

Verklaring voor hinder van laagfrequent geluid

Biofysische benadering

Recent onderzoek in de VS verklaart waarom steeds meer mensen lage geluidsfrequenties waarnemen. Ook in Nederland leidt laagfrequent geluid tot problemen.

Door: Dr Mireille Oud

Over de auteur:

Natuurkundige Dr M. Oud ([Linkedin.com/in/MireilleOud](https://www.linkedin.com/in/MireilleOud)) is gepromoveerd in de atoomfysica, heeft enige tijd geneeskunde gestudeerd en houdt zich als wetenschappelijk onderzoeker sinds 1995 bezig met signaalverwerking en patroonherkenning aan biomedische geluiden.

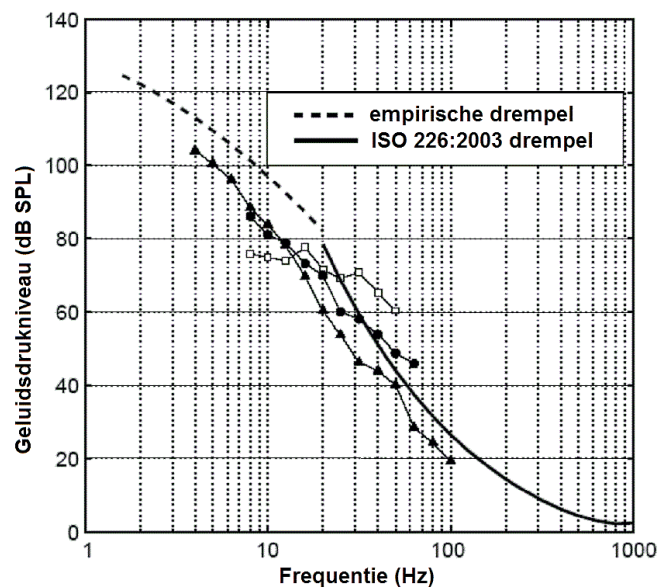
Méér kunnen horen naarmate u ouder wordt in plaats van minder? Dat lijkt een droom, maar voor wie het overkomt, is het een nachtmerrie. Ineens meer lage geluidsfrequenties horen is erg hinderlijk. Zulke frequenties bevatten namelijk geen informatie: in spraak en muziek komen ze niet voor en richtinghoren kunnen we er niet mee. En juist dat laatste, het gebrek aan ruimtelijkheid, maakt ze zo irritant: ze lijken daardoor 'in' het hoofd te zitten. Sommigen horen een zacht gebrom, anderen een gedreun alsof er een vrachtwagen voor de deur staat. Horen ze wel echt geluid? Hoe kan dat? Waarom neemt het aantal mensen dat over laagfrequent geluid klaagt alsmaar toe? En, hoe kwantificeren we de omvang van dit maatschappelijke probleem?

ECHT GEHOORD

Gehinderden kunnen vaak precies aangeven waar ze wel en waar ze niet de hinderlijke lage bromgeluiden horen. De meeste last ervaren ze in besloten ruimten zoals woningen en auto's. Daarbinnen blijken de plekken waar het geluid extra hard klinkt periodiek in de ruimte te zijn. Grote verbazing over je voorspellende gaven is je deel wanneer je de volgende luide plek kunt aanwijzen. Deze verbazing en de locatiespecificiteit vormen al een behoorlijk objectief bewijs dat de gehinderde inderdaad geluid van buitenaf waarneemt. Is hier gewoon sprake van een resonantie-effect? In de woning van zo'n gehinderde heeft een gemeentelijke dienst uitvoerig onderzoek gedaan. Er werd niets gevonden.

Om waarneembaarheid vast te stellen, ging de bovengenoemde gemeentelijke dienst uit van een niet-officiële geluidsdrempel die door TNO samengesteld is uit literatuurgegevens over 55-jarigen.¹ De waarden van deze curve liggen wat hoger dan die van de officiële ISO-curve, die gemeten is bij jonge normaalhorende mensen.² Dat zorgt ervoor dat de dienst hogere geluidsterktes als 'onhoorbaar' beschouwt dan officieel zou moeten.

