

Lawaai en ons gehoor

Ir. R. PLOMP

INSTITUUT VOOR ZINTUIGFYSIOLOGIE RVO-TNO, SOESTERBERG

Samenvatting

Het artikel behandelt enige in het instituut verrichte onderzoeken over de relatie tussen geluidsspectrum en gehoorverliezen en over de akoestische kwaliteit van gehoorbeschermers. Metingen van de tijdelijke gehoordrempelverhogingen ten gevolge van octaafbanden lawaai hebben aangetoond, dat de hoge frequenties boven ca. 2000 Hz meer beschadigend zijn dan de lage frequenties. Van een tweetal gehoorbeschermers wordt de geluidsverzwakking als functie van de frequentie, gemiddeld over 10 proefpersonen, alsmede de standaarddeviatie medegedeeld.

Summary

The paper deals with some experiments carried out in the institute concerning the relation of noise spectrum and hearing loss and the acoustical properties of ear defenders. Measurements on the temporary threshold shifts due to octave bands of noise have demonstrated that high frequencies above 2000 cps are more damaging than low frequencies. The sound attenuation of two ear defenders, averaged over 10 subjects, as well as the standard deviation are communicated.

Inleiding

Aan het probleem van de beroepshardhorendheid is gedurende de laatste jaren hoe langer hoe meer aandacht geschonken. De verbetering van de sociale omstandigheden in de industrie heeft mede tot de overtuiging geleid, dat het ontoelaatbaar is de werknemers bloot te stellen aan lawaainiveaus die schadelijk zijn voor het hoorvermogen. De noodzaak om maatregelen te treffen is bovendien vergroot ten gevolge van toegenomen lawaainiveaus door voortgaande mechanisatie en opvoering van motorvermogens.

De gehoorschade ten gevolge van lawaai manifesteert zich in verhoging van de gehoordrempel voor de hoge frequenties met een maximum, dat in de meeste gevallen tussen 4000 en 6000 Hz ligt. Naarmate de beschadiging groter is, strekt het gehoorverlies zich over een breder frequentiegebied uit. De zetel van deze gehoorbeschadiging, zo hebben die experimenten overtuigend bewezen, moet in het oor worden gezocht, in het zgn. orgaan van Corti, waarin de mechanische trillingen worden omgezet in zenuwpulsen.

Voor de praktijk is de vraag van groot belang hoe het optreden van deze gehoorverliezen kan worden voorkomen. Daar de uiteraard radicale oplossing van „geruisloosheid” in verreweg de meeste gevallen op grote bezwaren stuit, van technische, economische en andere aard, komt het er op neer, dat vastgesteld dient te worden hoeveel lawaai nog juist toelaatbaar is. Dit is niet zo'n eenvoudige zaak, daar hierbij talrijke factoren een rol spelen.

In de eerste plaats wordt de hoeveelheid toelaatbaar lawaai bepaald door objectieve parameters, zoals geluidsdrukniveau, geluidsspectrum (samenstelling als functie van de frequentie), aard van het lawaai, expositieduur e.d. Daarnaast zijn er een aantal factoren van meer subjectieve aard, zoals verschillen in individuele gevoeligheid voor lawaai, invloed van de leeftijd, relatie tussen tijdelijke en blijvende gehoorverliezen, mate van herstel, sociale gevolgen en doeltreffendheid van gehoorbeschermende middelen.

Twee van deze factoren hebben in het instituut bijzondere aandacht gehad, te weten de relatie tussen het geluidsspectrum en het gehoorverlies en de akoestische kwaliteit van gehoorbeschermers. In dit artikel zullen enige resultaten van dit onderzoek worden besproken.

