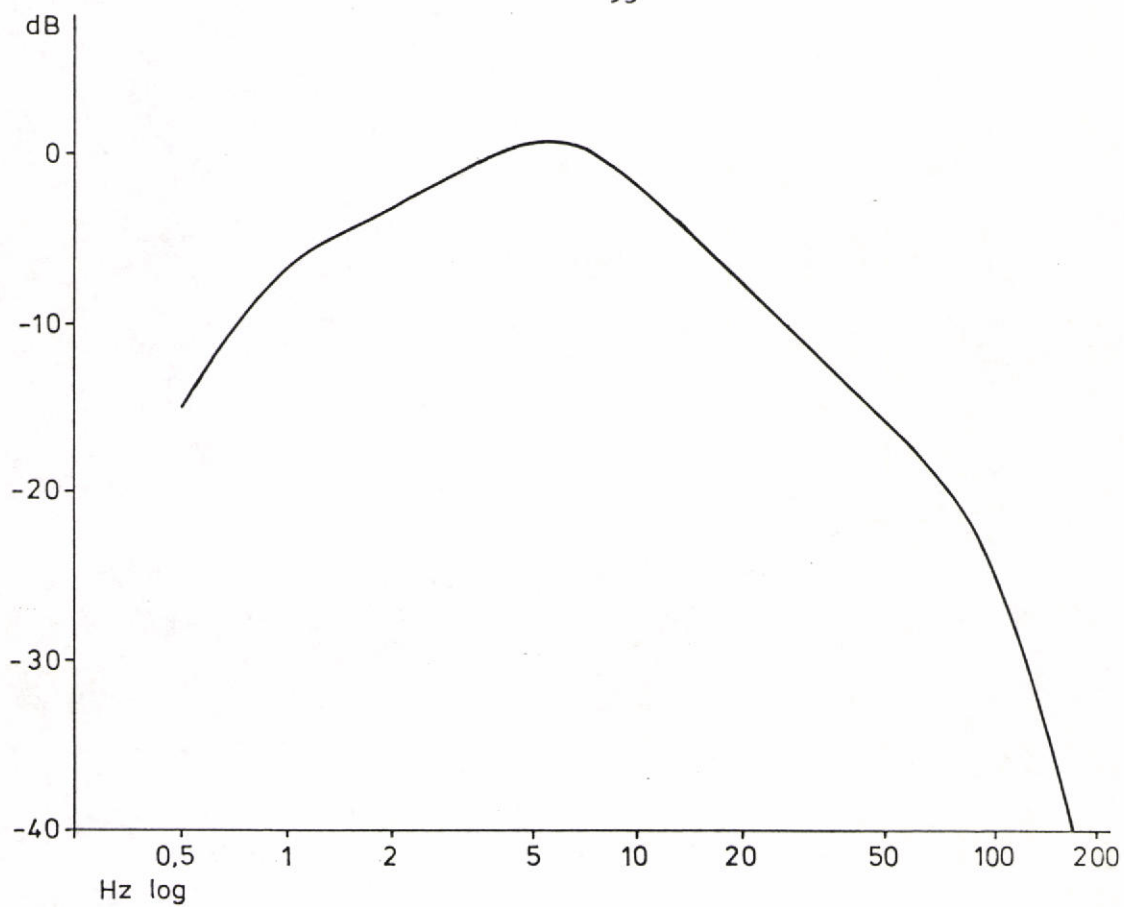
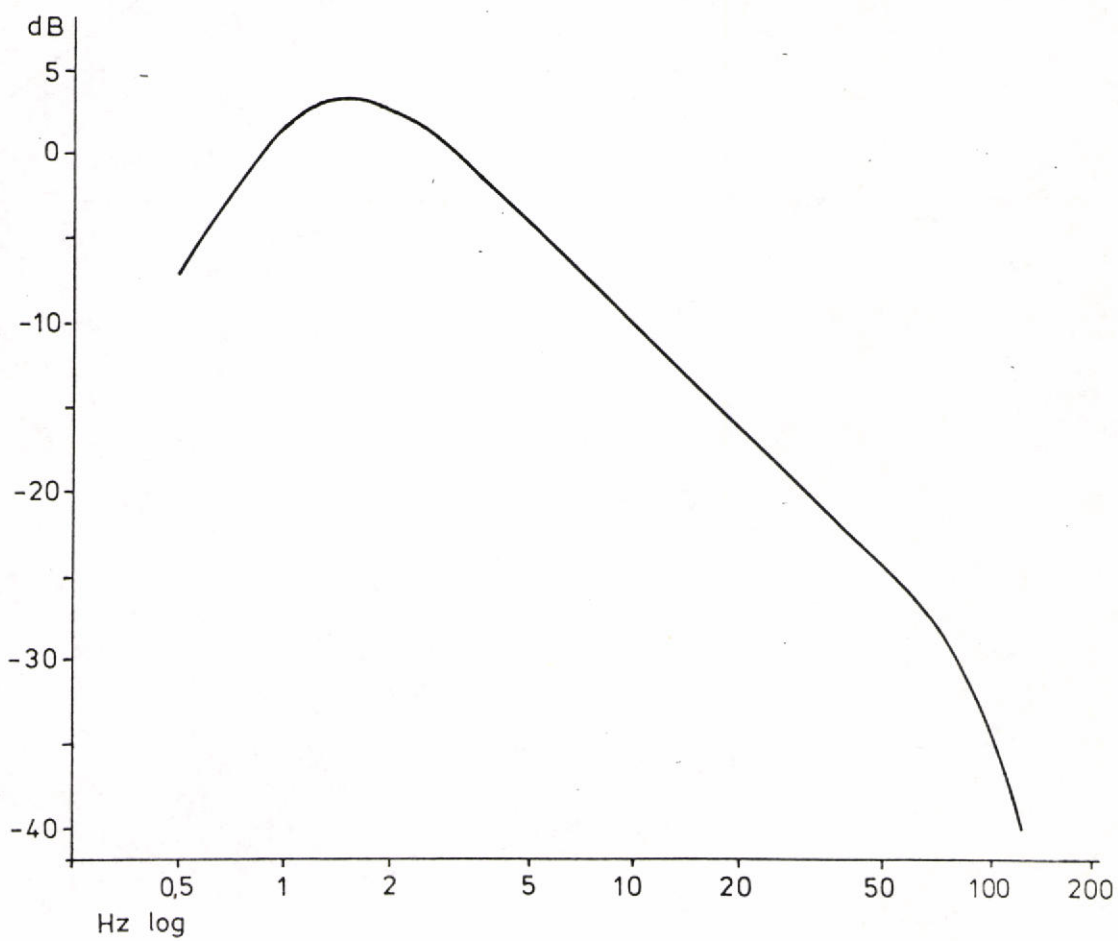


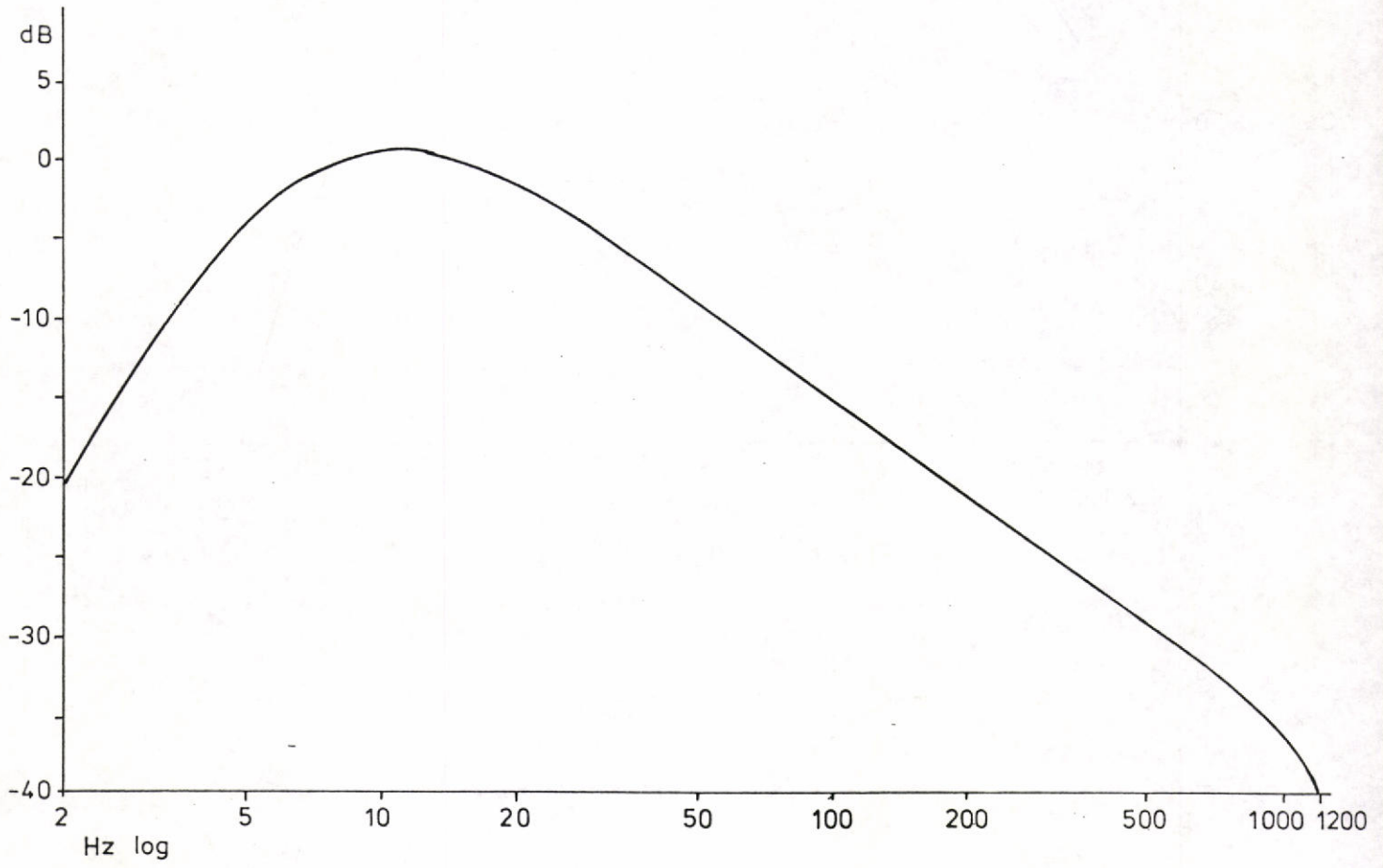
Fig. 4. Ride-indexer



Figuur 5. WBV-Z filter



Figuur 6. WBV-XY-filter



Figuur 7. H/A-filter

4. PLAATSING opnemers

4.1 . INLEIDING bij het onderzoek naar de plaatsing van opnemers

In de loop der jaren is de vraag naar eenvoudige apparatuur voor het meten van trillingen op de arbeidsplaats toegenomen. Een van de eerste problemen die zich bij het meten voordoet is, hoe en waar, welke opnemers geplaatst moeten worden. Uit praktische overwegingen zal men bij lichaamstrillingen van staande personen de opnemers bij voorkeur op de vloer plaatsen. Voor zittende personen zijn de beste plaatsen:

- Op een plaat tussen het zitvlak en de zitting [17]¹⁾
- Ingebouwd in de zitting zelf.

Men moet dan rekening houden met de volgende foutenbronnen :

- Een plaat kan de trillingsoverdracht naar het lichaam door een verstijving van de zitting veranderen.
- Bij de plaatsing van de opnemer in de zitting meet men de trillingen niet op het grensvlak tussen het zitvlak en de zitting, maar ergens anders in het dynamische systeem [21].

Bij TNO/IWECO werden in dit verband trillingsmetingen uitgevoerd aan een stoel die op een triltafel was gemonteerd.