Biologische parameters hebben veel spreiding en de geneeskunde rekt wereldwijd altijd met twee standaarddeviaties om te bepalen wat 'normaal' is. Dat betekent hier dat bijna 48% van de populatie een drempel heeft tot 10 dB lager dan de drempelcurve (figuur 1).³ De ruim 2% van de normaalhorenden met een nóg lagere drempel heeft pech: zij worden ten onrechte als afwijkend beschouwd. In ons land wordt vaak een marge van slechts 6½ dB gebruikt, dat is iets meer dan één standaarddeviatie, en die norm laat maar liefst 10% van de populatie 'pech' hebben. Oftewel: 10% van de normaalhorenden is in staat geluiden te horen die ambtshalve als onhoorbaar worden gerapporteerd. De woning van de eerder genoemde gehinderde kwam volgens de 'Hollandse norm' niet boven de drempel. Volgens de ISO 2%-norm zou er wél een hoorbare toon aanwezig zijn die een staande golf kan veroorzaken.



FIGUUR 1: GEHOORDREMPELS EN VOORBEELDAUDIOGRAMMEN VOOR LAGE TONEN (SPL REF. 20 MICRO-PA).³ TOELICHTING IN KADER 2 OP BLADZIJDE 9.

FYSICA TUSSEN DE OREN

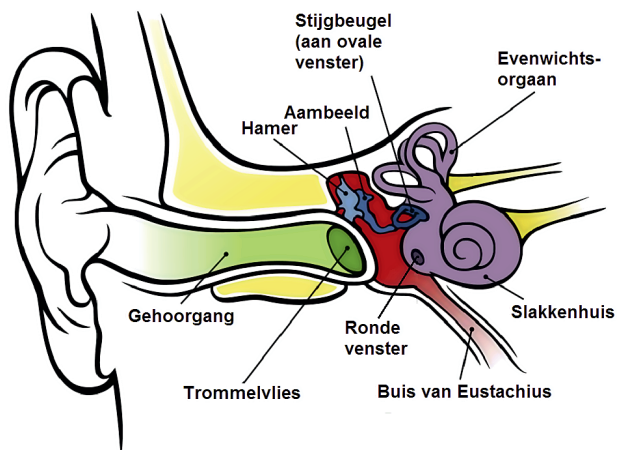
Hinderwetgeving gaat uit van gemiddelde mensen en accepteert daarmee dat een klein deel van de mensen hinder ondervindt.

Maar dat kleine deel is tegenwoordig steeds groter: wereldwijd nemen de klachten over laagfrequent geluidsoverlast toe. De klachten zijn overal ter wereld soortgelijk, alleen de mate waarin verschilt. Sommige mensen klagen over een zacht gebrom, anderen over denderend lawaai. Er lijkt dus iets aan de hand te zijn.

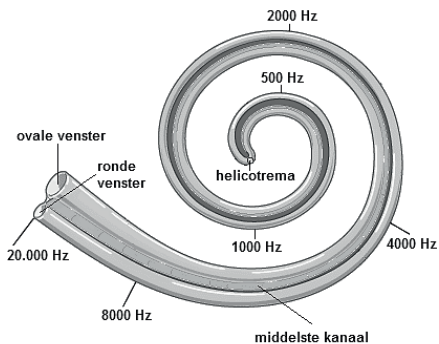
Een combinatie van groeiend machinaal vermogen en toegenomen geluidsgevoeligheid lijkt de toename van hinderklachten te verklaren. Wat er in de afgelopen decennia gebouwd is voor onze infrastructuur, mobiliteit en industrie, zowel onder de grond als er bovenop, is gigantisch. Het tweede, de toegenomen gevoeligheid, zou natuurlijk psychologisch kunnen zijn, maar blijkt ook biofysisch te kunnen zijn. Dit laat neurobioloog prof. Salt van de Washington University zien in zijn onderzoeken. Langdurige blootstelling aan laagfrequente trillingen, zo betoogt hij, kan ons binnenoer (figuur 2) aantasten.