De relatie tussen geluidsspectrum en gehoorverlies

Voor de praktijk is het belangrijk te weten in welke mate de verschillende componenten van lawaai, al naar hun frequenties, gehoorverliezen ten gevolge hebben. Gegevens hierover zijn nodig om de eisen voor reductie van het lawaainiveau en de mate van gehoorbescherming te kunnen specificeren. Wanneer bv. zou blijken, dat de lage frequenties veel minder beschadigend zijn dan de hoge, dan zal men in vele gevallen kunnen volstaan met vermindering van het geluidsdrukniveau voor de hoge frequenties alleen. De meest voor de hand liggende manier om deze relatie tussen geluidsspectrum en gehoorverlies te onderzoeken, is door de correlatie te bepalen uit praktijkgegevens. Men bepaalt dan van een aantal personen die dagelijks gedurende jaren aan hetzelfde lawaai zijn blootgesteld het audiogram, dat is de afwijking van de gehoordrempel als functie van de frequentie t.o.v. de standaard gehoordrempel. Tevens wordt het geluidsspectrum van het betreffende lawaai gemeten. Door dit onderzoek uit te voeren bij vele groepen die aan lawaai van verschillende bronnen zijn blootgesteld geweest, zou men de audiogrammen met de geluidsspectra kunnen correleren en zo te weten kunnen komen in welke mate de verschillende frequenties tot het gehoorverlies bijdragen. In de U.S.A. is inderdaad op deze wijze een onderzoek uitgevoerd, waarvan de resultaten in 1954 werden gepubliceerd [1].

Het is echter wel gebleken, dat dit een moeilijke en moeizame weg is. Gedeeltelijk is dit een gevolg van het feit, dat men hierbij genoeg moet nemen met de geluidsspectra, zoals deze in de praktijk voorkomen. De verschillen in energieverdeling over de frequenties zijn bij deze spectra veel kleiner dan voor een betrouwbare correlatie gewenst is. Voor

TNO

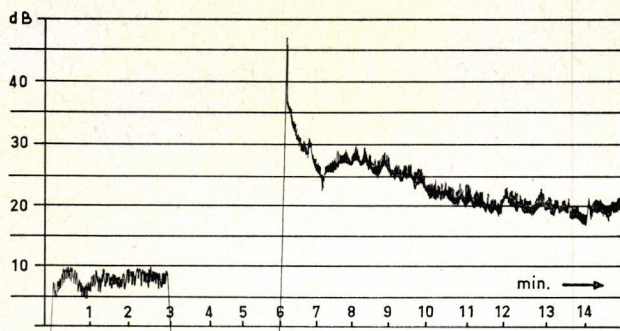


Fig. 1. Voorbeeld van een registrogram, waarin het verloop van de gehoordrempel vóór en na blootstelling gedurende 3 minuten van het gehoororgaan aan een octaafbanden lawaai werd vastgelegd.

een ander deel zijn de moeilijkheden een gevolg van het feit, dat de grootte van de gehoorverliezen door vele factoren wordt bepaald, waarvan het geluidsspectrum er één is. Daarnaast kunnen worden genoemd: tijd gedurende welke men in het betreffende lawaai heeft gewerkt, expositie aan ander lawaai daarvóór of in dezelfde periode, leeftijd, individuele gevoeligheid voor lawaai, enz. Daar deze factoren gedeeltelijk zelfs oncontroleerbaar zijn, is het hachelijk bij het vergelijken van audiogrammen van aan verschillend lawaai blootgestelde groepen te zeggen dat eventuele verschillen inderdaad het gevolg zijn van het spectrum en niet van andere factoren. Men zou wel een strenge maatstaf kunnen aanleggen waaraan zij, die in het onderzoek worden opgenomen, moeten voldoen, maar dan houdt men veelal zulke kleine groepen over, dat er van significante conclusies geen sprake kan zijn.

Het is daarom aan te bevelen het onderzoek ook op andere wijze aan te pakken. Het meest aantrekkelijk zijn laboratoriumexperimenten, want dan zijn alle parameters controleerbaar en kunnen zij afzonderlijk worden gevarieerd. Het zal duidelijk zijn, dat het hierbij niet verantwoord is blijvend gehoorverlies te veroorzaken. We moeten dus onze toevlucht nemen tot het meten van tijdelijke gehoordrempelverschuivingen t.g.v. lawaai. Men neemt aan, dat op deze wijze verkregen groepsgemiddelden representatief zijn voor blijvende gehoorschade, eveneens gemiddeld over een groep. Eigen onderzoek, waarbij de drempelverschuivingen van permanent en tijdelijk karakter t.g.v. hetzelfde lawaai met elkaar werden vergeleken [2, 3], hebben dit, zij het met enige restricties, bevestigd. De blijvende gehoorverliezen kunnen worden opgevat als te zijn ontstaan uit tijdelijke verliezen door onvoldoende herstel.