Het doel van dit onderzoek is de geschiktheid van de B&K zittingopnemer voor het meten van de trillingsintensiteit bij zittende mensen te bepalen. Gemeten werd aan de stoelzitting, met de zittingopnemer, met een speciaal ontwikkelde bekkenopnemer en bij verticale aanstoting bovendien aan het hoofd. Behalve de controle op de juiste weergave van de trillingen door de zittingopnemer werd nagegaan of de trillingsoverdracht naar het lichaam niet beïnvloed wordt door het aanbrengen van de zittingopnemer tussen het lichaam en de stoelzitting. Het bekken leek daarvoor de meest geschikte meetplaats. Voor de metingen aan het hoofd werd gebruik gemaakt van een mondadaptor met tandafdruk naar het voorbeeld van Barton ea [16] en Wasserman ea [17], zie figuur 2. De mondadaptors zijn gemaakt door een tandtechnicus van "Sidenta" in Delft.

¹⁾ Getallen tussen [] verwijzen naar de literatuur, hoofdstuk 4.7.

Voor de metingen aan het bekken zijn speciale beugels ontwikkeld. Voor beide proefpersonen is een aparte beugel op maat gemaakt door de Anna-kliniek in Leiden. De beugels worden aan zowel de voorzijde als de achterzijde van het bekken vastgedrukt, in totaal op vier plaatsen. Figuur 3 toont een van de gebruikte meetbeugels.

Bij de ontwikkeling van de bekkenopnemer werd uitgegaan van de ervaringen die bij het Medisch Fysisch Instituut van TNO waren opgedaan met een beugel voor de meting van de beweging van ledematen. Deze beugel werd op het bekken afgesteund en was universeel bruikbaar [10]. In overleg met de heren J. During en H. Goudfrooy van het MFI werd besloten voor dit geval passende steunen voor de beide proefpersonen te laten maken. Dit voorstel werd samen met de heer T. van Pijkeren van de Anna-kliniek te Leiden nader uitgewerkt en in de instrumentmakerij van de kliniek gerealiseerd. De proefpersonen werden eerst opgemeten en er werden gipsafdrukken van de drukvlakken gemaakt. Na vervaardiging van de beugels werden zij op de proefpersonen gecontroleerd en bijgewerkt. Het resultaat waren beugels die, gezien de rode drukplekken op de huid, een goede verbinding met het bekken waarborgden en bovendien bij de dragers weinig hinder veroorzaakten.

Omdat de sluitband van de meetbeugel in aanraking kwam met de buikwand moet er rekening mee worden gehouden dat door het meetrillen van de massa in de buikholte enige meetfout kan zijn opgetreden. Hier is geen onderzoek naar uitgevoerd, de invloed is vermoedelijk zeer gering en kan niet op eenvoudige wijze worden vastgesteld.

De illustraties zijn bij elkaar opgenomen in hoofdstuk 4.8.

4.2. OMSCHRIJVING VAN DE METING

De meetrichtingen worden door figuur 1 volgens ISO-2631 gegeven.

De omgevingstemperatuur bedroeg gedurende de meting ongeveer 18 graden Celsius.

De bekkenopnemers werden zo stevig vastgezet dat bij het loshalen rode afdrukken op de aandrukplaatsen zichtbaar waren.

De proefpersonen werden in 3 onderling loodrechte richtingen volgens figuur 1 in trilling gebracht. De figuren 4, 5 en 6 geven foto's van de op de triltafel gemonteerde stoel.

De voetensteun trilde tijdens de meting mee.

Tussen de rug en de rugleuning was tijdens de proef geen kontakt. Er werd met 2 proefpersonen van verschillende lichaamsbouw gewerkt, zie tabel 1.

proefpersoon	geslacht	leeftijd	lengte	gewicht
A	man	22	1,79	59
B	man	23	1,96	81

Tabel 1

De figuren 7a en 7b geven een indruk van de lichaamsbouw en van de houding gedurende de meting van de beide proefpersonen.

Elke proefpersoon werd ongeveer 6 minuten lang achtereen met trillingen belast, daarna volgde er een pauze van ten minste 5 minuten. Om de reproduceerbaarheid te testen werden van alle metingen duplo's uitgevoerd.

Per aanstootrichting werden 4 verschillende situaties gemeten :

situatie 1 : houten stoelzitting met zittingopnemer.

situatie 2 : houten stoelzitting zonder zittingopnemer.

situatie 3 : zachte stoelzitting met zittingopnemer.

situatie 4 : zachte stoelzitting zonder zittingopnemer.

Beide proefpersonen werden aan deze 4 situaties onderworpen. Als zachte zitting is een 6 cm dik schuimrubber kussen gebruikt. Om rotatie-trillingen te kunnen elimineren is aan de houten stoelzitting op 3 plaatsen en aan het bekken op 2 plaatsen gemeten. Als excitatiesignaal werd

bij alle metingen gebruik gemaakt van een lineaire sweep tussen 5 en 35 Hz met een totale duur van 174s. Met de gebruikte triltafel zijn frequenties beneden de 5 Hz niet goed op te wekken.

Het trillingsnivo op de triltafel bedroeg ongeveer $0,7 \text{ m/s}^2$ RMS. Volgens [1] en [2] zou onder deze omstandigheden het menselijk lichaam zich nog lineair gedragen, zodat een bepaling van de overdrachtsfunctie zinvol is. De overdrachtsfunctie wordt gedefinieerd als het quotient van de spectra van het uitgaande signaal en het ingaande signaal. Indien er geen versterking of verzwakking optreedt zal de overdrachtsfunctie de waarde 1 hebben over het gehele frequentiegebied.

Bij de metingen is gebruik gemaakt van een bandregistratie met een PCM-systeem. Tijdens de metingen gaven led's een indicatie van de signaalgrootte per kanaal. Bovendien kon gedurende de meting het signaal achter de versterkers, achter de filters en achter de PCM encoder gecontroleerd worden op uitsturingen en verzadiging. Het meetschema is in figuur 8a gegeven. Bij 2 kanalen is een hoogdoorlaatfilter direct achter de ladingversterker gebruikt om de LF-drift te vermijden. Bij de piëzoresistieve opnemers verviel de ladingversterker. In tabel 2 is een lijst van de gebruikte apparatuur gegeven.

onderdeel	merk, type			
versnellings-	Endevco	bereik	± 25 g	
opnemers	model 2262-25	voeding	10,0	V
no 1	FC 95	gevoeligheid	17,6	mV/g
2	GX 04 H	gevoeligheid	21,6	mV/g
3	EY 92	gevoeligheid	19,3	mV/g
4	FL 93	gevoeligheid	18,7	mV/g
5	FD 38	gevoeligheid	22,0	mV/g
6	FL 58	gevoeligheid	22,6	mV/g
7	HF 03	gevoeligheid	21,8	mV/g
8	GR 78 H	gevoeligheid	18,6	mV/g
9	PE 20	gevoeligheid	22,6	mV/g
10	KL 29	gevoeligheid	22,5	mV/g
11	HC 60 H	gevoeligheid	21,6	mV/g
12	GX 06	gevoeligheid	20,2	mV/g
13	GT 32 H	gevoeligheid	21,4	mV/g
	Endevco			
	model 221/AM20			
14	AJ 92	gevoeligheid	11,21	pC/g
15	AK 96	gevoeligheid	11,2	pC/g
16	AK 04	gevoeligheid	11,33	pC/g
	Bruel & Kjaer			
	model 226 C			
17	DY 61	gevoeligheid	3,09	pC/g
	Bruel & Kjaer			
	model 4322			
	no. 994937			
18	x-richting	gevoeligheid	9,64	pC/g
19	y-richting	gevoeligheid	9,77	pC/g
20	z-richting	gevoeligheid	9,75	pC/g

Tabel 2 Gebruikte apparatuur

onderdeel	merk, type			
triltafel	Ling dynamic systems model 825 L			
sliptafel	Kimball model 3094			
voeding	TNO	voeding	10	V
lading- versterker (3x)	Bruel & Kjaer model 2512	versterking	1	mV/pC
lading- versterker	Bruel & Kjaer model 2626	versterking		mV/pC
lading- versterker (2x)	Endevco model 2735	versterking		mV/pc
operationele versterkers	Burr Brown	versterking	1/10/100/200 500/1000	V/V
hoogdoorlaat- filters	Krohn hite	doorlaatfreq.	1	Hz
laagdoorlaat- filters	TNO	afbreekfreq.	100	Hz
encoder	Kayser			
instrumentatie recorder	Ampex model PR 2230	snelheid	15	ips
oscilloscoop	HP 1201 B			
decoder	Kayser			
Fourier- analyzer	HP 5451 C	blokgrootte	2048	samples
		inleestijd	2	s

Vervolg tabel 2: Gebruikte apparatuur

4.3. UITWERKING VAN DE MEETRESULTATEN

Het schema van figuur 8b geeft de werkwijze bij de signaalbewerking weer. De gebruikte apparatuur met bereik en gevoeligheid is in tabel 2 vermeld. De geregistreeerde signalen werden gereproduceerd via de analoge uitgang van de PCM-decoder. Deze signalen werden met 4 tegelijk op de Fourier-Analyzer in blokken van 2048 samples ingelezen met een samplefrequentie van 1024 Hz. Dit betekent voor 35 Hz ongeveer 29 punten per sinus. De sweepduur bedroeg ca 174 s zodat achtereen 87 blokken konden worden ingelezen met behulp van de ADC-through-put.

De overdrachtsfuncties werden bepaald uit de dichtheidspectra van de verschillende meetsignalen volgens :

$$H_{yx}(f) = \frac{G_{xy}}{G_{xx}}$$

waarin:

G_{xy} = kruisdichtheidspectrum van het ingaande en het uitgaande signaal.

G_{xx} = dichtheidspectrum van het ingaande signaal.

Bovendien werd de coherentiefunctie $\gamma_{yx}(f)$ bepaald:

$$\gamma_{yx}(f) = \frac{(|G_{xy}|)^2}{G_{xx} G_{yy}}$$

G_{yy} = dichtheidspectrum uitgaande signaal.

De coherentiefunctie kan waarden aannemen tussen 0 en 1. Een coherentie van 0 betekent dat de signalen $x(t)$ en $y(t)$ in geen enkel opzicht met elkaar in verband staan (incoherent zijn); met andere woorden afkomstig zijn van verschillende onafhankelijke bronnen. Een coherentie van 1 betekent dat het uitgangssignaal uitsluitend afkomstig is van het ingangssignaal: er waren in de meting geen storingsbronnen aanwezig en er was geen sprake van ruis in het meetcircuit die het resultaat, de overdrachtsfunctie, beïnvloed hebben.

In de aanstootrichting zijn verschillende overdrachtsfuncties bepaald, van de stoel naar het bekken, van de stoel naar de zittingopnemer, en bij verticale aanstoting ook van de stoel naar het hoofd.

Daar, waar meerdere opnemers in één richting zijn gebruikt (stoelzitting 3 opnemers; bekken 2 opnemers) werd het gemiddelde signaal van deze opnemers gebruikt, zodat eventueel opgetreden rotaties geëlimineerd zijn. Van iedere meting en zijn duplo werd de gemiddelde overdrachtsfunctie bepaald.

4.4. BESPREKING VAN DE RESULTATEN

De coherentie was in het algemeen ongeveer 0,9 wat voor metingen aan levende mensen als goed mag worden beoordeeld. Alleen bij de overdrachtsfuncties naar het hoofd was de coherentie beneden de 6 Hz en boven de 23 Hz slechter dan 0,5. Karakteristieke voorbeelden van coherentiefuncties zijn weergegeven in figuur 9.

De reproduceerbaarheid was over het algemeen binnen 10 % (incidenteel 25 %), hetgeen bleek uit de resultaten van de uitgevoerde duplometingen.