Irritatie van de cochlea (het 'slakkenhuis', figuur 3) door lage tonen kan een deel ervan doen opzwellen. Dat kan duizelingen geven, een klacht die we inderdaad horen bij mensen met hinder van laagfrequent geluid. Om zo'n geluidsgeïnduceerde zwelling in korte tijd na te bootsen, heeft Salt proefdieren blootgesteld aan een toon van 200 Hz bij 115 dB SPL. Al na drie minuten kon hij een begin van zwelling constateren.⁴

Zwelling kan ook zorgen dat het poortje tussen het bovenste en het onderste kanaal van de cochlea nauwer wordt of dicht gaat zitten. Ook dit bootste Salt na, door een propje gel in het poortje te spuiten. De blokkade blijkt grotere drukverschillen in de cochlea te geven, met name voor de laagfrequente drukgolven. Dit maakt het oor 20 tot 30 dB gevoeliger, vooral voor laagfrequente geluiden.⁵ Zo'n oor ervaart een zachte bromtoon dus als lawaai. Letterlijk.



FIGUUR 2: BUITENOOR (WITTE EN GROENE DEEL), MIDDENOOR (RODE DEEL) EN BINNENOOR (LILA DEEL). TOELICHTING IN KADER 1 OP BLADZIJDE 9.



FIGUUR 3: COCHLEA (SLAKKENHUIS). TOELICHTING IN KADER 1 OP BLADZIJDE 9.

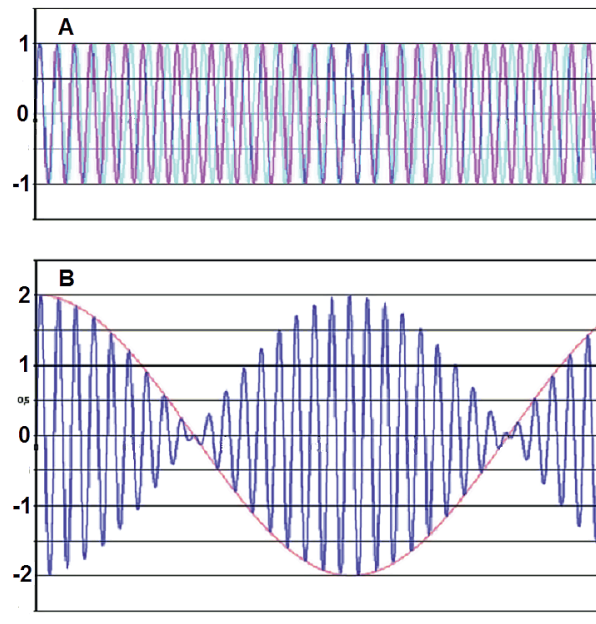
Toch zien meettechnici de gewraakte bromtoon niet altijd terug op hun geluidsmeters. De conclusie van hun opdrachtgevers is

dan vaak dat de toon in het hoofd van de gehinderde ontstaat en 'dus' niet door de buitenwereld veroorzaakt wordt. Is dit juist of onjuist? Het is juist én onjuist.

Als er in de buitenwereld twee bijna identieke tonen klinken, dan kan ons oor een derde frequentie horen die niet op het display van de geluidmeter verschijnt: de verschiltoon, een zweeping met een heel lage frequentie (figuur 4). Dit 'spookgeluid' is een bekend fenomeen onder musici, maar wordt in de meetwereld nog wel eens over het hoofd gezien.

Gehinderden kunnen nog een ander soort geluid waarnemen die evenmin in het gemeten spectrum terug te vinden zijn. Tinnitus, roepen geluidsdeskundigen dan al gauw, tot ergernis van veel gehinderden. Juist of onjuist? Wederom: beide. Tinnitus, oorsuizen, kan ook ontstaan door overmatige prikkeling van het oor met laagfrequente trillingen. Bepaalde gehoorzenuwcellen, de *outer hair cells* (de engelse term is ook hier ingeburgerd), gaan dan elektrische signalen naar de hersenen sturen. In een normale situatie functioneren deze cellen alleen als mechanische voorversterkers en genereren ze geen geluidssensatie.⁶

