

ENIGE OPMERKINGEN OVER DE FYSIOLOGIE
EN DE PATHOFYSIOLOGIE VAN HET HOREN IN
VERBAND MET HET LAWAAITRAUMA*)

T. BOTTEMA,
KNO-arts Rijksuniversiteit Utrecht.

Inleiding

Zal in de toekomst de lawaai-hardhorendheid een beroepsziekte van tandartsen worden? Deze vraag is actueel geworden met de komst van de pneumatisch gedreven boormachines met zeer hoge toerentallen. De hierdoor geproduceerde hoeveelheid lawaai is van een zodanige grootte dat beschadiging van het gehoor van de tandarts en zijn medewerkers niet denkbeeldig is. Om een behoorlijk inzicht in deze problemen te krijgen is het nuttig zich enkele begrippen uit de fysica en de fysiologie weer helder voor ogen te stellen.

Geluid

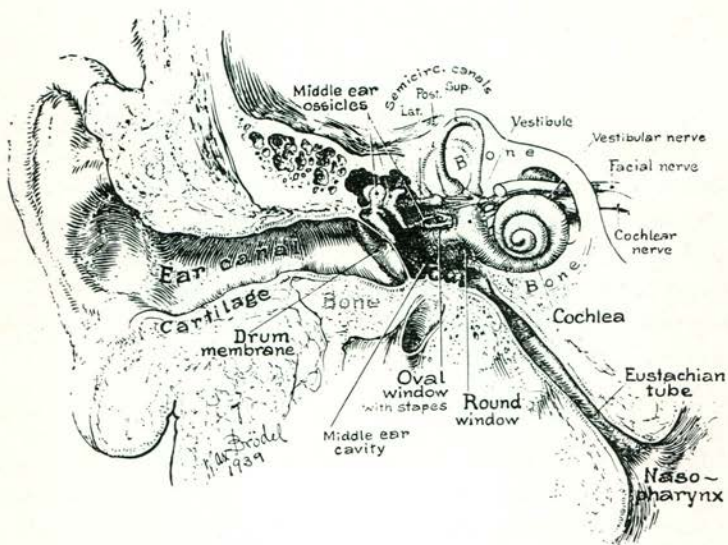
Geluid, fysisch gesproken, betekent een mechanische trilling, die, opgewekt door een geluidsbron, wordt afgegeven aan de omgeving (gewoonlijk lucht) waarbij geluidsgolven ontstaan die zich naar alle richtingen uitbreiden. Een eenvoudige vorm van geluid is de enkelvoudige toon. Een dergelijke toon wordt bepaald door de frequentie en de intensiteit. De frequentie wordt uitgedrukt in het aantal trillingen per seconde (HERTZ, CPS), de intensiteit kan op verschillende manieren worden aangegeven. Beschouwt men geluid als een vorm van energie, dan kan men de geluidssterkte aangeven als de hoeveelheid geluidsenergie die per tijdseenheid door een bepaalde oppervlakte-eenheid stroomt, bijv. als Watt/cm².

Geluid, fysiologisch gesproken, betekent de sensatie die men ondergaat bij het waarnemen van het fysisch verschijnsel. De frequentie is hierbij bepalend voor de toonhoogte, de geluidssterkte voor de luidheid. Tussen het fysisch en fysiologisch begrip bestaat wel een relatie, deze is echter zeker niet eenvoudig, zoals verderop zal blijken.

*) (Naar een voordracht, gehouden voor de Ned. Vereniging van Tandartsen op 16 november 1962)

Bouw en functie van het gehoororgaan

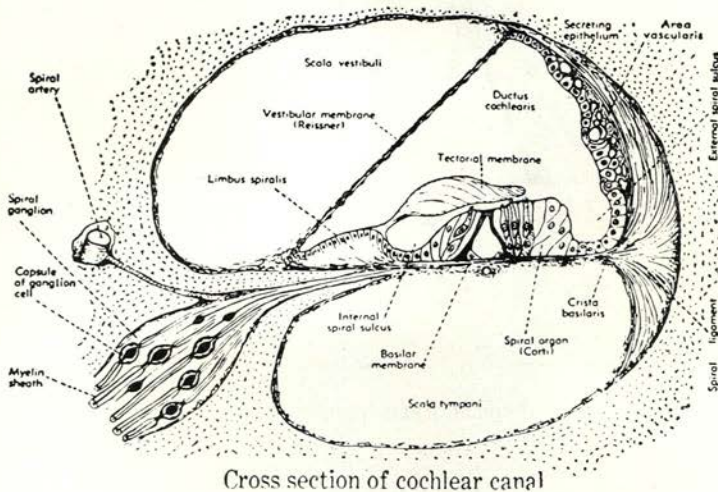
Wanneer geluidsgolven het oor bereiken worden ze door de oorschelp enigermate gebundeld en de gehoorgang in gezonden. Hier ontmoeten ze het trommelvlies op hun weg en nemen dit mee in trilling. Het trommelvlies drijft de keten van gehoorbeentjes aan (hamer, aambeeld en stijgbeugel) en de voetplaat van de stijgbeugel, die uitgespannen is in het ovale venster, brengt de trillingen tenslotte over op de vloeistoffen van het binnenoor.