De figuren 10 en 11 geven voor een houten zitting bij verticale aanstoting de overdrachtsfuncties van de stoelzitting naar het hoofd, naar het bekken en naar de zittingopnemer. Uit deze figuren kan in de eerste plaats de konklusie getrokken worden dat een meting aan het hoofd voor lichaamstrillingen (in zittende houding, verticale aanstoting via de zitting) minder geschikt is. Zie verder hoofdstuk 4.5. voor een vergelijking van de gemeten overdrachtsfunctie naar het hoofd met literatuur gegevens.

De figuren 12 t/m 14 geven de overdrachtsfuncties van de zitting naar de zittingopnemer voor een houten zitting.

Bij het gebruik van een harde stoelzitting geeft de zittingopnemer vrij nauwkeurig de trillingen van de stoelzitting weer.

Een zachte stoelzitting zal zelf als veer gaan fungeren. De overdrachtsfunctie zal daardoor beïnvloed worden.

De figuren 15 t/m 17 geven de overdrachtsfuncties van zitting naar zittingopnemer voor een zachte zitting. De overdrachtsfunctie blijkt door de zachte zitting vooral te veranderen bij aanstoting in de Z-richting.

Nagegaan dient te worden of de zittingopnemer zelf de overdracht van de zitting naar de mens beïnvloedt, met andere woorden of de overdracht van de zitting naar het bekken verandert door tussenplaatsing van de zittingopnemer.

De figuren 18 t/m 23 geven de overdrachtsfuncties van de zitting naar het bekken voor een houten zitting.

De figuren 24 t/m 29 geven de overdrachtsfuncties van de zitting naar het bekken voor een zachte zitting.

Het verschil in de trillingsoverdracht met en zonder zittingopnemer ligt

in het algemeen binnen de spreiding der duplometingen, behalve wellicht de pieken die werden gevonden bij proefpersoon B. We konkluderen hieruit dat de zittingopnemer de, door ons toegepaste, zachte zitting nauwelijks heeft verstijfd, en dat derhalve de zittingopnemer bij toepassing op een dergelijke zitting de trillingen van het scheidingsvlak lichaam/zitting goed weergeeft.

Verder is het belangrijk om vast te stellen of de overdracht van de zittingopnemer naar het bekken bij een zachte zitting verandert ten opzichte van die overdracht bij een harde zitting.

De figuren 30 t/m 35 geven de overdrachtsfuncties van de zittingopnemer naar het bekken.

Bij aanstoting in de X-richting en bij aanstoting in de Z-richting blijft de transmissie vrijwel onveranderd.

Bij aanstoting in de Y-richting wordt de transmissie bij de zachte zitting veel kleiner dan bij de houten zitting. Blijkbaar wordt voor trillingen in de Y-richting de situatie door het schuimrubber kussen zodanig veranderd dat, vooral boven 10 Hz, de trillingsoverdracht naar het bekken afneemt.

Bij de horizontale aanstotingen (X- en Y-richting) is de overdrachtsfunctie van de zittingopnemer naar het bekken enigszins gelijkvormig met de door ISO-2631 gegeven gevoeligheidskromme, zie de figuren 30, 31, 33 en 34.

Bij de verticale aanstoting bevindt zich tussen de 12 en 15 Hz een piek die in de ISO-gevoeligheidskromme niet terug te vinden is. Volgens

Rublack [15] zou die veroorzaakt worden door een eigenfrequentie waarbij de elasticiteit van de wervelkolom een rol speelt.

Opgemerkt dient te worden dat hier met min of meer harmonische signalen gewerkt is.

Noot (red.) 10. De triltafel wordt gestuurd met een sinusvormig signaal.

Doordat de belasting van de triltafel (voor de proeven in Z richting) en die van de z.g. sliptafel (voor de proeven in X- en Y-richting) niet geheel symmetrisch is, treden vervormingen op van het signaal.

Stochastische signalen geven bij frequenties tot ca 10 Hz mogelijk een ander beeld, vanwege de in [20] genoemde actieve compensatie.

De responsie van het bekken is bij excitatie in de Y-richting veel groter (globaal een factor 10 bij ca 5 Hz) dan bij excitatie in de X-richting. Deze grotere responsie was met het oog waarneembaar. Wat dat betreft is er geen reden om aan de gepresenteerde resultaten te twijfelen. Men zou op grond van deze resultaten verwachten dat er een verschil in effect (de subjectieve beoordeling) tussen X- en Y-richting zou worden gevonden. De geraadpleegde literatuur geeft hiervoor echter geen enkele aanwijzing. Griffin e.a. [24] vonden geen meetbaar verschil in de beoordeling van trillingen in X- en Y-richting. Zoals Osborne [22] terecht opmerkt is de onderbouwing van ISO 2631 voor horizontale trillingen gebrekkig. Men ging veelal uit van resultaten van metingen door spoorwegmaatschappijen en die zijn moeilijk of niet toegankelijk. Toch zou men verwachten dat als er een groot verschil tussen de gevoeligheid voor trillingen in X- en Y-richting bestaat, dit in het verleden wel zou zijn gepubliceerd. Verder onderzoek op dit gebied lijkt gewenst.

4.5. VERGELIJKING VAN DE RESULTATEN MET DIE VAN ANDERE ONDERZOEKERS

De gemeten overdrachtsfuncties van de stoelzitting naar het hoofd zullen worden vergeleken met de resultaten van andere onderzoekers.

Uit de literatuur kan men konkluderen dat de gevonden transmissiemetingen slechts over het frequentiegebied van 0,5 tot 30 Hz betrouwbaar zijn. Op de bij onze studie gebruikte triltafel zijn trillingen beneden 5 Hz niet goed te realiseren.

De trillingsoverdracht wordt sterk beïnvloed door de lichaamshouding, de lichaamsbouw en de vorm van de stoel [1],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9]. De resultaten van Pradko ea [2] geven heel andere overdrachtsfuncties dan de in deze studie verkregen overdrachtsfuncties. Pradko vindt eigenfrequenties rond 4 Hz en 19 Hz. In dit rapport zijn eigenfrequenties rond 9-10 Hz met een grote damping gevonden, zie figuur 36. Het grootste verschil tussen beide onderzoeken is dat Pradko bij zijn proeven een rugsteun gebruikt heeft, wat hier niet gebeurd is. Bovendien zijn bij het IWECO-onderzoek de frequenties beneden de 5 Hz buiten beschouwing gelaten. Mogelijk zit in dit gebied de eerste eigenfrequentie die Pradko rond 4 Hz vond. De overdrachtsfunctie vanaf 3,5 Hz uit hoofdstuk 4.6. wijst ook in die richting.

Rao [9] heeft metingen uitgevoerd zowel met als zonder rugsteun. Hij vond in beide gevallen eigenfrequenties rond 5 en 15 Hz. Zonder rugsteun werd de amplitude bij 15 Hz veel lager.

Griffin ea [4],[5],[11] vonden eigenfrequenties rond 5 en 12 Hz. Griffin ea [5] merken op dat de spreiding van de resultaten afneemt naarmate de sweepduur toeneemt, zie figuur 37. Op grond daarvan zou men moeten aannemen dat de door IWECO uitgevoerde metingen betrouwbaar zijn.

De methode voor het meten van de trillingsresponsie van het hoofd bij Griffin was anders. Hij gebruikte een door een nylon slang omgeven roestvrij stalen staaf die dwars (in de Y-richting) tussen de kiezen geklemd werd. Bij het hier gerapporteerde onderzoek werd de "bite-bar" volgens Barton [16] toegepast. Deze werd tussen de voorste twee kiezen (boven en onder) geklemd.

Barton heeft geen overdrachtsfuncties van zitting naar hoofd gepubliceerd. Rao liet de versnellingsopnemer tussen de voortanden klemmen. Pradko gaf in [2] helemaal niet aan hoe de trillingsresponsie van het hoofd werd gemeten. Aanvullend onderzoek op dit gebied zou zeer worden toegejuicht.

4.6. KONTROLE VAN DE OVERDRACHTSFUNCTIES VAN DE STOELZITTING NAAR HET HOOFD

Omdat de overdrachtsfuncties van de stoelzitting naar het hoofd enigszins afwijken van die van andere onderzoekers is de signaalbewerking verschillende keren gecontroleerd. Om tenslotte volledige zekerheid te krijgen omtrend de juistheid van de resultaten is de overdracht van de stoelzitting naar het hoofd opnieuw bepaald.

Deze meting is uitgevoerd met een proefpersoon van 70 kg, 1,83 m lengte en een leeftijd van 27 jaar. De kontrolemeting is uitgevoerd met een hoger signaalnivo (ca. 3 m/s^2), waarbij de auteur sterk de indruk had dat zeker tot 15 Hz sterke rotatietrillingen van het hoofd optraden. De hierbij verkregen overdrachtsfuncties worden in figuur 38 samen met de eerder verkregen overdrachtsfuncties gepresenteerd.

Het verschil in amplitude bij de lagere frequenties tussen de eerdere meting en de kontrolemeting zou mogelijk veroorzaakt kunnen worden door rotatietrillingen van het hoofd.

Eénmaal is met een sinussweep tussen de 3,5 en 15 Hz aangestoten. De resultaten daarvan bevestigen de, in hoofdstuk 5 genoemde, waarschijnlijkheid dat de eerste eigenfrequentie beneden de 5 Hz ligt. Bovendien lijkt er een soort inslingeren van het lichaam plaats te vinden. Dit zou mogelijk een effect kunnen zijn van de in [20] genoemde actieve compensatie.

In ieder geval zal duidelijk zijn dat, bij de interpretatie van de overdrachtsfuncties van de stoelzitting naar het hoofd grote voorzichtigheid betracht dient te worden.

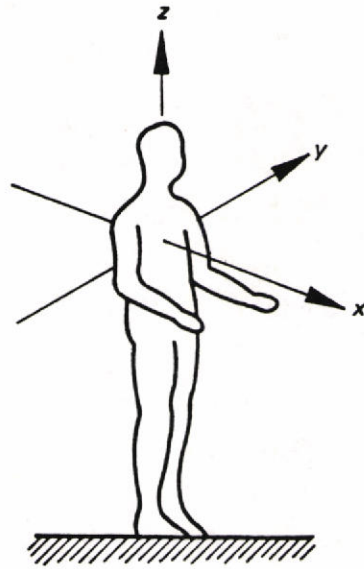
4.7. LITERATUUR

1. ISO Draft proposal: mechanical transmissibility of the human body.
1981 (ISO/TC 108/SC 4N)
2. Pradko, F.; Lee, R.; Kaluza, V.
Theorie of human vibration response.
(ASME, 66-WA/BHF-15, 1966)
3. Barnes, G.R.; Rance, B.H.
The transmission of angular acceleration to the head of the seated human subject.
(AGARD-CP-145 1975)
4. Griffin, M.J.; Whitham, E.M.; Parsons, K.C.
Vibration and comfort. 1.
Translational seat vibration. (Ergonomics 1982)
5. Griffin, M.J.; Lewis, C.H.; Parsons, K.C.; Whitham, E.M.
The biodynamic response of the human body and its application to standards.
(AGARD-CP-253 1979)
6. Harray, C.B.; Schoenberger, R.W.
Effect of body supination angle on subjective response to WBV.
(Aviation, space and environmental medicine 1981)
7. Osborne, D.J.; Boarer, P.A.
Subjective response to WBV, the effects of posture.
(Ergonomics 1982)
8. Osborne, D.J.; Heath, T.O.; Boarer, P.
Variation in human response to WBV.
(Ergonomics 1981)
9. Rao, B.K.N.
Bio-dynamic response of human head during WBV conditions.
(Shock & vibration bulletin 1982)