In het instituut is de relatie tussen geluidsspectrum en gehoorverlies onderzocht door gebruikmaking van octaafbanden thermische ruis [4]. Het gehoororgaan van een aantal proefpersonen werd aan dit lawaai blootgesteld waarbij zowel vóór als na de expositie de gehoordrempel werd gemeten. Op deze wijze kon de tijdelijke verschuiving van de gehoordrempel worden bepaald als functie van het geluidsdrukniveau en als functie van de middenfrequentie van de octaafband.

Bij het bepalen van de drempelverschuiving zijn twee verschillende methoden gebruikt. Bij de eerste methode werd bij één frequentie de gehoordrempel

voor en na de expositie gedurende 3 minuten aan het octaafbandlawaai als functie van de tijd geregistreerd volgens een door Van Békésy aangegeven methode. Hierbij drukt de proefpersoon een knop in zodra de toon onhoorbaar is, hetgeen een toename van het geluidsdrukniveau ten gevolge heeft. Hoort hij de toon, dan laat hij de knop los waardoor het niveau weer afneemt. Deze variaties in niveau worden met behulp van een schrijver vastgelegd. Figuur 1 geeft een voorbeeld van een dergelijk registrogram. Daar uit onderzoekingen van o.a. Van Gool [5] gebleken is, dat de tijdelijke drempelverschuiving gemiddeld maximaal is bij een frequentie van ongeveer een half octaaf (factor 1,4) boven de frequentie van de toon die de drempelverschuiving veroorzaakt, is bij de proeven steeds de drempel bij een frequentie van een half octaaf boven de middenfrequentie van de octaafbanden lawaai gemeten.

Bij vijf proefpersonen werd voor de octaafbanden met middenfrequenties 500, 700, 1000, 1400, 2000, 2800, 4000, 5600 en 8000 Hz op de uiteengezette wijze de drempelverschuiving geregistreerd bij verschillende waarden van het geluidsdrukniveau. Het resultaat voor de verschillende octaafbanden met elkaar te kunnen vergelijken, werd voor elke band vastgesteld bij welk geluidsdrukniveau 3 minuten na het einde van de expositie juist nog een drempelverschuiving van 5 dB aanwezig was. Voor elk van de vijf proefpersonen zijn deze niveaus in figuur 2 weergegeven. De getrokken lijn geeft een indruk van het gemiddelde verloop. Op voorstel van Van Leeuwen [6] zullen we deze kromme een *isotraumatische lijn* noemen: zij geeft aan welke geluidsdrukniveaus van de octaafbanden een *gelijke* gehoordrempelverschuiving ten gevolge hadden.

Naast de voorgaande, werd ook een andere methode gebruikt voor het vastleggen van de tijdelijke gehoordrempelverschuiving ten gevolge van expositie van het gehoororgaan aan octoofbanden lawaai. Hierbij werd vóór en kort na 12 minuten expositie een compleet audiogram bepaald en het oppervlak tussen deze twee krommen als maat voor het tijdelijk gehoorverlies gebruikt (gehoorverlies in dB tegen een logaritmische frequentieschaal).

Figuur 3 geeft een vergelijking van de isotraumatische lijnen bij gebruik van de twee genoemde methoden (gemiddelde van 2 proefpersonen). Voor een goede beoordeling van deze curven en die van figuur 2 dienen we voor ogen te houden, dat ze ons iets leren over de *relatieve* gevoeligheid, als functie van de frequentie, voor tijdelijke gehoorverliezen. Of bijv. het minimum bij 80 of 90 dB ligt, is het gevolg van het gekozen criterium, zoals de 5 dB drempelverschuiving bij de eerstgenoemde methode. Hadden we 10 dB genomen, dan zou de onderbroken kromme van figuur 3 in zijn geheel hoger gelegen hebben.