Afb. 1

Omdat de oppervlakte van het trommelvlies vele malen groter is dan die van de stijgbeugelvoetplaat en omdat tijdens de beweging van de keten van gehoorbeentjes een zekere hevelwerking optreedt, wordt het oorspronkelijke geluid ca. 20 maal versterkt aan het binnenoor aangeboden. Het eigenlijke gehoororgaan, het orgaan van Corti, is opgeborgen in een holte in het rotsbeen: de cochlea. Dit is een gewonden, benig kanaal met $2\frac{1}{2}$ winding in de vorm van een slakkenhuis. Behalve de toegang, het ovale venster, heeft de cochlea ook een uitgang, het ronde venster, dat afgesloten wordt door een beweeglijk membraan. Door de onsamendrukbaarheid van vloeistoffen zijn bewegingen van de stijgbeugelvoetplaat alleen mogelijk wanneer elders een uitwijkmogelijkheid bestaat. Deze laatste wordt gegeven door het ronde venster. Het benige kanaal van het slakken-

huis wordt in de lengte door membranen in drie afdelingen gesplitst. Afbeelding 2 toont een dwarse doorsnede hiervan.



Cross section of cochlear canal

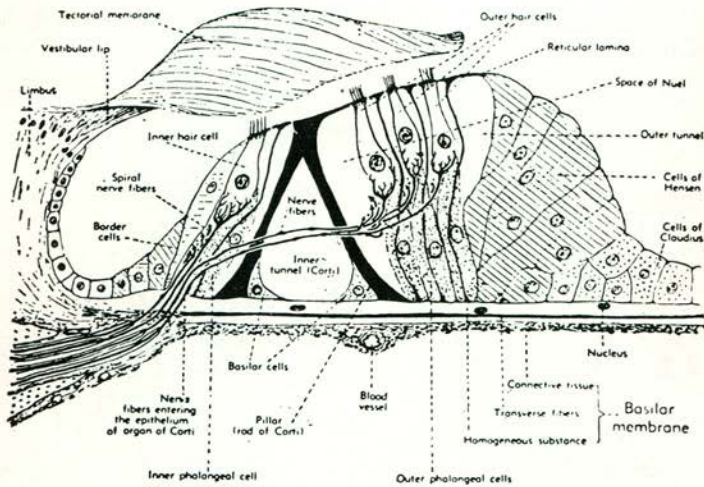
Afb. 2

De bovenste afdeling, de scala vestibuli, is in contact met het ovale venster, de onderste, de scala tympani, met het ronde venster. Beide scalae zijn gevuld met perilymphe en staan aan de top met elkaar in open verbinding (helicotrema). De middelste afdeling, de ductus cochlearis, bevat het orgaan van Corti, dat rust op de beneden begrenzing: de membrana basilaris. De ductus cochlearis is eveneens gevuld met een vloeistof: de endolymphe. Deze verschilt in samenstelling met die van de perilymphe. Beschouwingen over de betekenis hiervan zouden te ver voeren.

Het orgaan van Corti strekt zich uit over de gehele lengte van de ductus cochlearis, over $2\frac{1}{2}$ winding. De belangrijkste bestanddelen zijn de zintuigcellen, die omgeven worden door steuncellen.

De zintuigcellen zijn op een zeer typische manier gerangschikt, steeds vindt men op een dwarse doorsnede één binnenste en drie buitenste haarcellen, gescheiden door een ruimte, de tunnel van Corti. De zintuigcellen dragen haartjes (ciliën), die boven de cellen uitsteken en gevat worden in een luifel boven het orgaan van Corti: de membrana tectoria (op afb. 3 is deze verbinding niet weergegeven).