10. During, J.; Goudfrooy, H.; Beeker, Th.W.
Function of the lower back in man.
Progress Report 4 (1974) Inst. Med. Phys.)
11. Griffin, M.J.
Biodynamic response to WBV.
(Shock & vibration Digest 1981-13/9)
12. Miwa, T.
Guides for human exposure to WBV.
(Inter noise 1975)
13. Donati, P.M.; Bonthoux, C.
Biodynamic response of the human body in the sitting position when sub-
jected to vertical vibration.
(Journal of sound and vibration 1983-90/3)
14. Payne, P.
On quantizing ride comfort and allowable accelerations.
(Paper at SNAME meeting on advanced marine vehicles, 76-874, 1976)
15. Rublack, H.
Wirkungen mechanischer schwingungen auf den organismus.
(Zeitschrift fur die gesamte hygiene und ihre grenzgebiete 1978)
16. Barton, J.C.; Hefner, R.E.
Whole-body vibration levels: a realistic baseline for standards.
(SAE paper 760415, 1976)
17. Wasserman, D.E.; Asburry, W.C.; Doyle, T.E.
Human response to vibration and shock.
(Shock & vibration bulletin 1979)
18. ISO.
Guide for the evaluation of human exposure to WBV. 1978
(ISO 2631).
19. ISO.
Amendment 1 : Guide for the evaluation of human exposure to WBV.
1982 (ISO 2631-1978/AMENDMENT 1)

20. Francken, A.J.
Trillingen op de arbeidsplaats, meettechniek, literatuurstudie.
(IWECO rapport 5032022-84-1, 1984)
21. Krause, P.; Panzke, K.J.
Probleme der Ankopplung der Schwingungsaufnehmer bei der messung von
Ganzkoerperschwingungen.
Ergonomische Berichte 1975)
22. Osborne, D.J.
A critical assessment of studies relating WBV to passenger comfort.
(Ergonomics 1976 19/6)