We zien uit de weergegeven isotraumatische lijnen, dat lawaai in het frequentiegebied rond 2000-4000 Hz veel schadelijker is dan lawaai van lagere frequenties. Dit geldt zowel in het geval dat we de tijdelijke gehoordrempelverschuiving bij één frequentie van een half octaaf boven de middenfrequentie van het octaafband ruis als criterium nemen (methode 1), als in het geval dat we het oppervlak tussen de audiogramkrommen vóór en na de exposi-

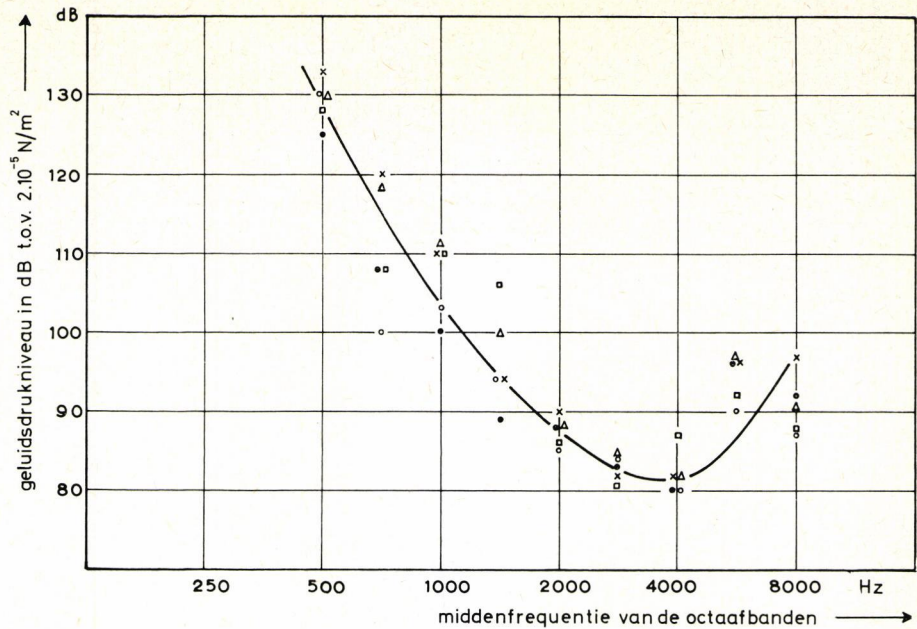


Fig. 2. Geluidsdrumniveaus van octaafbanden lawaai die een drempelverschuiving van 5 dB bij een frequentie van een half octaaf boven de middenfrequentie van de octaafbanden gaven. De verschillende symbolen corresponderen met 5 proefpersonen.

tie als maatstaf nemen (methode 2). Zoals figuur 3 toont, is in het laatste geval de helling van de isotraumatische lijn beneden 2000 Hz iets kleiner dan bij methode 1. Dat de bij 2 proefpersonen gevonden helling representatief is, is gebleken uit voortgezet onderzoek, waarbij voor twee octaafbanden lawaai, n.l. met middenfrequenties van 700 resp. 3700 Hz, de metingen volgens methode 2 bij 10 proefpersonen herhaald zijn. Het resultaat wordt weergegeven

door de kruisjes, die geheel met de getrokken lijn overeenstemmen.

De conclusie uit deze onderzoeken lijkt duidelijk: lawaai van lage frequentie is belangrijk minder beschadigend dan van hoge frequentie. Dat we echter toch nog voorzichtig met deze gevolgtrekking moeten zijn, blijkt uit een tijdens het onderzoek verschenen publikatie van Kylin, die een in vele opzichten met de hierboven omschreven methode 2