Rond de benedenpolen van de haarcellen bevinden zich zenuwvezels, die de zintuigprikkelers naar een zenuwknoop in de cochlea voeren: het



Cross section of spiral organ (papilla) or organ of Corti

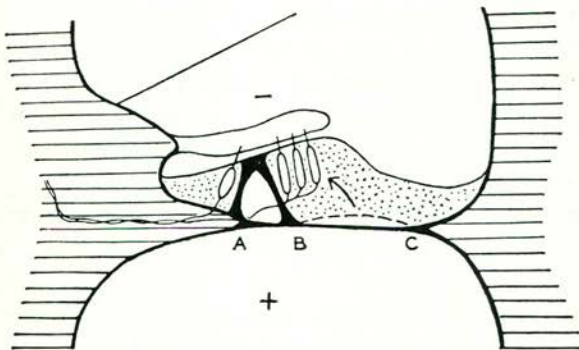
Afb. 3

ganglion spirale. Van hieruit vormen uitlopers de hoorzenuw (deel van de nervus octavus) die de impulsen naar de hersenen brengt.

In totaal zijn er ongeveer 25.000 haarcellen die in rijtjes van vier naast elkaar over de lengte van de basilaire membraan zijn gerangschikt.

De werking van het orgaan van Corti stelt men zich als volgt voor:

Door de trillingen in de vloeistoffen van het binnenoor ontstaat een op en neer gaande beweging van de basilaire membraan waardoor de haar-



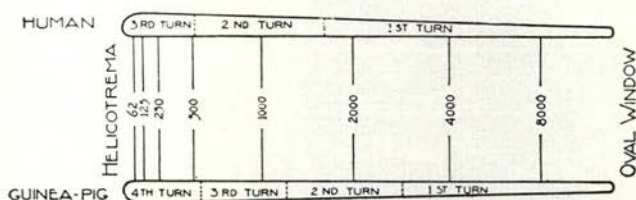
Effect on hair cells of basilar membrane movement. (Stevens, S. S. and Davis, H.: Hearing, New York, John Wiley & Sons, 1938.)

Afb. 4

cellen verschuiven t.o.v. de membrana tectoria. Hierdoor wordt aan de zintuighaartjes getrokken en dit wordt beschouwd als de adequate prikkel voor de zintuigcellen.

De functie van het zintuig valt uiteen in twee delen: het waarnemen van de frequentie en van de geluidssterkte.

Het kinderoor is gevoelig voor frequenties van 16Hz – 20.000 Hz, op latere leeftijd krimpt deze frequentiebreedte (de oorvaam), vooral de bovengrens neemt af. Op middelbare leeftijd ligt deze bij ca. 16.000 Hz, in de ouderdom bij 12.000 Hz of nog lager. Door middel van experimenten is gebleken dat hoge tonen trillingen van de basilaire membraan vooral laag in de cochlea veroorzaken (basale winding) terwijl lage tonen bewegingen vooral hoog in de cochlea veroorzaken (top, helicotrema), m.a.w. er is waarschijnlijk een frequentie localisatie over de lengte van het orgaan van Corti (afb. 5), waarmee dus frequentie analyse mogelijk is. Het waarnemen van geluidssterkte zou afhankelijk zijn van het aantal geprikkelde haarcellen in het betreffende gebied.



Diagrammatic picture of basilar membrane localizing sound frequencies. (Stevens, S. S. and Davis, H.: *Hearing*, New York, John Wiley & Sons, 1938.)

Afb. 5

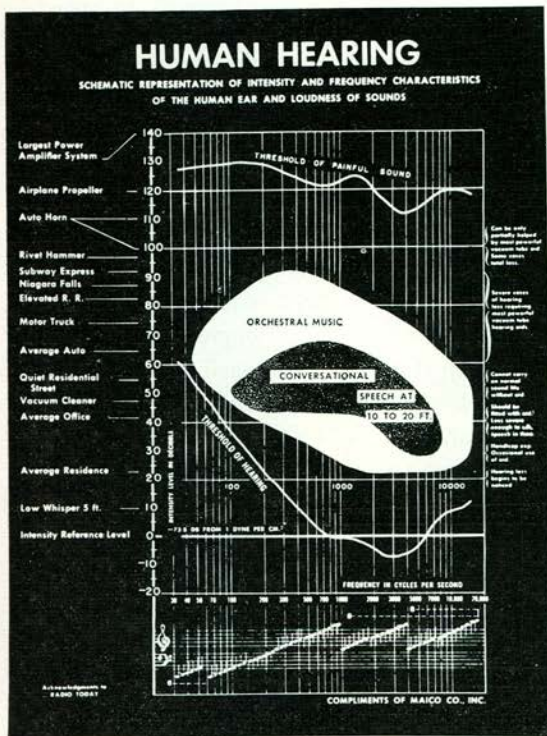
De trillingen die het menselijk oor niet kan waarnemen (subsonische en ultrasonische trillingen) zijn in de natuur voor de mens van weinig belang. De ultrasonische trillingen hebben een veel kleiner doordringingsvermogen in lucht dan de voor ons hoorbare trillingen en worden in het algemeen door hele kleine dieren geproduceerd die voor de grote zoogdieren als prooi van weinig belang zijn.