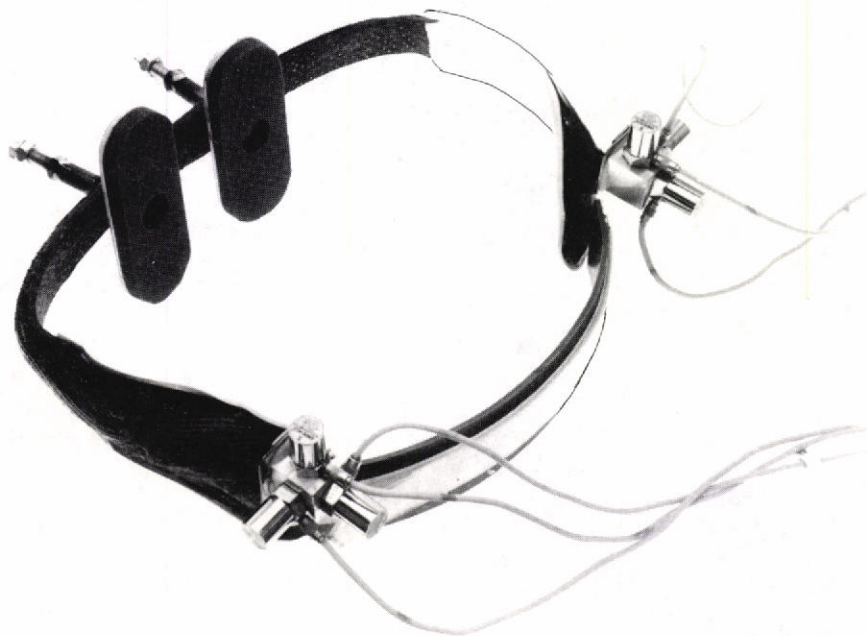
4.8. Illustraties



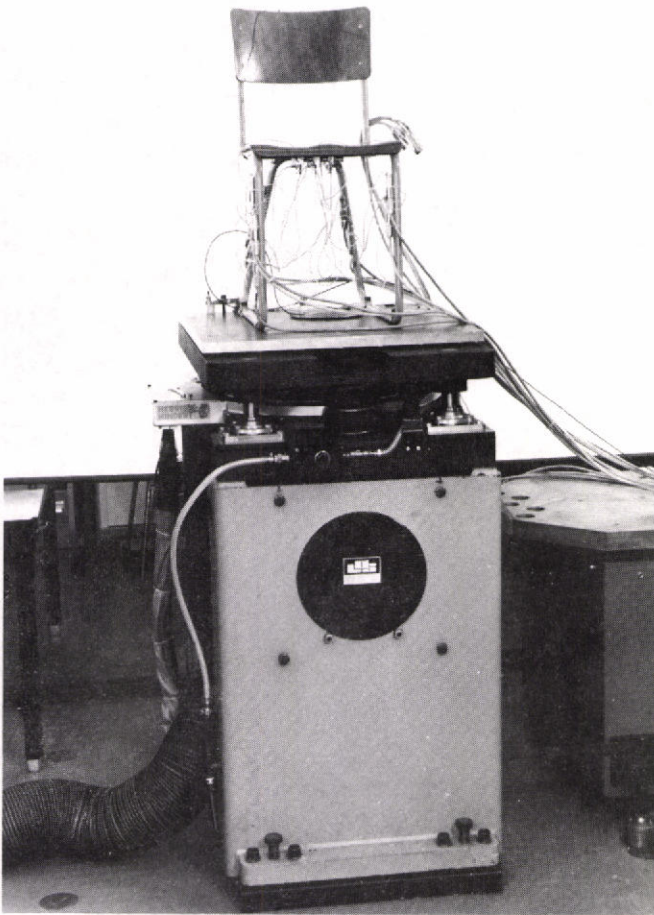
Figuur 1. Meetrichtingen



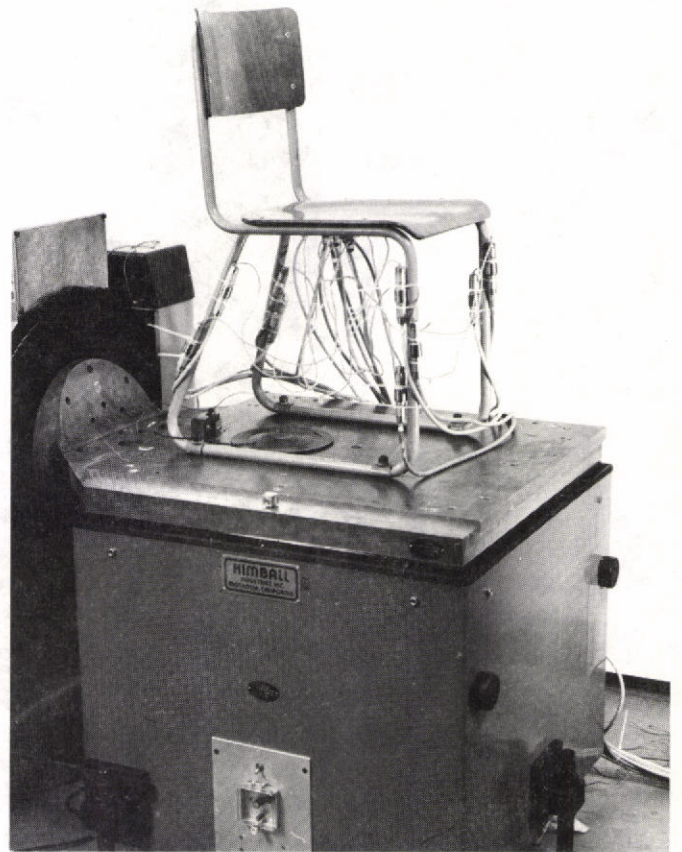
Figuur 2. Mondadapter met tandafdruk



Figuur 3. Meetbeugel voor trillingsmetingen aan het bekken

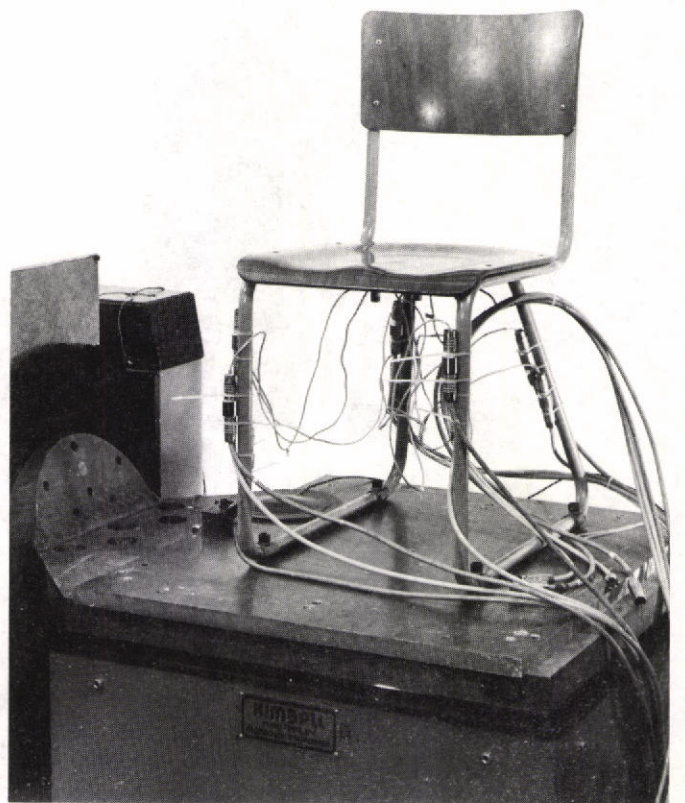


Figuur 4.
In Z-richting

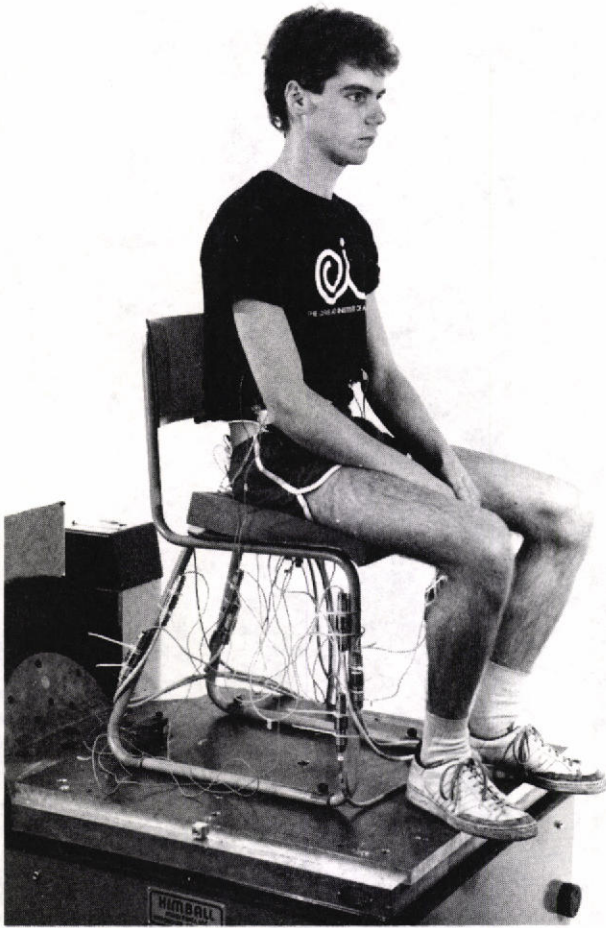


Figuur 5.
In X-richting

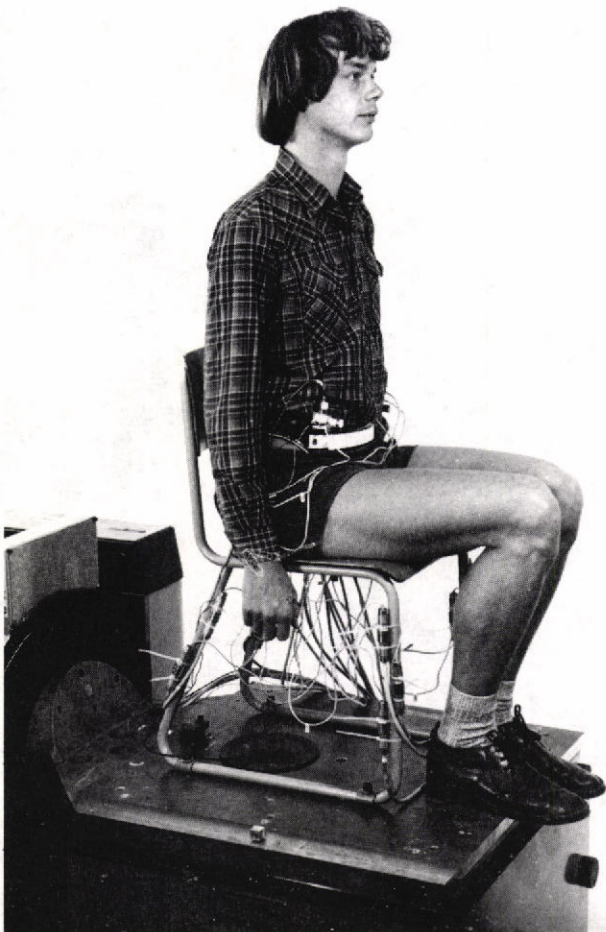
Stoel gereed voor excitatie



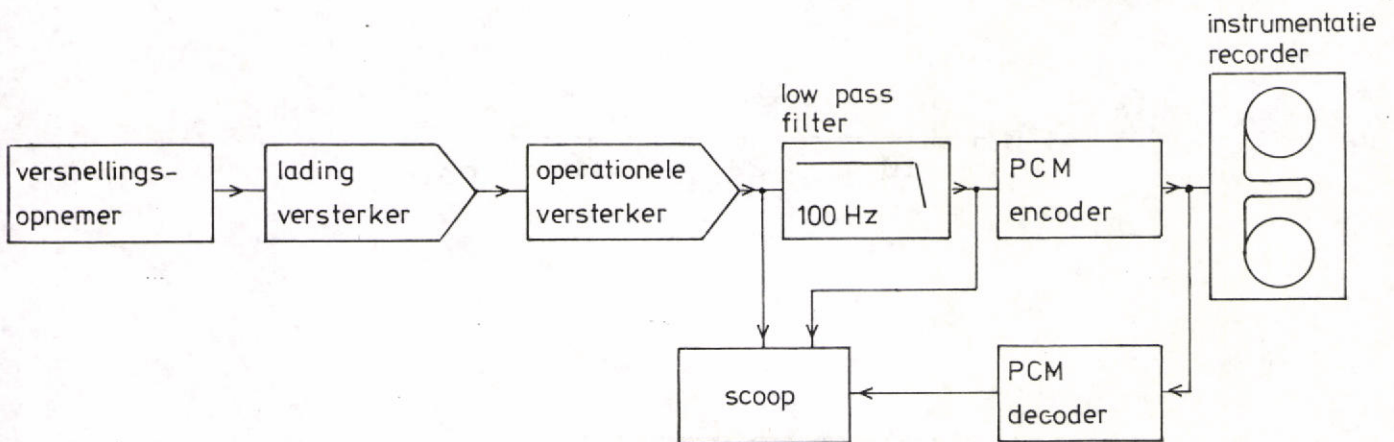
Figuur 6.
In Y-richting



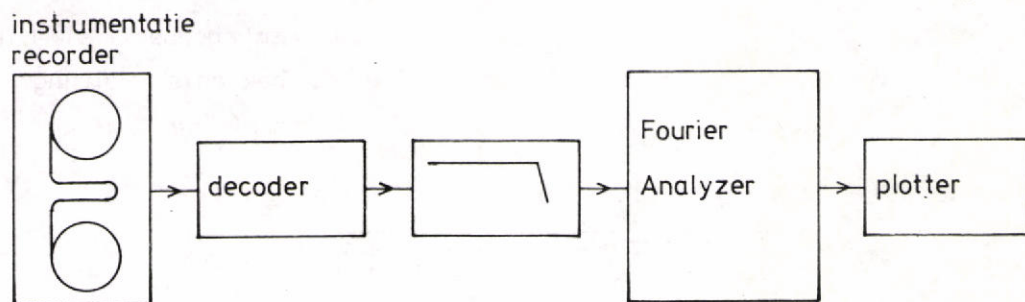
Figuur 7a. Proefpersoon A



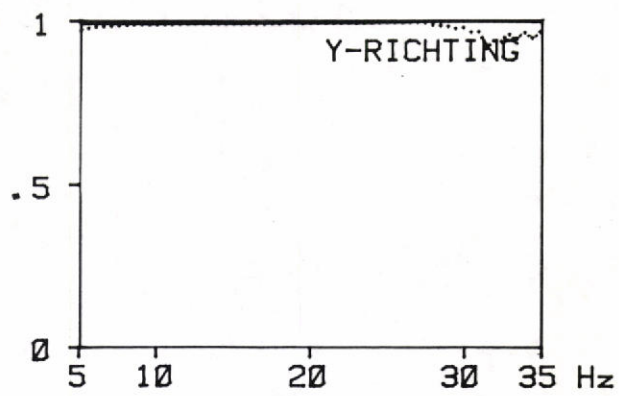
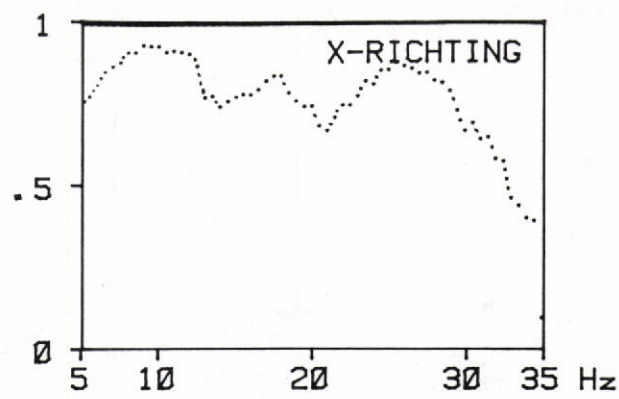
Figuur 7b. Proefpersoon B



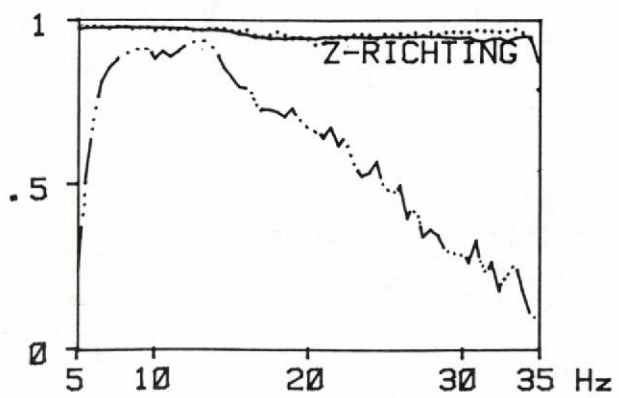
Figuur 8a. Schematische voorstelling van het meetcircuit



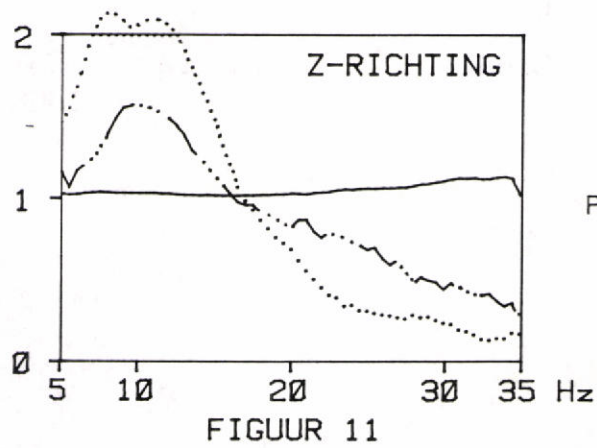
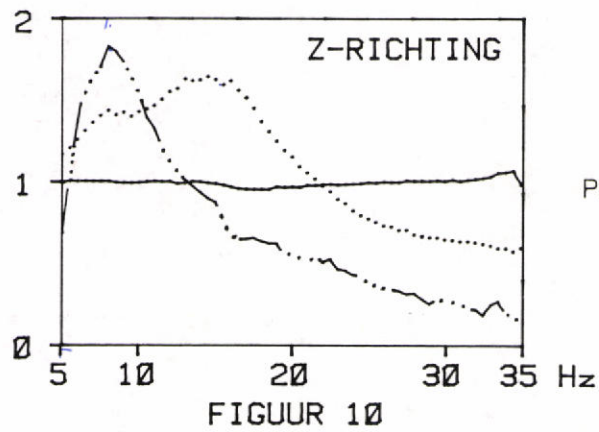
Figuur 8b. Schematische voorstelling van de signaalbewerking