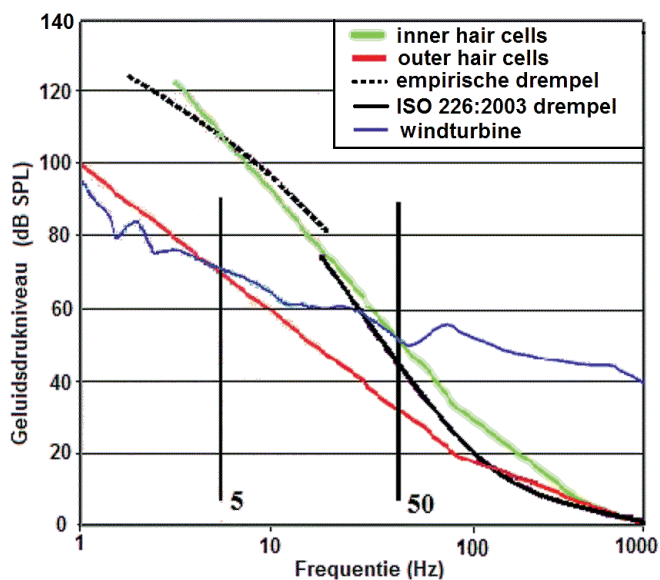
Overmatige stimulatie van de voorversterkerzellen, de *outer hair cells*, kan ook een gevoel van druk op de oren geven. Inderdaad zegt een deel van de gehinderden dat ze laagfrequent geluid niet kunnen horen, maar wel kunnen voelen. Figuur 5 laat zien hoe dat kan: dat gebeurt als het laagfrequente geluid wel de outer maar niet de inner hair cells stimuleert. Dan neemt men wel iets waar, maar men hoort niets.⁶



FIGUUR 4:
A. TWEE ZUIVERE TONEN MET BIJNA GELIJKE FREQUENTIES (BLAUWE EN LILA LIJNEN).
B. INTERFERENTIE VAN DE TWEE TONEN UIT PANEEL A (BLAUWE LIJN), EN ZIJN OMHULLENDE, DE VERSCHILTOON OFWEL ZWEVING (RODE LIJN).
TOELICHTING IN KADER 3 OP BLADZIJDE 9.

OVER DE DREMPEL

Continue blootstelling aan laagfrequent geluid blijkt dus op den duur schadelijk te kunnen zijn. Laagfrequent geluidshinder zien we momenteel vooral bij mensen van middelbare leeftijd, en dit is de rationale achter het gebruik van de informele gehoordrempelcurve die gebaseerd is op 55-jarigen. De schadelijke invloed van continue blootstelling aan laagfrequent geluid begint echter al op jonge leeftijd, dus nog voordat men bij zichzelf klachten bespeurt. Het is daarom geen goed idee om als waarneembaarheids-criterium een gehoordrempelcurve voor 55-jarigen te hanteren.



FIGUUR 5: GEVOELIGHEIDSCURVEN VAN GEHOORZENUWCELLEN (RODE EN GROENE LIJNEN),⁹ GEHOORDREMPELS (ZWARTE LIJNEN) EN SPECTRUM VAN NEDERLANDSE WINDTURBINE¹¹ (BLAUWE LIJN). DRUKKEN IN SPL REF. 20 MICRO-PA.
TOELICHTING IN KADER 2 OP BLADZIJDE 9.

De biofysische inzichten werpen een nieuw licht op het evalueren van deze problematiek. Het niet kunnen objectiveren van de mondiale toename van het aantal klachten kan de volgende oorzaken hebben:

- In de loop der jaren is de totale geluidsdruk van lage tonen in ons leefmilieu alsmaar hoger geworden. Hierdoor komt dit geluid bij steeds meer gezondhoerende mensen boven hun individuele normale waarnemingsdrempel.
- Langdurige overprikkeling door, eerst onhoorbaar, laagfrequent omgevingsgeluid kan de gehoordrempel verlagen met maar liefst 20 tot 30 dB, waardoor het wel hoorbaar wordt.
- Omgevingsgeluid met lage tonen is steeds continuër aanwezig. Een eenmaal beschadigd oor heeft dan geen kans zich te herstellen, waardoor het ook in perioden met minder omgevingsgeluid gevoelig blijft en klachten geeft.
- De bronnen van laagfrequent geluid zijn in steeds grotere geografische dichtheid aanwezig. Voor een sensitief geworden persoon helpt het niet meer om zichzelf te verplaatsen (zoals voor wonen en werken), waardoor hij meer hinder ondervindt dan een even sensitief persoon vroeger.
- De geluidsdruk in ons leefmilieu wordt onderschat door de drempelcurve, als niet de gebruikelijke marge van twee standaarddeviaties wordt genomen.
- Drempelcurven houden er geen rekening mee dat onze gehoorzenuwcellen al reageren op geluid voordat het een hoorbaar niveau heeft.