Geluidssterkte, decibel

Naast het waarnemen van de frequenties meet het gehoororgaan de geluidssterkte.

De gevoeligheid van het oor is zeer groot, het grootst in het gebied rond 2000 Hz. Een toon van 2000 Hz hoeft slechts een geluidssterkte te hebben van 10^{-16} Watt/cm² om nog juist door een normaal oor te worden

waargenomen. Voor tonen boven en onder 2000 Hz is het oor ongevoeliger, de drempel ligt hier hoger (zie afb. 6).



Afb. 6

De bovengrens van de bruikbaarheid van het oor wordt bepaald door de pijndrempel, hier heeft het geluid een zodanige intensiteit dat inwerking er van op het oor pijn veroorzaakt. De pijngrens is voor de verschillende frequenties niet erg uiteenlopend (afb. 6). Voor een toon van 2000 Hz ligt de pijngrens bij een geluidssterkte van 10^{-2} Watt/cm².

Men moet de drempelwaarde van een toon van 2000 Hz honderd-biljoen maal versterken om de pijngrens te bereiken. Dit gebied tussen drempel en pijngrens noemt men wel de oorspan en deze is het grootst in het middengebied (rond 2000 Hz). Naar boven en beneden neemt de oorspan af (zie afb. 6). Behalve een grote gevoeligheid heeft het oor dus een enorm bereik. Om in dit enorme bereik met een hanteerbare eenheid te kunnen werken, heeft men de geluidssterkteschaal logaritmisch ingedeeld.

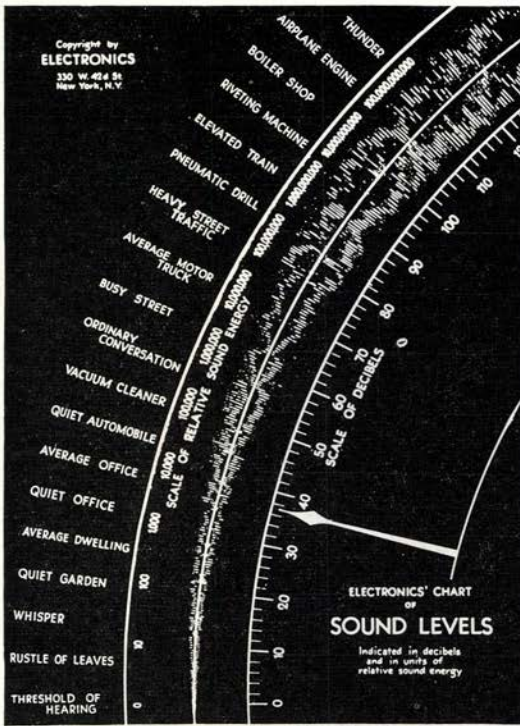
Als nul-niveau van deze schaal neemt men de geluidssterkte van een toon van 2000 Hz, die nog juist door een normaal oor wordt waargenomen (10^{-16} Watt/cm²). Alle andere geluidssterkten vergelijkt men hiermee.