— zittingopnemer/stoelzitting
..... bekken/stoelzitting
- - - hoofd/stoelzitting



Figuur 9. Voorbeelden van coherentiefuncties



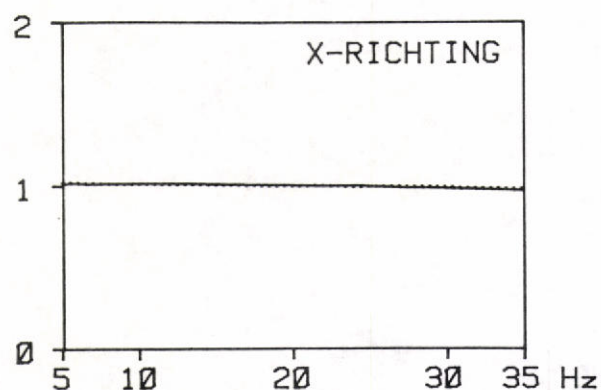
Houten zitting

— zittingopnemer/stoelzitting

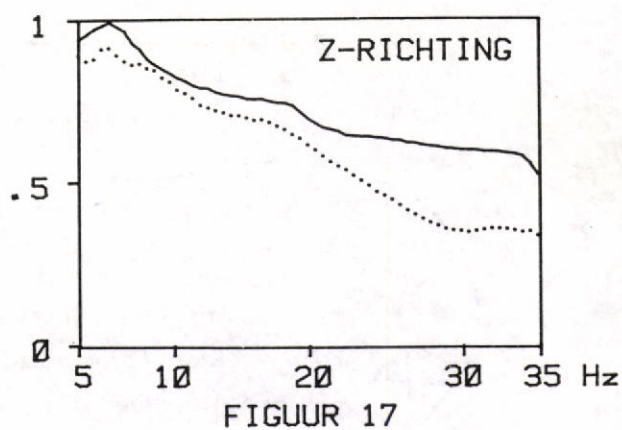
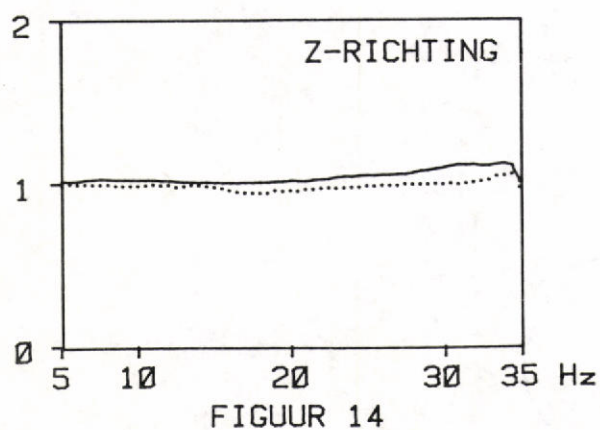
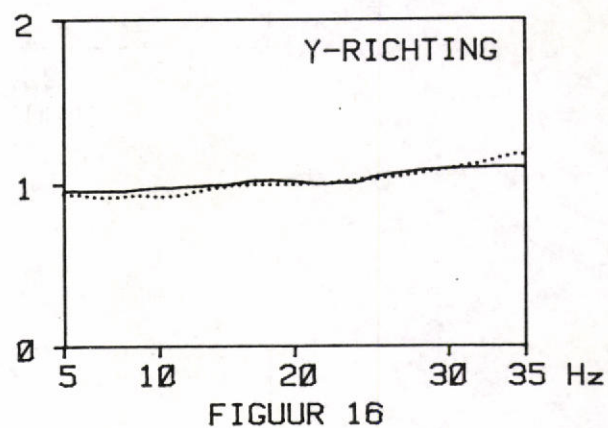
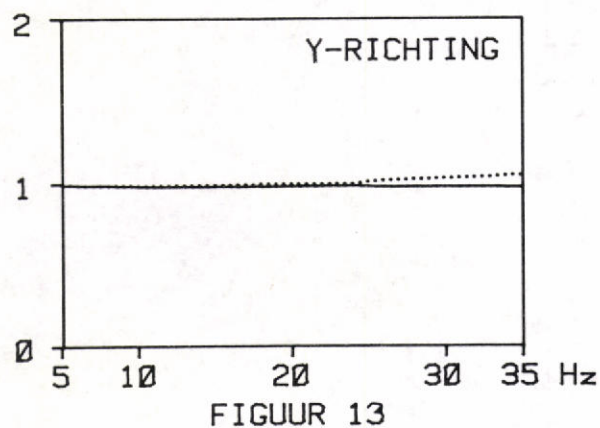
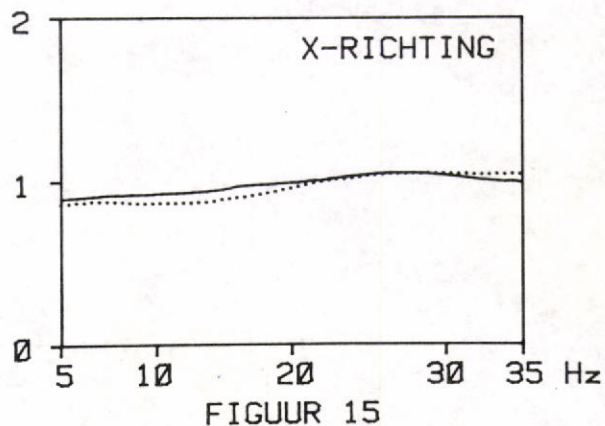
..... bekken / stoelzitting

— hoofd/stoelzitting

Houten zitting



Zachte zitting



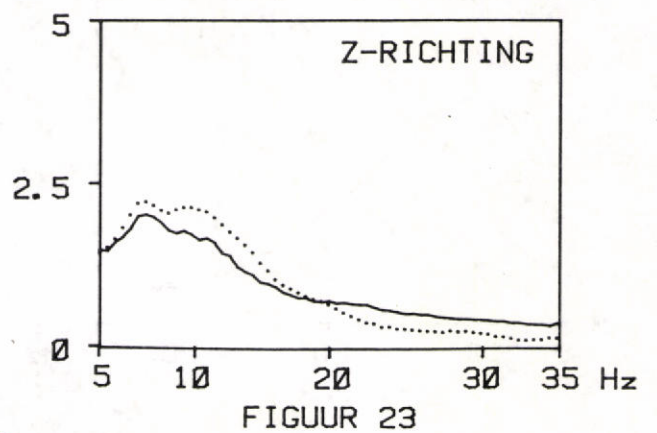
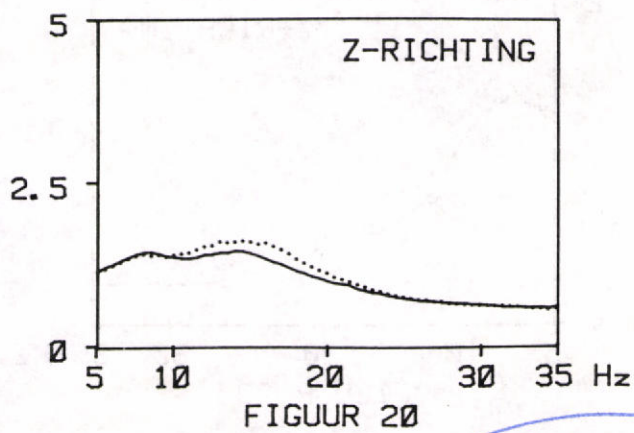
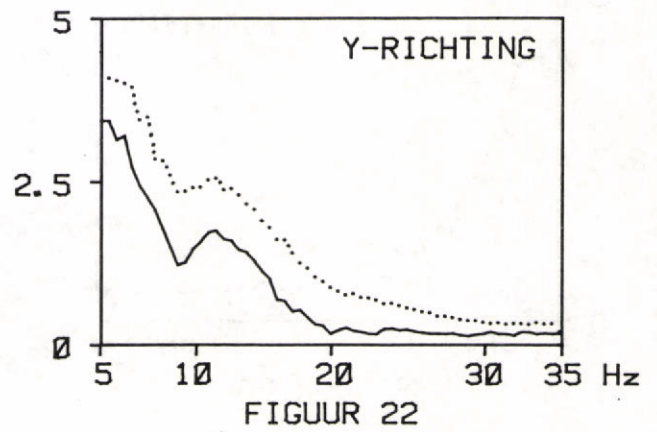
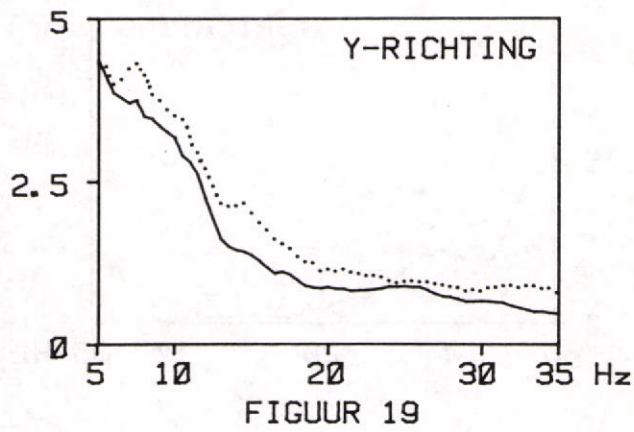
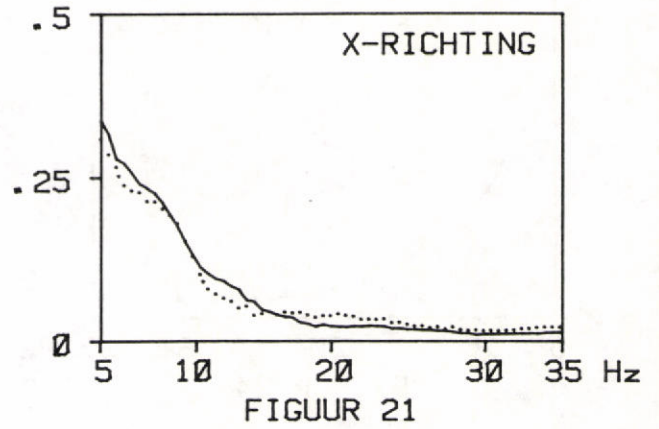
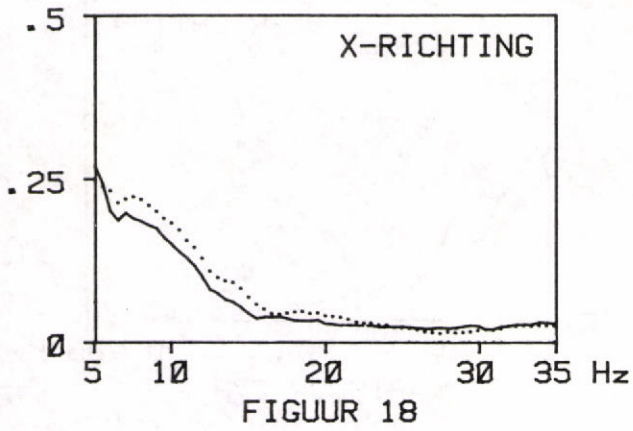
Zittingopnemer / stoelzitting

..... proefpersoon A

—— proefpersoon B

Proefpersoon A

Proefpersoon B

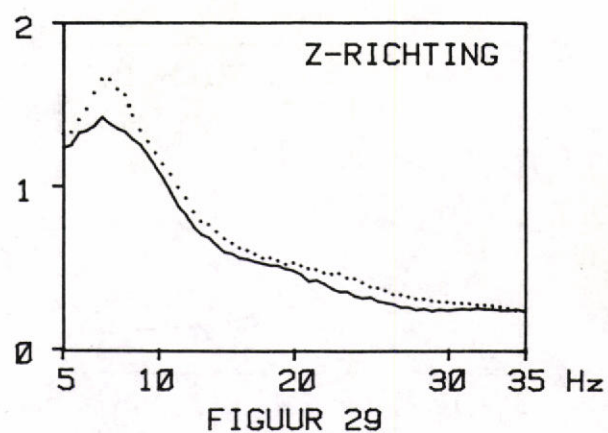
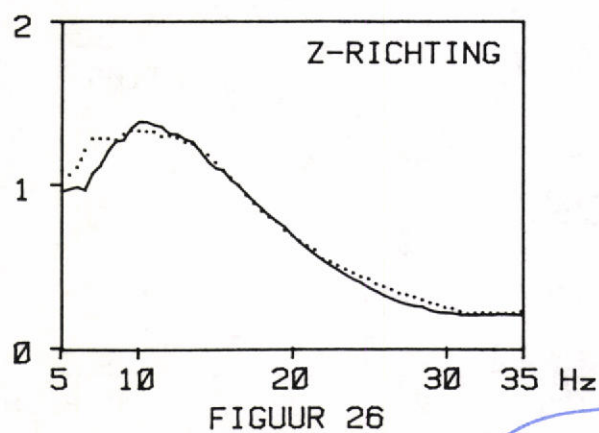
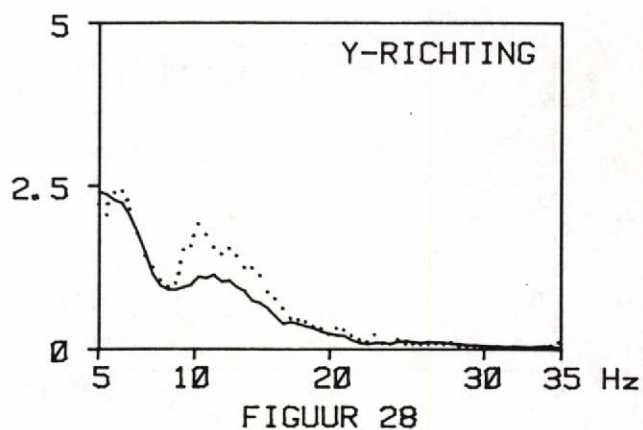
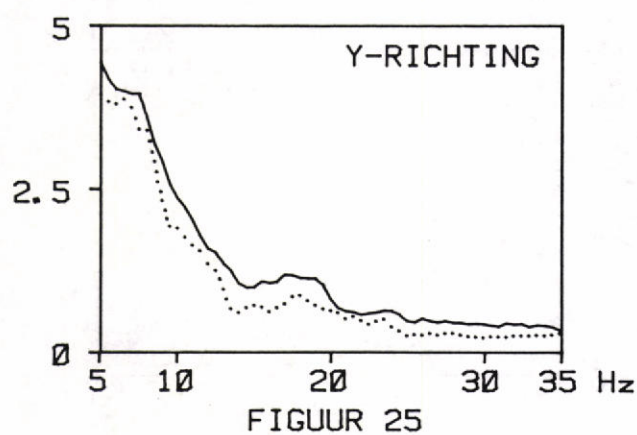
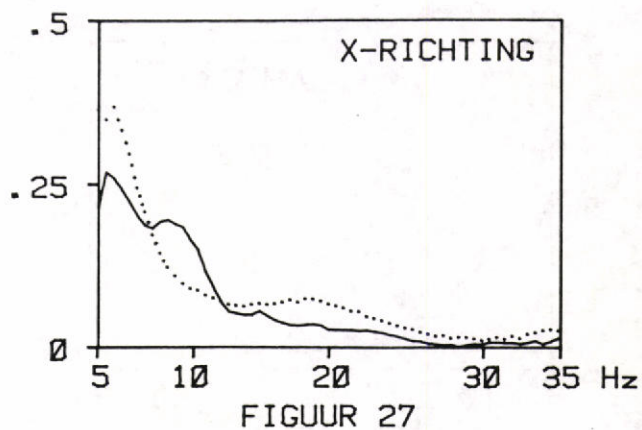
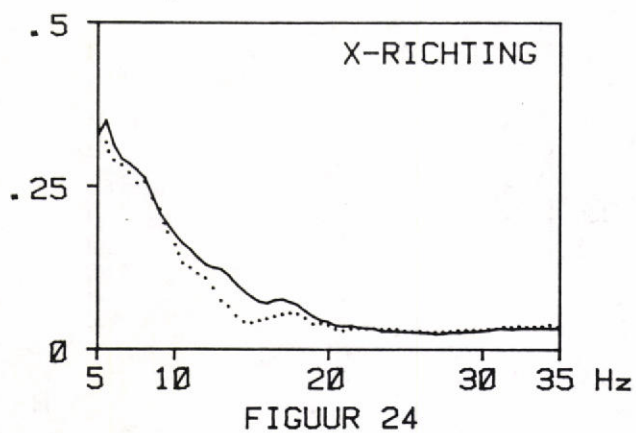


