

Horen onder water¹⁾

Dr. Nico A.M. Schellart ²⁾

Hoewel er heel veel bekend is over de aandoeningen van het gehoororgaan en de behandeling van deze aandoeningen is het in het algemeen weinig bekend wat en hoe snorkelaars en duikers onderwater horen. Dit kleine stukje geeft heel beknopt weer wat het wezen is van het horen onderwater, waarbij bekend verondersteld is wat en globaal hoe mensen boven water horen. De doelgroep van onderstaand stukje zijn artsen, medisch biologen, para-medici, duikinstructeurs en MadB-ers.

Wat is geluid?

Geluid, een longitudinale trilling, heeft zowel een drukcomponent (p) als deeltjesverplaatsingscomponent (r) of, wat op hetzelfde neerkomt, een snelheidscomponent (v). Geluid onderwater (OW) kan het water nauwelijks verlaten door terugkaatsing aan de oppervlakte en "airborn"-geluid kan nauwelijks binnendringen. In het 'nabijheidsveld' ($R < \lambda/2\pi$, met λ de golflengte en R de bronafstand) neemt p (afhankelijk van het type bron) met R of sneller af. Hierdoor is geluid van een ademautomaat op enkele meters al onhoorbaar en idem sterk OW-geluid hoger dan 4 kHz op $R > 10$ m. Daarnaast is er absorptieverlies, groot in de lucht, klein in water, vooral bij hogere frequenties. OW-horen is zeer matig door de grote voortplantingssnelheid c (bij 0 °C, zeewater: $c_{sw} = 1471$ m/s; lucht: $c_l = 331,5P^{0,094}$ met P de luchtdruk in bar) en de dichtheid ρ ($\rho_{sw} = 794\rho_l$ bij 0 °C, $\rho_l = 1,29$ g/L).

Het audiogram

Een audiogram is een diagram dat de druk-drempel als functie van de frequentie weergeeft. Fig. 1 geeft een aantal OW-audiogrammen. Een OW-drukaudiogram (A_{OW}) is zeer moeilijk te bepalen, vooral laagfrequent wegens achtergrondgeluid en trillingen. Het OW-drukaudiogram (A_{OW}) van Masri et al. 1992 (ref 1; het enige betrouwbare bij frequenties < 1 kHz) is veel ongevoeliger dan A_{lucht} (Fig. 1) omdat het trommelvlies OW niet goed werkt. (2) (In feite is het 'minimum audible field', gemeten met 1/3 octaaf ruis).

¹⁾ Deze beknopte inleiding is een wat uitgebreidere versie van het deel over horen in een hoofdstuk van Duikgeneeskunde, Theorie en praktijk, Brandt Corstius J.J., Dermout S.M. en Feenstra L. Elsevier, 2006.

²⁾ Medisch fysisch, Biomedical Engineering and Physics (Afd. Biomedische Techniek en Fysica), Academisch Medisch Centrum, bij de Universiteit van Amsterdam, Postbus 22660, 1100 DD Amsterdam.

Hypothesen voor OW horen

De klassieke trommelvlies of auricel hypothese is invalide want zijn berekende verlies is te groot: op 0 resp. 50 m diepte een verlies van 65 en 50 dB ($20\log((\rho_{sw}c_{sw} - \rho_l c_l P^{1,094})(\rho_{sw}c_{sw} + \rho_l c_l P^{1,094})^{-1})$). Als de fysica van de water gevulde gehoorgang wordt doorgerekend is A_{OW} wel uit A_{lucht} te verklaren (Fig. 1).³ De botgeleiding hypothese biedt evenmin een verklaring, zoals blijkt uit gegevens van ref. 4 waaruit ik het theoretische A_{OW} berekende (Fig. 1).² De door mij ontwikkelde middenoor hypothese stelt dat de middenoorholte werkt als een resonator die het trommelvlies in trilling brengt en zo een $p \cdot r$ transducer vormt.^{2,5} Bij toenemende diepte voorspelt de middenoor hypothese een verdere verslechter, (i.t.t. de trommelvlies hypothese), conform de metingen. De botgeleiding hypothese gedraagt zich vermoedelijk minder drukafhankelijk. Een (gedeeltelijk) met lucht gevulde gehoorgang geeft 4 (250 Hz) tot 15 dB (4 kHz) minder verlies (zie 2). Met een neopreenkap wordt het gehoorverlies boven de 500 Hz groter dan zonder kap (15-20 dB) doordat de luchtbelletjes in het neopreen de geluidsgolven sterk verstrooien. Bij toenemende diepte neemt het effect af (zie 2). Gaatjes in de kap ter plaatse van de oren zijn dus vrijwel zinloos. OW-richtinghoren is 4x slechter dan in de lucht omdat de interaurale stimulusverschillen (fase, etc) veel kleiner zijn (zie 2). Spraakverstaan in een compressietank verslechtert wegens akoestische vervorming.