KADER 1: Werking van het oor

De trillingen van het trommelvlies (figuur 2) worden door de gehoorbeentjes doorgegeven aan de vloeistof in de cochlea. De cochlea (figuur 3) is een benige structuur met drie kanalen. De trillingen komen het bovenste kanaal binnen bij het ovale venster, passeren aan het eind van het kanaal een opening (het helicotrema), en planten zich voort in het onderste kanaal. De zo ontstane drukverschillen tussen het bovenste en het onderste kanaal zetten de membranen rond het middelste kanaal in beweging. Deze beweging stimuleert de outer hair cells die in het middelste kanaal liggen, en die cellen stimuleren elektromechanisch de inner hair cells. Die laatste sturen dan prikkels naar de hersenen. De cochlea werkt over z'n lengte als een serie filters: voor hoge frequenties nabij het ovale venster, en voor lage nabij het helicotrema. De cochlea staat ook in verbinding met het evenwichtsorgaan. Bij teveel vocht in het middelste kanaal, zoals bij de ziekte van Ménière, ervaart men duizelingen.⁸

KADER 2: Gevoeligheid van het oor

De middenoorbeentjes dempen het geluid dat op het trommelvlies valt met 6 dB/octaaf. Het helicotrema (figuur 3) dempt die vloeistofdruk golf die erdoor passeert met eenzelfde orde. De combinatie van deze twee transmissiemodellen van het menselijk oor geeft de geluidsgevoeligheid van de outer hair cells (rode curve in figuur 5).⁹

De elektromechanische overdracht van de vloeistoftrillingen van de outer naar de inner hair cells heeft ook een 6 dB/octaaf afzwakking; dit is gemeten aan proefdieren. Deze gemeten overdracht is gecombineerd met de twee transmissiemodellen voor het menselijk oor, en dat geeft de berekende geluidsgevoeligheid van de inner hair cells (groene curve in figuur 5). Geluid dat tot stimulatie van de inner hair cells leidt, wordt gehoord.⁹ De gehoordrempelcurven (zwarte curven in figuur 5) liggen inderdaad op de groene curve.

De ISO-gestandaardiseerde gehoordrempel begint bij 20 Hz. Voor lagere frequenties is een empirische drempel geconstrueerd uit metingen afkomstig uit Engeland, Zweden, Denemarken en Japan.^{3,10} De spreiding van twee standaarddeviaties bedraagt circa 10 dB, een realistische maat die door audiogrammen van drie personen (twee uit Japan en een uit Denemarken) wordt geïllustreerd in figuur 1.

Om omgevingsgeluid te beoordelen naar de mate waarin wij het kunnen horen, wordt het geregistreerde geluid meestal dBA gewogen. De dBA-curve is, ruwweg, het omgekeerde van de ISO-gehoordrempel. Als we op het oog de ISO-curve extrapoleren naar lagere frequenties, zien we dat deze curve (en daarmee dus ook de dBA-curve) de gehoorgevoeligheid flink onderschat: de empirische drempel ligt er duidelijk onder. De empirische curve loopt dan ook veel minder steil: -12 dB/octaaf.

Voor de lagere frequenties, beneden 20 Hz, bestaat sinds 1995 de dBG-curve.⁷ Het omgekeerde van de dBG-curve is, ruwweg, de gehoordrempelcurve. De dBG-wegingscurve heeft een steilheid van 12 dB/octaaf, en dat correspondeert inderdaad met de steilheid van de empirische gehoordrempel.

- Extrapolatie van de dBA-wegingscurve naar frequenties lager dan 20 Hz onderschat de werkelijke gevoeligheid van ons oor in dat gebied (zie figuur 5).