Bekken/stoelzitting

Houten zitting

..... met zittingopnemer

— zonder zittingopnemer

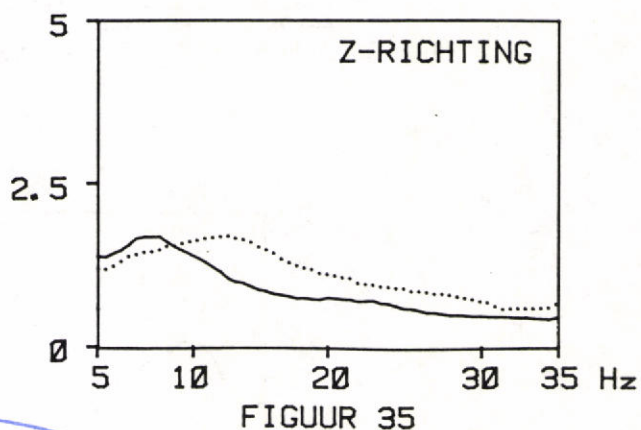
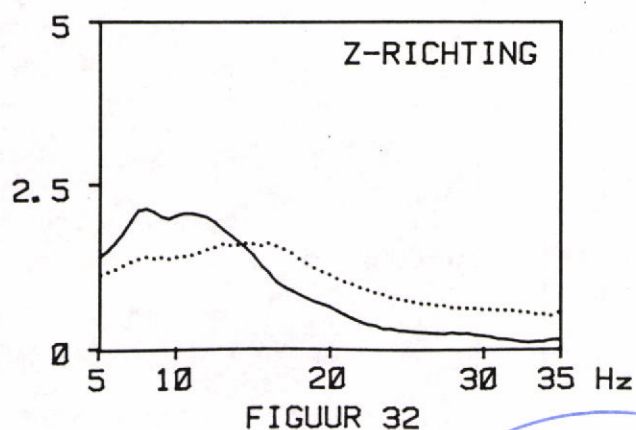
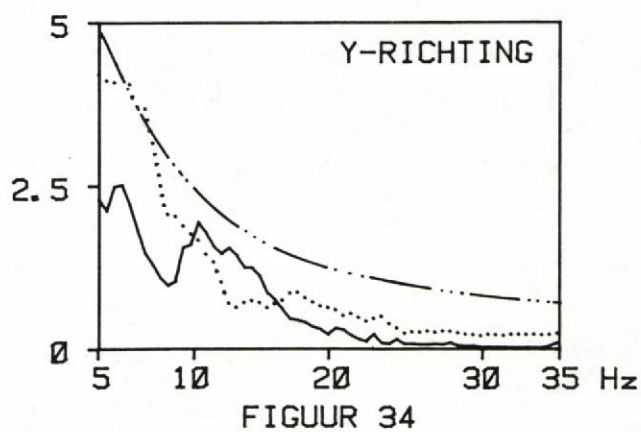
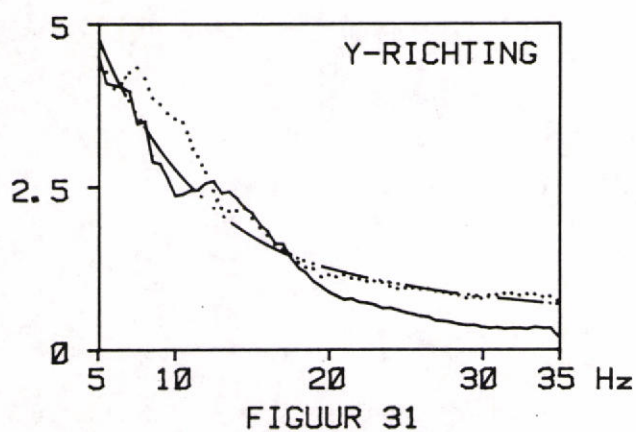
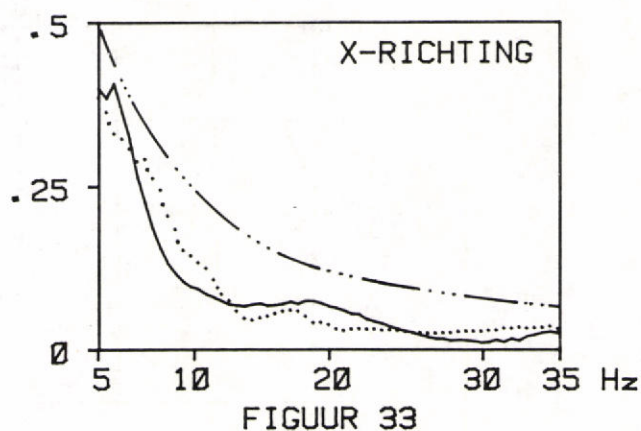
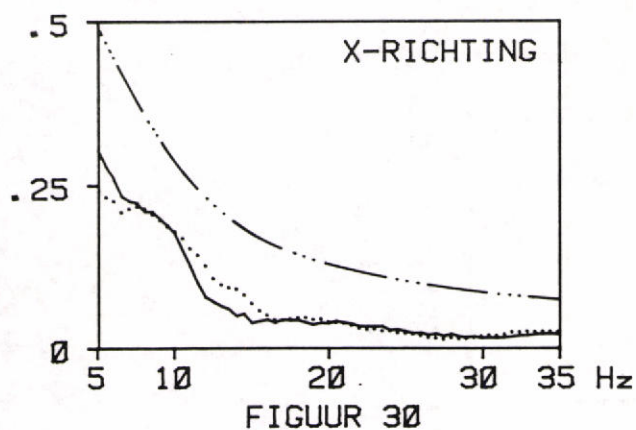


Bekken/stoelzitting

Zachte zitting

..... met zittingopnemer

— zonder zittingopnemer

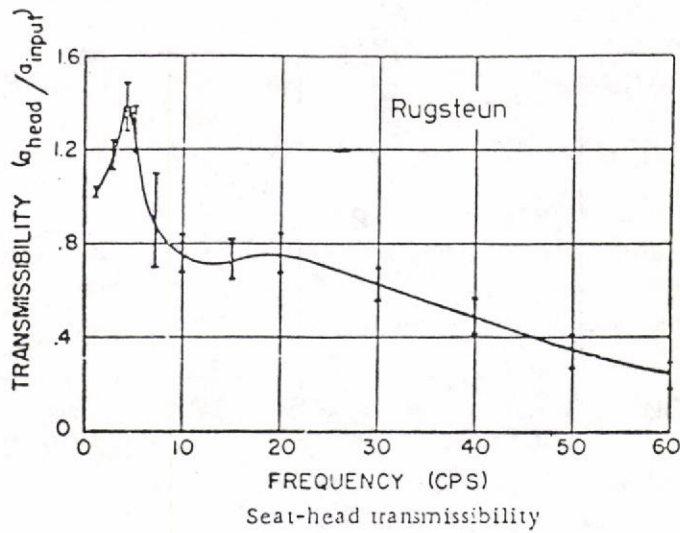


Bekken/ zittingopnemer

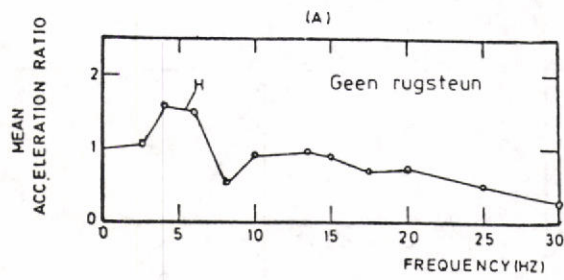
..... proefpersoon A

———— proefpersoon B

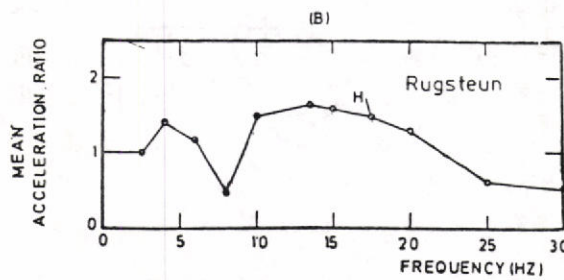
— · — · — · gevoeligheid voor horizontale trillingen vlgs ISO 2631



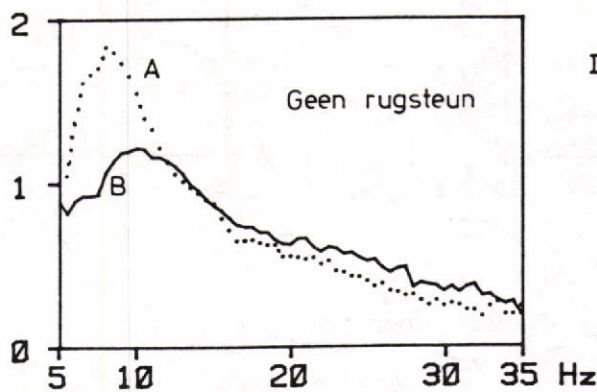
PRADKO e.a. [2]



RAO [9]