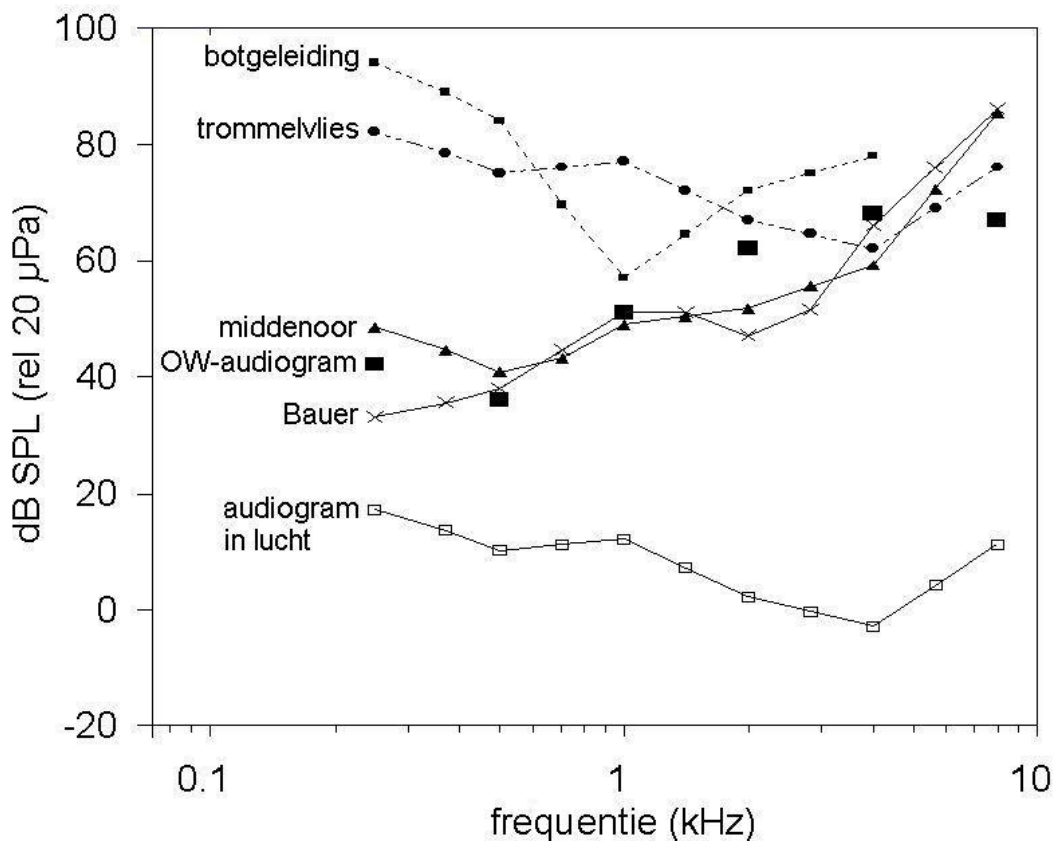


Fig. 1 A_{OW} en A_{lucht} vergeleken met theoretische A_{OW} 's van diverse hypothesen met A_{lucht} als basis.^{2,3,4,5} Voor de berekening van het middenoor-hypothese is uitgegaan ref 4,5 onder aanname dat het middenoor een resonator is (platte omwentelingsellips met asverhouding 3; inhoud is 0.59 cm^3 ; laagdoorlaat 2de orde karakteristiek; kwaliteit $Q=1$, berekende afsnijfrequentie 714 Hz).

Invloed van druk

Bij toenemende diepte, pN_2 en pO_2 verandert het OW-horen nauwelijks, althans bij lucht- en nitroxduiken.