De logarithme (met grondtal 10) van deze vergelijking geeft de uitkomst voor de nieuwe geluidssterkte-schaal, die men uitdrukt in Bel (= 10 decibel). De geluidssterkte volgens deze schaal van de drempeltoon van 2000 Hz

$$\text{is dus } \log \frac{10^{-16}}{10^{-16}} = \log 1 = 0 \text{ Bel.}$$

De pijngrens voor deze toon ligt bij

$$\frac{10^{-2}}{10^{-16}} = \log 10^{14} = 14 \text{ Bel} = 140 \text{ decibel (db).}$$



Afb. 7

Afb. 7 toont de sterkte van allerlei soorten geluid. O.a. is hierin te zien dat de conversatiespraak zich afspeelt in een gebied rond 60 db. Men moet zich bij de decibelschaal realiseren dat een stap van 1 Bel (= 10 db) een

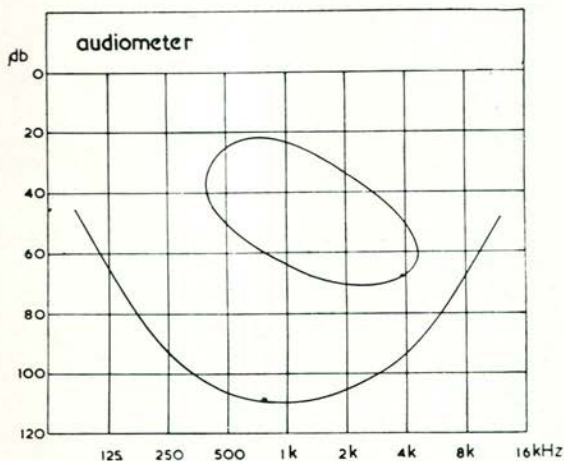
versterking inhoudt van 10x, een stap van 2 Bel (= 20 db) van 100x, van 3 Bel (= 30 db) van 1000x, enz. (1 db sterker betekent ongeveer een toename van 20% van de energie).

De waarde van een decibel is dus niet constant maar is afhankelijk van de plaats in de intensiteitschaal.

Bepalen van de drempel van het gehoororgaan

Men kan de drempel van het gehoor bepalen door middel van de menselijke stem (fluisterspraak, luide spraak), met stemvorken enz. Een dergelijk onderzoek is omslachtig en meestal onnauwkeurig. Gedurende de laatste decennia staat hiervoor de audiometer ter beschikking, waarmee een snel en nauwkeurig onderzoek mogelijk is.

De audiometer is een toongenerator waarmee elke gewenste toonhoogte op elke gewenste sterkte (uiteraard binnen bepaalde grenzen) kan worden aangeboden. Meestal wordt alleen de toondrempel van de gehoororganen bepaald en dit alleen voor een bepaald aantal frequenties, in het algemeen met een octaaf verschil (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, enz. t/m 8000 Hz). De gegevens legt men vast in het audiogram (zie afb. 8).



Afb. 8

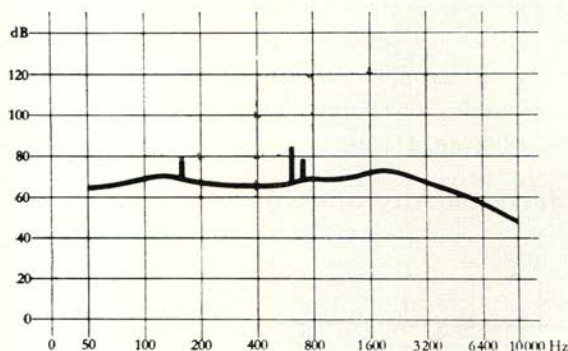
De frequenties zijn hierin afgezet op de abscis, de geluidssterkten in decibel op de ordinaat. Als 0-niveau heeft men het gemiddelde van de drempelwaarden genomen van een aantal normale oren van jonge mensen. De audiometer is hierop geijkt. Een gehoorverlies voor een of meer frequenties wordt naar beneden in db in het audiogram afgezet. Het is dus eigen-

lijk een verliescurve. Het ellipsvormige gebied in afb. 7 geeft de zone aan die belangrijk is voor het spraakverstaan. De naar beneden convexe lijn stelt de pijngrens voor.

Lawaai

Tot nu toe is in het algemeen een enkelvoudige toon bedoeld wanneer gesproken werd over geluid. Iets ingewikkelder is de klank die een samenstel is van een grondtoon met zijn boventonen. Ook de toon en de klank, mits in voldoende intensiteit aanwezig, kunnen gehoorsbeschadigend werken. Het beschadigend lawaai in de praktijk is echter meestal complexer van aard. Het lawaai in de industrie (scheepswerven, weverijen, vliegtuig-industrieën enz.) is namelijk een ruis. Een ruis is een mengsel van tonen die in geen enkele relatie tot elkaar staan.

Veelal zijn in een dergelijk lawaai alle frequenties van het hoorbare gebied aanwezig, zij het niet in gelijke sterkte. Men spreekt daarom van het spectrum (van een ruis). Afb. 9 toont een dergelijk spectrum.