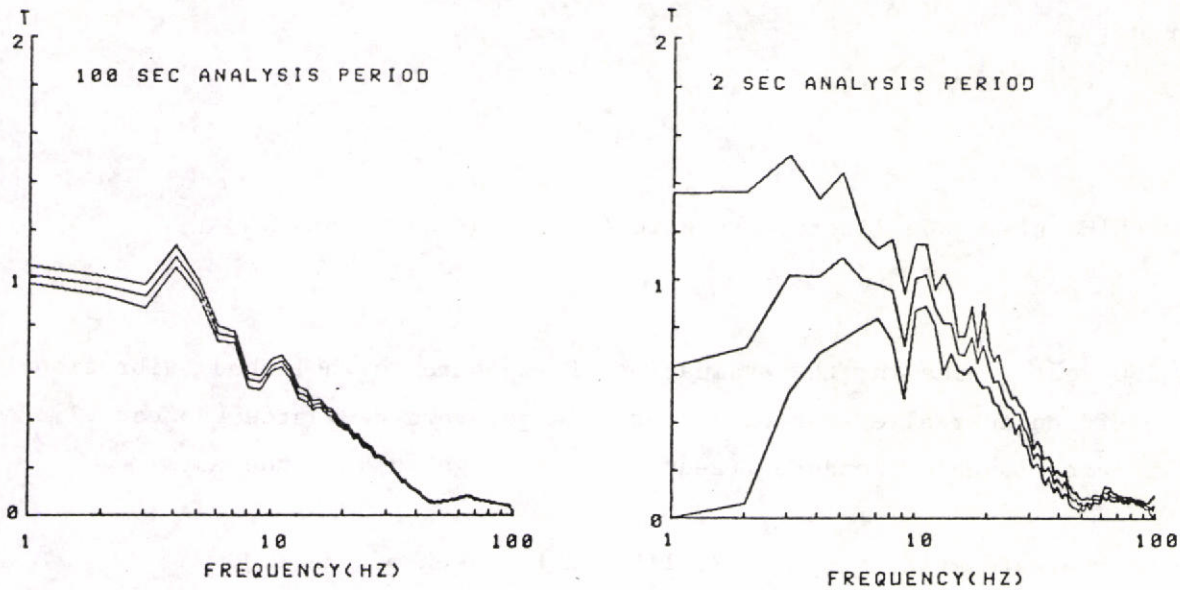


HEAD RESPONSE OF SEATED SUBJECTS
(A) Ss SITTING STRAIGHT (UNRESTRAINED AND NOT LEANING
AGAINST THE BACKREST) (B) Ss SITTING STRAIGHT
(UNRESTRAINED AND LEANING AGAINST THE BACKREST)



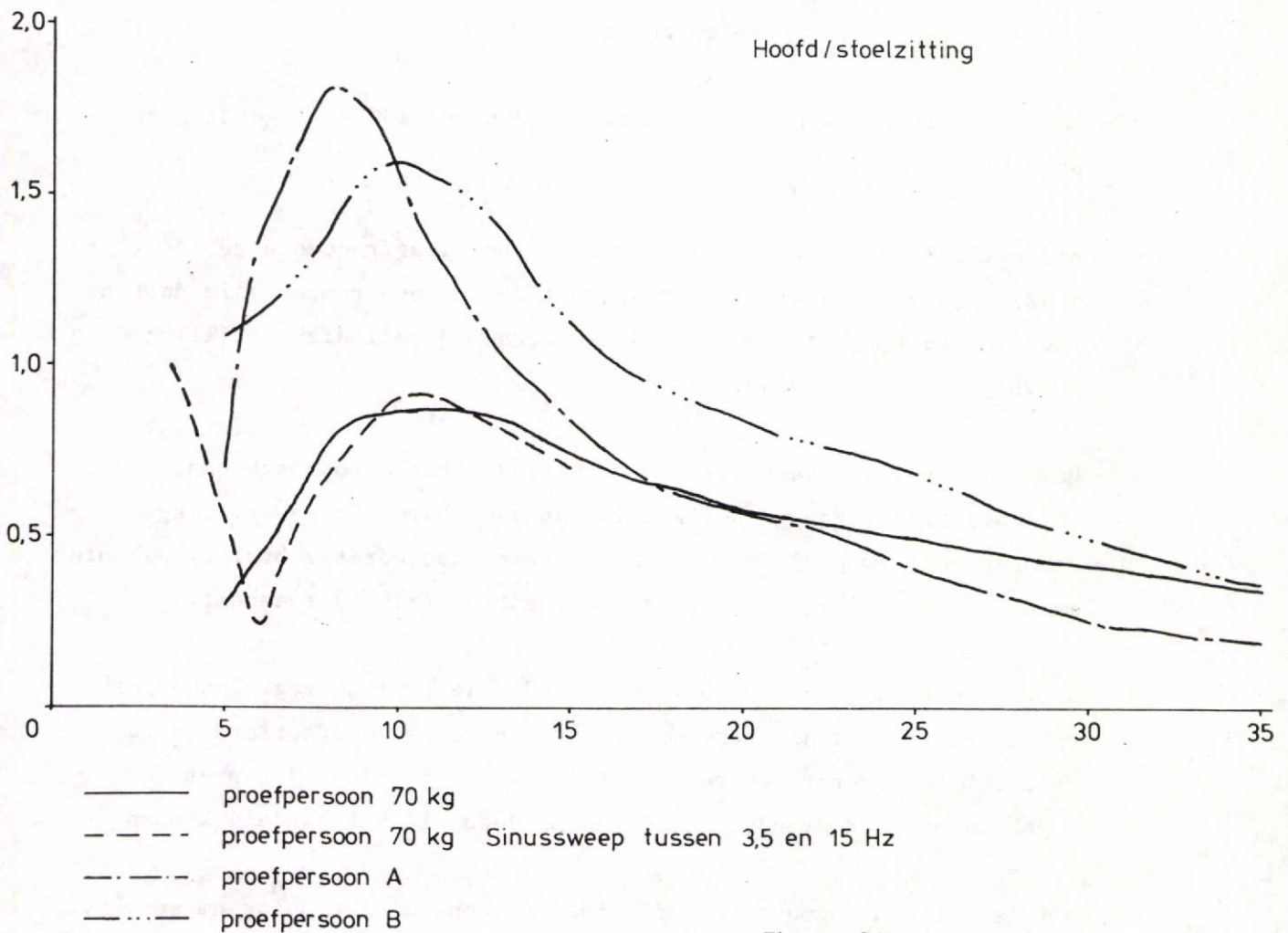
IWECO

Figuur 36. Vergelijking van overdrachtsfunctie hoofd/zitting. Z-richting



Comparison of the mean seat-to-head transmissibility and 5th and 95th percent confidence intervals for sweeps with durations (and computer acquisitions) of 100 seconds and 2 seconds.

Figuur 37.



Figuur 38.

5. KONKLUSIES

5.1. KONKLUSIES n.a.v. de literatuurstudie (hoofdstuk 2)

- a - ISO 2631, Guide for the evaluation of exposure to whole-body vibration, heeft ondanks alle kritiek die erop is geleverd de waarde van een internationaal erkende en reeds 10 jaar in gebruik zijnde norm.
- b - De sterkste kritiek op ISO 2631 heeft te maken met de tijd-afhankelijkheid. Deze kritiek is terecht, de onderbouwing is zeer zwak en sindsdien niet door betrouwbaar lijkend onderzoek verbeterd.
- c - Ook op de weegkrommes van ISO 2631 is erg veel kritiek geleverd. Maar alle onderzoeken op dit punt ten spijt, is er geen duidelijk alternatief naar voren gekomen. Daarvoor was de spreiding van de resultaten van de vele onderzoekers te groot.
- d - De beoordeling van harmonische trillingen met ISO 2631 geeft geen problemen.
- e - Bij periodieke trillingen, met name in het laagfrequente-gebied (1 tot 8 Hz) zijn er twijfels in verband met de actieve compensatie door het lichaam die volgens sommige onderzoekers bij periodieke trillingen en zwevingen wellicht minder goed is.
- f - Het staat vrijwel vast dat het menselijk lichaam voor stochastische (random) trillingen gevoeliger is dan voor harmonische trillingen, wanneer de (gewogen) RMS-waarde als criterium wordt gebruikt. Ook hier geldt dat het effect bij lagere frequenties (zie e) toeneemt.
- g - Hoewel de tekst van ISO 2631 in Sec. 3.3 letterlijk zegt "when peak values are measured, these must be converted as appropriate to rms values before reference to the limits ...", betekent dit niet dat schokken of kortdurende trillingen op deze wijze behandeld kunnen worden:
Het is uit een oogpunt van trillings-responsie niet juist om schokken in RMS-waarden uit te drukken.

- h - Voor de beoordeling van de invloed van schokken en kortdurende trillingen (transients) zal een andere manier van signaalbewerking moeten komen. De literatuur geeft daaromtrent enige aanwijzingen.
- i - Met een zitting versnellingsopnemer kunnen in veel gevallen voldoende nauwkeurige metingen worden verricht, mits met de aanwijzingen volgens IWECO-rapport 5032022-84-2 (hoofdstuk 4 "onderzoek plaatsing opnemers") rekening wordt gehouden. De invloed van de rotatie is des te kleiner naarmate het rotatiemiddelpunt van de trillingen groter is dan 0,18 m. Bij die afstand zijn de responsies op slingeren en op translatie in dwarsrichting even groot.

5.2. KONKLUSIES en samenvattende informatie m.b.t de evaluatie meetapparatuur

- a - Het aantal beschikbare meetinstrumenten van het meten van hand-arm trillingen en/of "whole body vibration" is gering. Slechts een drietal instrumenten konden met elkaar worden vergeleken.
- b - Geen van de apparaten voldoet aan alle te stellen eisen.
- c - Met enkele aanpassingen zou de Ride Indexer van de firma Euchel Electronics B.V. een zeer bruikbaar instrument kunnen zijn.
- d - Momenteel wordt in ISO TC 108 / SC3 gewerkt aan de totstandkoming van een norm ISO / DP 8041 "Human response vibration measuring instrumentation".
- e - De bij de besproken apparaten geleverde "instruction manuals" behoeven een aanvulling ten behoeve van toekomstige gebruikers.

5.3. KONKLUSIES n.a.v. het onderzoek plaatsing opnemers

- a - Bij het gebruik van een harde stoelzitting geeft de zittingopnemer de trillingen van de stoelzitting goed weer.
- b - De zittingopnemer is goed bruikbaar om de trillingsbelasting van het menselijk lichaam in de X- en de Z-richting te bepalen. In de Y-

richting wordt de trillingsoverdracht naar het bekken beïnvloed door het type zitting.

- c - Bij aanstoting in de Y-richting is de responsie van het lichaam, vooral bij de lagere frequenties, zichtbaar groter dan in X-richting.
- d - Aanstoting in de Y-richting geeft een aanzienlijk hoger trillingsnivo van het bekken dan aanstoting in de X-richting. Men kan zich afvragen of een gelijke beoordeling van trillingen in X- en Y-richting wel juist is.
- e - Bij verticale aanstoting wordt tussen de 12 en 15 Hz een piek gevonden die in de ISO-gevoeligheidskromme niet terug te vinden is. Deze zou volgens Rublack [15] veroorzaakt kunnen worden door een eigenfrequentie die zou samenhangen met de elasticiteit van de wervelkolom.
- f - De aan het bekken gemeten trillingen zijn mogelijk beïnvloed door het meetrillen van de massa in de buikholte.
- g - Bij de interpretatie van de overdrachtsfuncties van de stoelzitting naar het hoofd dient grote voorzichtigheid betracht te worden.

5.4. ALGEMENE KONKLUSIES, samenvattende informatie en aanbevelingen

- a - In dit rapport wordt de "state of the art" anno 1984 gegeven. Een groot aantal vragen blijft nog onopgelost.
- b - Op de normgeving ten aanzien van voor de mens acceptabele, c.q. ontoelaatbare trillingen is nog de nodige kritiek te leveren.
- c - De kritiek betreft o.m. de vraag naar de toelaatbare dosis en de definitie daarvan.
- d - Voorts blijft de vraag open naar de geldigheid van bijvoorbeeld IS 2631 bij niet-harmonisch trillingen, zoals stochastische trillingen en schokken.
- e - Geschikte meetapparatuur die redelijk universeel bruikbaar is voor bijv. bedrijfsartsen en functionarissen van arbeidsinspekties is nog niet in de handel.
- f - Voortgezet onderzoek is dringend gewenst, waarbij de kontakten in de verschillende ISO-kommissies van grote waarde zullen zijn.