METEN IS NIET WETEN

Regelgevers sturen het liefst een meettechnicus op pad met een geluidsmeter, een norm, en de opdracht de bron van overlast op te sporen. Met de huidige geografische dichtheid aan bronnen, en de kilometerslange voortplanting van de lage frequenties, overlapt het geluid van verschillende bronnen elkaar echter snel en daardoor is 'de' bron vaak niet aan te wijzen. Verschiltonen zie je niet zomaar in een spectrum, en cochleaire defecten door lage-tonen-overbelasting kun je daar helemaal niet zien. De huidige vorm van geluidsmetingen kan de overlast daarom niet volledig in kaart brengen. Een demografisch onderzoek in combinatie met de juiste statistiek lijkt op dit moment meer geschikt: hoeveel mensen ondervinden wat voor soort hinder, op welke locaties en op welke momenten? Wat is hun leeftijd, sinds wanneer merken zij deze hinder in en welke mate? Wat voor bronnen zijn in welke dichtheid verspreid over het gebied, hoe groot is hun toename in de loop der jaren en per geografische eenheid? Wellicht verschijnen er interessante correlaties tussen die parameters, correlaties die een handvat kunnen bieden voor verder onderzoek. Samenhang nagaan met geluidsniveaumetingen in het leefmilieu zou uiteraard ook interessant zijn, maar zulke metingen hebben alleen waarde als ze op veel locaties en tijdstippen gelijktijdig uitgevoerd worden (dit omdat interferenties een rol spelen en omdat de bronvermogens sterk fluctueren in de tijd) en dat maakt ze erg kostbaar.

Maar als er gemeten gaat worden, zou er één gouden regel moeten gelden: leg altijd de onbewerkte geluidsdata vast, en voer

KADER 3: Waarnemen wat geluidsdrukspectra niet tonen

Een voorbeeld van een infrastructuurelement waarover veel discussie is in het kader van laagfrequentgeluidshinder, een windturbine, staat in figuur 5. Als de outer hair cells wel gestimuleerd worden en de inner hair cells niet, kunnen er toch signalen naar de hersenen gaan. Te zien is dat dit effect bij windturbinegeluidshinder optreedt tussen 5 en 50 Hz.

Als twee zuivere tonen met bijna gelijke frequenties met elkaar interfereren (paneel A in figuur 4), dan zien en horen we een zweving (rode lijn in paneel B). Voor een geluidsdemonstratie van dit fenomeen, zie slide 10 van: <http://tiny.cc/LFG2012NAG>. Musici noemen zulke zwevingen Tartini tonen, en benutten ze om hun instrumenten te stemmen. Een geïmproviseerd orkest zou 'n lage toon wel als zweving, maar de naïeve luisteraar kan 'm als een echte toon ervaren. Bij kerkorgels benut men dit interferentieverschijnsel om zeer lage tonen te genereren zonder de lange orgelpijpen te hoeven bouwen die eigenlijk nodig zijn om zulke lage tonen te maken.

daarna pas bewerkingen uit. Onbewerkte geluidsdata, dat zijn de gedigitaliseerde dBL-gecalibreerde geluidsgolven. Wegingen, zoals dBA en het wellicht meer geschiktere dBG,⁷ en spectraalberekeningen, zoals vermogensspectra, kunnen daarna uitgevoerd worden. Deze werkwijze is belangrijk omdat wegingen nog ter discussie staan en omdat uit bijvoorbeeld vermogensspectra geen verschiltönen gehaald kunnen worden. Wanneer de ruwe data bewaard worden, kunnen nieuwe inzichten met terugwerkende kracht toegepast worden.

TOT SLOT

Mensen die hun klachten van onbehagen aan laagfrequent geluid toeschrijven, worden hierin vaak tegengesproken omdat de aanwezigheid van lage-tonenoverlast niet altijd objectief is vast te stellen. Dat laatste komt enerzijds doordat hun geluidsdruk onderschat wordt door een ongeschikte geluidsweging, en ander-

zijds doordat die tonen helemaal afwezig kunnen zijn, zoals bij het verschijnsel van verschiltönen.

Toch blijken gehinderden op allerlei manier gelijk te kunnen hebben. Langdurige blootstelling aan laagfrequent geluid kan mogelijk de structuur en de werking van ons gehoororgaan nadelig beïnvloeden. Tinnitus en duizelingen kunnen het gevolg zijn. De nadelige invloed kan mogelijk ook leiden tot een verlaagde gehoordrempel, waardoor onhoorbaar geluid hoorbaar wordt en zelfs als lawaai ervaren kan worden.