Afb. 9

Op de abscis is de frequentie afgezet, op de ordinaat de geluidssterkte. (In dit voorbeeld zijn bij enkele frequenties de trillingen duidelijk sterker aanwezig dan in hun omgeving en ze steken dan ook boven de massa uit). De geluidssterkte van een ruis wordt aangegeven per frequentiegebied, bijv. het aantal db per $1/3$ octaaf. In het spectrum van het lawaai van de tandartsenboor is de energie niet zo gelijkmatig verdeeld als in dit voorbeeld. Het lawaai van de tandartsenboor is meer een ruis met een toonkarakter omdat het door de, als sirene werkende, pneumatisch gedreven boortol veroorzaakt wordt.

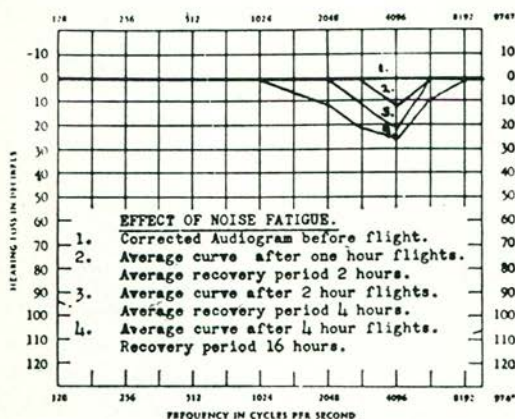
Lawaaiibeschatiging

Elk gedeelte van een ruis, mits in voldoende sterkte aanwezig, kan gehoorsbeschadigend werken, vooral echter de hoge frequenties (boven 2000 Hz) hebben wat dit betreft een slechte reputatie.

Het blijkt dat het audiogram van een oor dat aan beschadigend lawaai heeft blootgestaan in het begin bijna altijd een verlies toont in de buurt van 4000 Hz (C₅), hoe de samenstelling van het lawaaispectrum ook was. Blijkbaar is de plaats in de cochlea waar deze frequenties worden waargenomen een locus minoris resistentiae.

Een mechanische verklaring voor het verlies juist op deze plaats wordt voorgesteld door RÜEDI. Het is bekend dat bij het excessief trillen van de binnenoorvloeistoffen wervels ontstaan (v. BÉKÉSY). Volgens RÜEDI draaien deze wervels onder de plaats waar frequenties van 4000 Hz en omgeving worden waargenomen precies in tegengestelde richting aan die boven de genoemde plaats en wel zodanig, dat het orgaan van Corti als het ware wordt gerekt. De plaats van 4000 Hz en omgeving zou daarom het eerst schade lijden. In het begin is een gehoorsverlies door lawaai-beschadiging over het algemeen reversibel en het kan beschouwd worden als een oververmoeidheid van het gehoororgaan. Het herstel vindt dan plaats in de eerste uren (soms dagen) na het trauma. De plaats van het gehoorsverlies en het aanvankelijk reversibele karakter worden fraai weer-gegeven door het audiogram van afb. 10.

Otologic Effects of Aircraft Noise



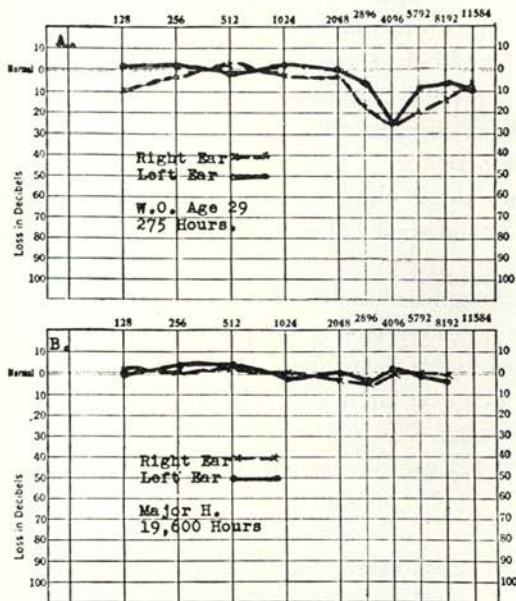
Notching effect of noise fatigue from aircraft noise, demonstrating degrees of notching from one, two and four hour flights in noisy aircraft. Recovery times are indicated.

Afb. 10

Hierin zijn de resultaten van proefnemingen tijdens de tweede wereldoorlog vastgelegd, waarbij de invloed van vliegtuiglawaai op het gehoor bij luchtmachtpersoneel werd nagegaan.