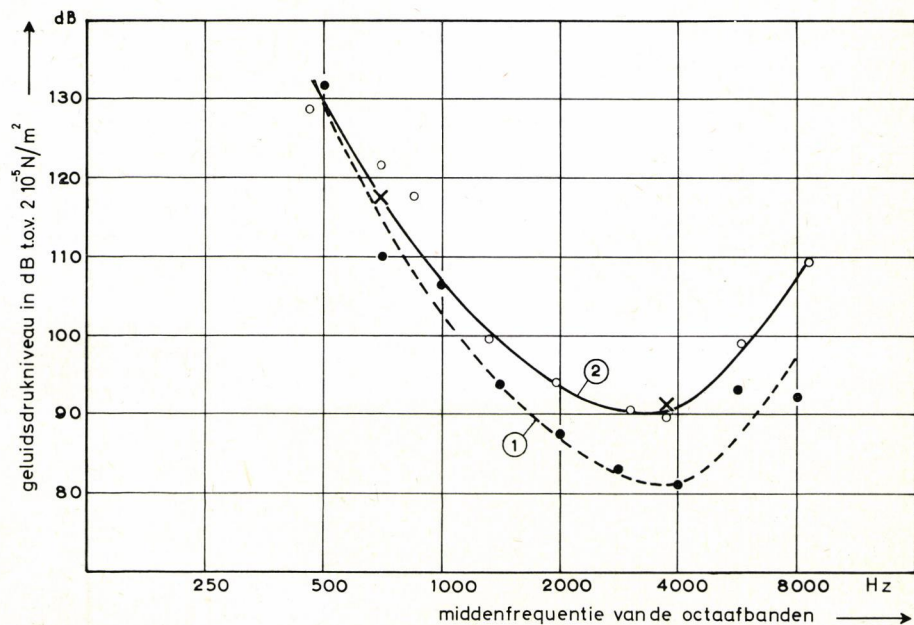


Fig. 3. Geluidsdrumniveaus van octaafbanden lawaai die gelijke drempelverschuivingen gaven voor één frequentie (kromme 1) en gesommeerd over alle frequenties (kromme 2), gemiddeld over 2 proefpersonen. De kruisjes geven de drempelverschuiving volgens de tweede methode weer, gemiddeld over 12 proefpersonen.

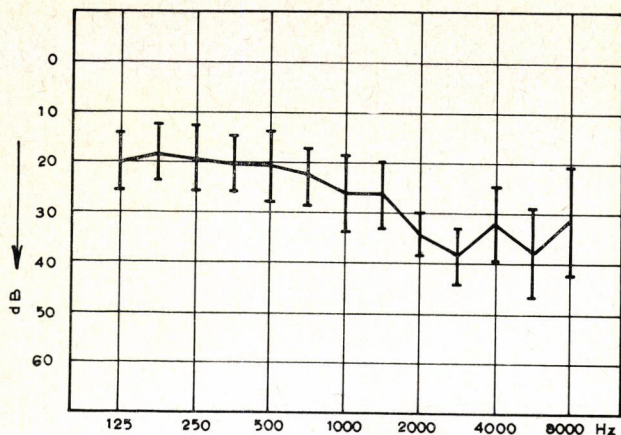


Fig. 4. Gemiddelde waarde en standaarddeviatie van de geluidsverzwakking van Focus Veilig oordopjes.

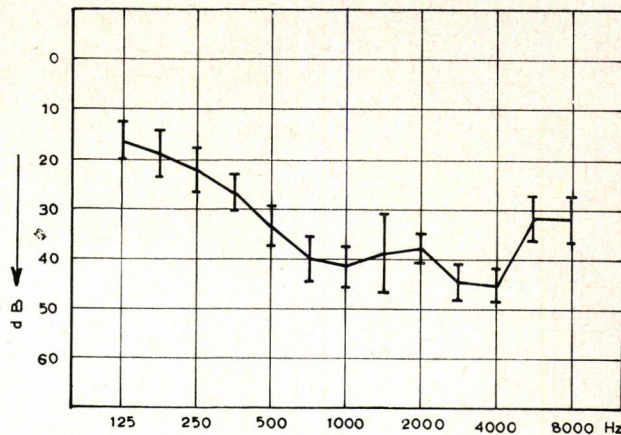


Fig. 5. Gemiddelde waarde en standaarddeviatie van de geluidsverzwakking van Willson oorkappen (Sound Barrier 258).

overeenkomende methode gebruikt [7]. Hoewel Kylin eveneens een afhankelijkheid van de frequentie vond, is deze toch veel minder uitgesproken dan bij ons. Een bevredigende verklaring van dit verschil is nog niet gegeven.

Het is echter wel zo, dat een steile isotraumatische kromme veel beter de in de praktijk optredende gehoorverliezen kan verklaren dan een vlakke kromme. In het begin van dit artikel noemden we reeds, dat het gehoorverlies ten gevolge van lawaai maximaal pleegt te zijn in het gebied van 4000 tot 6000 Hz. Het minimum van de isotraumatische lijn, dus het frequentiegebied dat de grootste gehoorverliezen zal geven, ligt volgens onze metingen bij 3000 tot 4000 Hz. Deze twee frequentiegebieden liggen juist ongeveer een half octaaf t.o.v. elkaar verschoven, hetgeen overeenstemt met de reeds eerder medegedeelde relatie tussen de frequentie van een toon en de frequentie van maximale tijdelijke drempelverschuiving t.g.v. blootstelling aan deze toon. Een steile isotraumatische lijn zal voor verreweg de meeste in de praktijk voorkomende lawaaispectra het gebied van 3000 tot 4000 Hz als het meest beschadigende gebied aanwijzen, hetgeen bij een vlakke isotraumatische lijn met een helling vergelijkbaar in grootte met die van de lawaaispectra niet het geval is.