Wereldwijd neemt het aantal mensen met dit soort klachten toe. Dit is wellicht toe te schrijven aan het almaar sterker, continuïer en wijder verbreid worden van laagfrequent geluid in ons leefmilieu, als gevolg van de voortschrijdende ontwikkeling van industrie, infrastructuur en mobiliteit.

REFERENTIES

- 1 W.Passchier-Vermeer, Beoordeling laagfrequent geluid in woningen, TNO Preventie en Gezondheid (rapport 98.028), 1998.
- 2 International Organization for Standardization, ISO 226:2003 Acoustics - Normal equal-loudness-level contours, Geneve, 2003.
- 3 C.S. Pedersen, Human hearing at low frequencies, with focus on noise complaints (thesis), Aalborg University, 2008.
- 4 Salt AN. Acute endolymphatic hydrops generated by exposure of the ear to nontraumatic low-frequency tones. J Assoc Res Otolaryngol. 2004;5:203-214.
- 5 A.N. Salt, D.J. Brown, J.J. Hartsock, S.K. Plontke, Displacements of the organ of Corti by gel injections into the cochlear apex, Hear Res. 250, 63-75, 2009.
- 6 A.N. Salt and J. A. Kaltenbach. Infrasound From Wind Turbines Could Affect Humans, Bulletin of Science, Technology, and Society 31(4), 296-302, 2011.
- 7 International Organization for Standardization, ISO 7196:1995 Acoustics - Frequency-weighting-characteristic for infrasound measurements, Geneve, 1995.
- 8 Ziekte van Ménière: <http://emedicine.medscape.com/article/1159069-overview>.
- 9 A.N. Salt and T.E. Hullar, Responses of the ear to low-frequency sounds, infrasound and wind turbines, Hear. Res. 268, 12-21, 2010.
- 10 H. Møller, C.S. Pedersen, Hearing at low and infrasonic frequencies, Noise & Health, 6(23), 37-57, 2004.
- 11 G.P. van den Berg. The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise, Ph.D. thesis, Rijksuniversiteit Groningen, 2006.

Kennis Centrum Geluid Rijnmond online

Sinds december is de vernieuwde website van het Kennis Centrum Geluid Rijnmond online: www.kenniscentrumgeluid.nl.

OPRICHTERS

Het Kennis Centrum Geluid (KCG) is in 2001 opgericht door de DCMR Milieudienst Rijnmond en het Havenbedrijf Rotterdam om de zogenaamde dubbeldoelstelling van intensiveren van industriële activiteiten en het verbeteren van de leefomgevingkwaliteit in de Rijnmond te faciliteren.

DOEL

Het doel van het KCG is om door het treffen van geluidsmaatregelen aan 'de bron' de ruimtelijke beperkingen vanwege geluid op te heffen en geluidshinder te verminderen. Het KCG inventariseert en ontsluit bestaande of recent ontwikkelde kennis en technieken, en neemt waar nodig barrières bij de implementatie van deze technieken weg.

FOCUS

De focus is op:

- 1 inventarisatie geluidsreducerende producten, technologieën en concepten;
- 2 ontsluiting van aanwezige kennis naar met name bedrijven en ontwerpers;
- 3 stimulering van het toepassen van geluidsreducerende technieken (informatie, subsidies);
- 4 implementatie van geluidsreducerende technieken.

RECENTE PROJECTEN

Recente projecten zijn onder andere de ontwikkeling van stil wegdek voor zwaar verkeer, haalbaarheidsonderzoeken naar walstroom en stille arbo piep, en de publicatie Integraal geluidsarm ontwerp in de procesindustrie. Meer informatie over deze projecten is op de website te vinden. De komende periode verwacht KCG nieuwe trajecten op te starten; ook deze zullen beschikbaar komen op de website.

MEER INFORMATIE

Voor meer informatie neem contact op met Miriam Weber (hoofd bureau Geluid DCMR Milieudienst Rijnmond, miriam.weber@dcmr.nl) of Rob Maat (KCG contactpersoon DCMR Milieudienst Rijnmond, rob.maat@dcmr.nl).