Gehoorsverlies door lawaaibeschadiging gaat meestal gepaard met oorsuizen dat in toonhoogte overeenkomt met de zone tussen normaal en „beschadigd” zintuigepitheel in de cochlea. Het herstel van het oorsuizen duurt meestal langer dan het verdwijnen van het gehoorsverlies. Bovendien heeft het oorsuizen een maskerend effect.

Het permanent worden van het gehoorsverlies is afhankelijk van verschillende factoren. Allereerst blijkt een groot verschil in individuele gevoeligheid voor lawaai te bestaan. Ook dit kan goed worden geïllustreerd met enkele audiogrammen van piloten tijdens de laatste wereldoorlog. (afb. 11).



Audiograms demonstrating variation in noise susceptibility. (A) Audiogram of a pilot showing definite notching in 275 hours. (B) Audiogram of a pilot showing no effect of noise in 19,600 hours of flight.

Afb. 11

Het bovenste audiogram is van een jonge piloot die na 275 vliegreeds een duidelijk gehoorsverlies toont. Het onderste audiogram is af-

komstig van een vlieger met 19.600 vlieguren. Hierbij is er geen sprake van een gehoorsverlies.

Naast de gevoeligheid van het gehoororgaan is de duur van inwerking van het lawaai van belang.

Is deze kort, terwijl daarna een lange periode voor herstel beschikbaar is, dan is de kans op permanent gehoorsverlies klein. In industrieën waar beschadigend lawaai voorkomt en ook eventueel in de tandartsenpraktijk zal een dergelijke werkwijze in het algemeen niet mogelijk zijn. Tenslotte speelt natuurlijk de intensiteit van het lawaai een grote rol. Men wil dikwijls graag weten welk intensiteitsniveau gevaarlijk wordt. Uit het bovenstaande blijkt dat een nauwkeurig omschreven grens eigenlijk niet te geven is omdat ook andere factoren meespelen. Toch moeten er bepaalde regels op te stellen zijn.

Het blijkt dat de conversatiespraak zich afspeelt in het gebied rond 60 db. Gelukkig, vooral voor de spraakzamen en hun toehoorders is dit geluid nooit beschadigend, althans niet voor het gehoororgaan.

De pijngrens ligt bij 130 à 140 db. Hier is geluid zeker beschadigend. Het gezochte niveau moet dus ergens tussen beide genoemde gebieden in liggen. Op grond van allerlei ervaringen, vooral verkregen in de industrie, zou men de volgende, voorzichtig gestelde uitspraak kunnen doen: chronische inwerking van lawaai met een geluidssterkte van 85 db of hoger geeft kans op gehoorsbeschadiging bij daarvoor gevoelige individuen.

Het gehoorsverlies (aanvankelijk alleen een C₅ „dipje“) heeft bij blijvende lawaai-inwerking de neiging groter te worden en zich naar de gebieden met hogere, maar ook lagere frequenties uit te breiden.

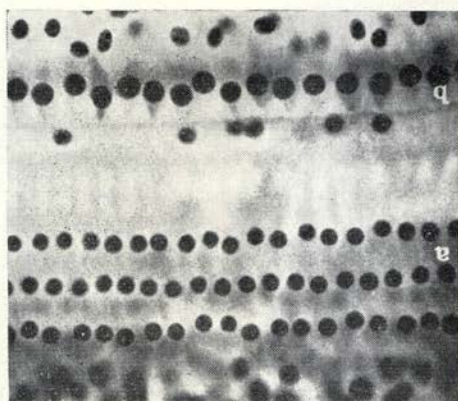
In het begin (en dit kan zich over jaren uitstrekken) zijn er geen moeilijkheden met het spraakverstaan.

Een lawaaidip penetreert het gebied, belangrijk voor het spraakverstaan, niet zo snel (zie afb. 8). Eerder ontstaan moeilijkheden met het luisteren naar muziek.

De eerste klachten worden meestal veroorzaakt door het oorsuizen dat de lawaaibeschadiging begeleidt. Het optreden hiervan moet bij werk in een lawaaiige omgeving een waarschuwing zijn.