Ook al zal verder onderzoek nodig zijn om de hier aanwezige verbanden nader te leren kennen, dan kan toch op grond van de huidige gegevens worden gezegd, dat bij lawaaibestrijding ter voorkoming van gehoorschade vooral de hoge frequenties grote aandacht dienen te hebben. Dit geldt wanneer we er op uit zijn gehoorverliezen, ongeacht hun frequentie, zoveel mogelijk te beperken. Er is echter gedurende de laatste jaren een neiging om de aandacht voornamelijk te richten op het voor de spraak belangrijke frequentiegebied, dus op verliezen beneden ca. 3000 Hz. Het is duidelijk, dat men dan ook tot een andere conclusie komt met betrekking tot de gevaarlijkheid van hoge frequenties in lawaai en dat men deze veel lichter accepteert. Het komt mij voor, dat deze neiging niet geheel verantwoord is. Al is het ongetwijfeld juist, dat aantasting van het voor spraak belangrijke frequentiegebied tot

elke prijs moet worden voorkomen, dan is hiermede m.i. nog niet het einddoel bereikt. Het streven er op gericht moeten blijven, dat over het gehele voor het horen relevante frequentiegebied gehoorverliezen worden voorkomen.

Het bovenvermelde onderzoek was er uitsluitend op gericht om inzicht te geven in de relatieve gehoorbeschadigende werking van de verschillende frequenties. Een andere vraag is: welk geluidsdrukniveau mag men in de praktijk nog aanvaardbaar achten?

Een dergelijke vraag kan uiteindelijk alleen op basis van praktijkgegevens beantwoord worden. Het door de *International Organization for Standardization* in bewerking zijnde voorstel, te weten 87,6 dB in de octaafband rond 500 Hz, 85 dB bij 1000 Hz en 82,8 dB bij 2000 Hz, geeft een goede richtlijn, al zijn ook deze getallen voornamelijk vastgesteld met het oog op het voor de spraak van belang zijnde frequentiegebied. Zij gelden voor continue expositie van maximaal 8 uur per dag.

Akoestische kwaliteit van gehoorbeschermers

Het verdient steeds aanbeveling om, wanneer het geluidsdrukniveau van lawaai zo hoog is dat gehoorbeschadigingen van de in dit lawaai werkende personen moeten worden verwacht, maatregelen van technisch-akoestische aard te treffen ter vermindering van het geluidsdrukniveau. In de gevallen waarin langs deze weg geen voldoende geluidsreductie kan worden bereikt, zal men zijn toevlucht moeten nemen tot individuele bescherming met behulp van gehoorbeschermende middelen.

Gedurende de laatste jaren is aan de ontwikkeling van goede gehoorbeschermers grote aandacht besteed. Gaf men aanvankelijk de voorkeur aan beschermers van het type oordopje, die in de uitwendige gehoorgang worden gedragen, tegenwoordig prefereert men in vele gevallen oorkappen die om de oorschelp passen en bij goede uitvoering een hogere en betrouwbaarder geluidsverzwakking geven dan oordopjes.

In de loop der jaren zijn in het instituut een groot aantal gehoorbeschermers op hun akoestische kwaliteit onderzocht. Hierbij werd gebruik gemaakt van

de door de *American Standards Association* aanbevolen meetmethode, die als volgt kan worden samengevat. Op één meter afstand recht voor het hoofd van de proefpersoon bevindt zich een luidspreker via welke toonstoten van instelbare frequentie en geluidsdrumniveau kunnen worden aangeboden. Achtereenvolgens bepaalt men de gehoordrempel voor een aantal frequenties zonder resp. met aangebrachte gehoorbeschermer. De verzwakking van de beschermer is gedefinieerd als het verschil tussen deze twee drempels. Deze metingen worden verricht in een ruimte met geluidabsorberende wanden van hoge kwaliteit ter vermindering van staande golven.