Achtergrondgeluid en werken met OW apparaten

Achtergrondgeluid (10-100 Hz door scheepvaart; hoger frequent door golven, ontstaan door wind) is slecht hoorbaar. Onbevaren binnenmeren zijn geluidloos onder Beaufort 2. Boven het continentaal plat en in de branding is het geluid resp. 20-40 en 30-55 dB sterker. Boven water is er veel minder geluid, maar wij percipiëren dat andersom. Specifieke, harde geluiden steken OW schril af. Dit ondanks dat de drempel voor het achtergrondgeluid 20-28 dB lager ligt dan het audiogram (sommering over een smal frequentiebandje).² Het geluid van de automaat werkt sterk maskerend. Bij ingehouden adem komen biologische geluiden (zwemblaasgeluiden van vissen, koraalende vissen) vaak van dichtbij boven de achtergrond uit.

Off-shore-duikers hebben vaak een gehoorverlies veroorzaakt door lawaai van de helm, OW-handgereedschap en droge decompressies. Bij OW-gereedschap zijn de frequenties rond 500 Hz veelal het sterkst, en daar is A_{OW} het gevoeligst. Met een helm kunnen de luchtnormen gehanteerd worden (hoofd geheel vrij). Als zonder helm gedoken moeten de expositienormen voor OW-werkzaamheden even zo vele dB's hoger zijn dan A_{OW} minder gevoelig is dan A_{lucht} . Het is raadzaam om als OW-audiogram dat van Al-Masri et al. (1992) te hanteren en niet die van oudere datum, omdat die een te lage laagfrequente gevoeligheid geven. Expositienormen vanaf 250 Hz en octaafsgewijs hoger tot 8 kHz kunnen resp. 39, 26, 37, 48 59 en 47 hoger zijn dan in de lucht.¹ Boor- en slijpmachines vereisen ca. 5 dB en drukspuiten en schroevendraaier tot 40 dB. Impliciet wordt aangenomen dat de drukcomponent de enige stimulus is. Lawaaiige OW-apparatuur, wekt echter zeer sterke r -velden in het nabije veld op door het karakter van hun geluidsbron. Het gehoororgaan wordt nu ook gestimuleerd door de r -component en het deeltjesverplaatsingsaudiogram is dus mede relevant. Op 75 cm afstand bij 125 en 250 Hz is bij een dipoolbron de v/p verhouding respectievelijk 30 en 19 dB sterker zijn dan ver buiten het nabijheidsveld.² De geluidsenergie is aldus veel sterker dan geluidsdruk doet vermoeden. Bij complexere geluidsbronnen zijn deze verhoudingen nog groter. Door de massatraagheid van dichtere structuren dan water (bijv. gehoorbeentjes en de scalamembranen) zal de r -component (feitelijk de versnelling a) het oor buiten de p -component om sterk stimuleren.⁴ Daarom moet bij gebruik van zware apparatuur niet alleen p (met een hydrofoon), maar bij voorkeur ook a (met een OW-accelerometer, of v) gemeten worden ter plaatse van het hoofd. Op basis van het deeltjesverplaatsingsaudiogram, gemeten voor botgeleiding (4), kan de expositienorm navenant worden aanpast. Voor caissonwerkers geldt dat voor elke bar de norm 1 dB verlaagd wordt wegens de uitdijen vaan het nabijheidsveld (hogere c door hogere ρ , temperatuur en vochtigheid).

Referenties

- 1 Al-Masri M, Martin A, Nedwell J. Underwater noise exposure and hearing. In: Weydert M, red. Underwater Acoustics, Elsevier Appl. Sci., London: Elsevier, 1992:363-366.
- 2 Schellart NAM. Horen onderwater. NVD Bulletin, 1995;5S:31-39.
- 3 Bauer BB. Comments on "Effect of air bubbles in the external auditory meatus on underwater hearing thresholds", J Acoust Soc Amer, 1970:47:1465-1467.
- 4 Békésy G von. Experiments in hearing, Part 2. McGray-Hill Book Co, 1960.
- 5 Munck de, JC, Schellart, NAM. A model for the nearfield acoustics of the fish swimbladder and its relevance for directional hearing, J Acoust Soc Am, 1987:81:556-560.