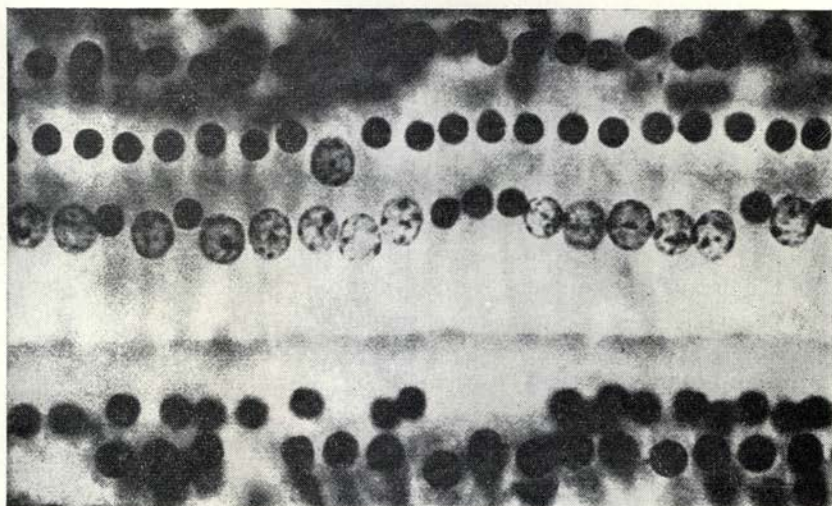
Pathologische anatomie

Dat bij lawaaibeschadiging organische veranderingen kunnen optreden in het zintuigepitheel van het orgaan van Corti, kan worden gedemonstreerd met enkele afbeeldingen van coupes uit de onderzoeken van BECK en MICHLER met caviae.



Afb. 12

Afbeelding 12 toont een coupe, genomen evenwijdig aan de basilaire membraan van een normale cavia. De typische rangschikking van de haarcellen is aan de ligging van de kernen zeer fraai te zien.



Afb. 13

Afbeelding 13 laat een dergelijke doorsnede zien van een cavia die kort tevoren aan beschadigend geluid heeft blootgestaan. Een rij haarcellen hierop (de eerste rij van de buitenste zintuigcellen) toont ernstige kernzwelling.

Een dergelijke zwelling is een duidelijk teken van beschadiging en een volgende stap is de caryolyse waarbij de cel te gronde gaat.

Preventie

Ter voorkoming van lawaaibeschatiging kunnen verschillende maatregelen worden genomen. Logisch lijkt het de daarvoor in aanmerking komende machines zodanig te construeren dat schadelijk geluid niet kan ontstaan. Is dit niet mogelijk, dan kan getracht worden door afscherming van de lawaaibron het intensiteitsniveau te verlagen. Verder moet gedacht worden aan vermindering van de reflectie van het geluid door wanden, zoldering e.d. te bekleden met geluiddempend materiaal.

Tenslotte kan men het binnendringen van lawaai in de oren beperken door het gebruik van gehoorbeschermers.

Afsluiting van de gehoorgang door goed passende oorstukjes geeft zeker een voldoende demping (tot ca. 40 db in de hoge tonen), maar dan is men hardhorend.

Men lost dit probleem op door een fijn kanaaltje in het oorstukje te boren. Hoge tonen, en vooral die wil men buitensluiten, hebben grote moeite een dergelijk fijn kanaal te passeren. Frequenties uit het lage- en middengebied worden veel minder gehinderd en deze zijn juist van belang voor het spraakverstaan.

Maar ook een gewoon watje in de oren geeft een verzwakking in het hoge tonen gebied van ca. 10 db. Dit kan soms juist voldoende zijn om onder de gevaarlijke grens te blijven.

Slot

Gezien de uitgebreidheid van de stof en de veelheid van onderwerpen die in het voorgaande ter sprake kwamen, draagt het geheel een oppervlakkig en fragmentarisch karakter. Het is echter alleen bedoeld als inleiding op de behandeling van de problemen, samenhangend met het lawaaitrauma veroorzaakt door de boormachines met zeer hoge toerentallen.

Literatuur.

1. H. DAVIS. Hearing and deafness.
2. Prof. Dr. L. RÜEDI. Die Schallschädigungen des Ohres. Documenta Geigy.
3. C. BECK und H. MICHLER. Feinstrukturelle und histochemische Veränderungen an den Strukturen der Cochlea beim Meerschweinchen nach dosierte Reintonbeschallung. Archiv. Ohren, usw. Heilkunde und Zeitschrift usw. Heilkunde 174, 496-567 (1960).
4. R. PLOMP. Het lawaai van pneumatische boormachines voor tandheelkundige behandeling. T.N.O. rapport.