Het is gebleken, dat voor dezelfde gehoorbeschermer de aldus gevonden verzwakking van persoon tot persoon sterk kan verschillen. Dit wordt veroorzaakt door de mate waarin de gehoorbeschermer de gehoorgang afsluit (bij oordopjes e.d.) of aansluit op het hoofd (bij oorkappen). Het gevolg hiervan is, dat men in feite niet van de verzwakking van een bepaalde gehoorbeschermer kan spreken, maar alleen een gemiddelde waarde zowel als een maat voor de spreiding, bijv. de standaarddeviatie, moet opgeven. Voor een betrouwbare bepaling van deze grootheden dient men een groot aantal proefpersonen in te schakelen, in de praktijk neemt men er vaak 10. Een hoogwaardige gehoorbeschermer heeft een hoge verzwakking, gemiddeld over de proefpersonen, en een kleine standaarddeviatie.

Als voorbeeld van de te bereiken verzwakking zijn in de figuren 4 en 5 de waarden weergegeven van oordopjes (Focus Veilig) en oorkappen (Willson Sound Barrier 258), beide gemeten op 10 dezelfde proefpersonen [8]. Figuur 6 geeft een afbeelding van de laatstgenoemde gehoorbeschermer. Deze is van een constructie, zoals momenteel in vele gehoorbeschermers van verschillend fabrikaat wordt toegepast en als de meest succesvolle kan worden beschouwd. De afdichting wordt hierbij verzorgd door een soepele rand gevuld met vloeistof. Zoals we zien, ligt het maximum van de geluidsverzwakking bij hoge frequenties, hetgeen een goede aansluiting aan de verlangens i.v.m. de grotere kans op gehoorschade in dit gebied dan bij de lage frequenties.

Kennen we het geluidsspectrum van het lawaai en de verzwakking van de gehoorbeschermer, dan kunnen we door vergelijking van het verschil met de nog toelaatbare geluidsdrumniveaus vaststellen in hoeverre een bepaalde gehoorbeschermer in een concreet geval voldoende bescherming zal bieden. De kennis van de verschillende, de gehoorbeschadiging bepalende factoren zowel als van de mogelijkheden tot preventie zijn tegenwoordig van zodanige aard, dat gehoorverliezen ten gevolge van hoge lawaainiveaus in de praktijk niet meer behoeven voor te komen wanneer tijdig passende maatregelen worden getroffen.

Literatuur

1. W. A. Rosenblith et al., „The relation of hearing loss to noise exposure”, *American Standards Association, Exploratory Subcommittee Z 24-X-2* (1954).
2. D. W. Gravendeel and R. Plomp, „The relation between



Fig. 6. Afbeelding Willson oorkappen.

permanent and temporary noise dips”, *A.M.A. Archives of Otolaryngology* 69, 714-719 (1959).

3. D. W. Gravendeel and R. Plomp, „Permanent and temporary Diesel engine noise dips”, *A.M.A. Archives of Otolaryngology* 74, 405-407 (1961).
4. Een uitvoerig verslag van de onderzoeken geeft: R. Plomp, D. W. Gravendeel and A. M. Mimpfen, „Relation of hearing loss to noise spectrum”, *Journ. Acoust. Soc. Am.* 35, 1234-1240 (1963).
5. J. van Gool, „Experimentele studie betreffende enige gevolgen van geluidsinwerking op het menselijk oor”, dissertatie, Leiden (1952).
6. H. A. van Leeuwen, „Beroepshardhorendheid als bedrijfs-geneeskundig probleem”, dissertatie, Leiden (1955).
7. B. Kylin, „Temporary threshold shift and auditory trauma following exposure to steady-state noise”, *Stockholm* (1960).
8. Deze metingen maakten deel uit van een met subsidie van de Gezondheidsorganisatie TNO verricht onderzoek aangaande de geluidsverzwakking van tien verschillende gehoorbeschermingsmiddelen. De metingen werden verricht op verzoek van de werkgroep „Persoonlijke beschuttingsmiddelen”, opgericht door de Stuurgroep Lawaaiïnvloeden van de Commissie Arbeidsgeneeskundig Onderzoek van de Gezondheidsorganisatie TNO. Een verslag van de resultaten van dit onderzoek, dat gelijktijdig in het Nederlands Instituut voor Praeventieve Geneeskunde en het Instituut voor Zintuigfysiologie werd uitgevoerd, verschijnt in het Tijdschrift voor Sociale Geneeskunde, nummer van 4 april 1964.