

TNO-Rapport
98.028

Beoordeling Laagfrequent Geluid in Woningen

TNO Preventie en Gezondheid

Datum
november 1998

Auteurs
W. Passchier-Vermeer

Gaubiusgebouw, Zernikedreef 9
Gortergebouw, Wassenaarseweg 56
Postbus 2215
2301 CE LEIDEN

TNO Preventie en Gezondheid
Gorterbibliotheek

02 DEC 1998

Telefoon 071 518 18 18
Fax 071 518 19 20

Postbus 2215 - 2301 CE Leiden

Het kwaliteitssysteem van TNO Preventie
en Gezondheid voldoet aan ISO 9001

Stamboeknummer

16.439

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook, zonder voorafgaande
toestemming van TNO

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onder-
zoeksopdrachten aan TNO, danwel de
betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

© 1998 TNO

De missie van TNO Preventie en Gezondheid is het bevorderen
van het aantal gezonde levensjaren van de mens.
Het onderzoek richt zich op verbetering van gezondheid en
gezondheidszorg in alle levensfasen: jeugd arbeidende mens
en ouderen.



Passchier-Vermeer, W.

ISBN: 90-6743-540-6

Deze uitgave is te bestellen door het overmaken van *f*21,-- (incl. BTW) op postbankrekeningnr. 99.889 ten name van TNO-PG te Leiden onder vermelding van bestelnummer 98.028.

INHOUD	pagina
SAMENVATTING	i
1. INLEIDING	
1.1 Achtergrond	1
1.2 Inhoud van het rapport	1
2. ASPECTEN VAN LAAGFREQUENT GELUID	3
2.1 Omschrijving van laagfrequent geluid	3
2.2 Bronnen van laagfrequent geluid	4
2.3 Fysische aspecten	4
2.4 Psychologische aspecten	6
2.5 Klachten en klagers	10
3. DE GEVOLGEN VAN LAAGFREQUENT GELUID	12
3.1 Geluidhinder	12
3.2 Laagfrequent geluid als stressor	12
4. WAARNEMING VAN LAAGFREQUENT GELUID	16
4.1 Introductie	16
4.2 Mediane gehoordrempel otologisch geselecteerde jonge mensen	18
4.3 Mediane gehoordrempel bevolkingsgroepen	22
4.4 Spreiding in gehoordrempels	24
4.5 Samenvatting	25
LITERATUUR	29
BIJLAGE	32

SAMENVATTING

Dit rapport is opgesteld in het kader van een project over laagfrequent geluid van de Nederlandse Stichting Geluidhinder. Het doel van het project is het vervaardigen van een handleiding over het meten en beoordelen van laagfrequent geluid in de woonomgeving voor de afhandeling van klachten over binnenshuis optredend laagfrequent geluid. In dit rapport is een afleiding gegeven van een beoordelingscurve voor laagfrequent geluid in verband met de afhandeling van klachten. Deze beoordelingscurve is een grafiek die het verband geeft tussen het geluiddrukkniveau en de frequentie in het frequentiegebied van 4 tot 125 Hz. Op basis van de beschikbare informatie is geschat dat een laagfrequente toon of smalle ruisband met een geluiddrukkniveau en frequentie op de curve door 10% van een doorsnee groep 50 - 60 jarigen (verder aangegeven met 55-ers) in een ruimte gehoord kan worden en door 90% niet. De beoordelingscurve is opgesteld op basis van het gehoor van 55-ers, omdat gebleken is dat vooral personen uit deze leeftijdsgroep klachten hebben over laagfrequent geluid in hun woning. Een beoordelingscurve voor een groep doorsnee jonge personen (18 - 25 jaar) ligt naar schatting 3 dB onder de gegeven beoordelingscurve voor 55-ers.

Ook is in het rapport op basis van een literatuuronderzoek achtergrondinformatie opgesteld over het vóórkomen en de effecten van laagfrequent geluid. De volgende onderwerpen komen in het rapport aan de orde:

- wat is laagfrequent geluid;
- wat zijn laagfrequente geluidbronnen van natuurlijke en niet natuurlijke oorsprong;
- fysische aspecten: voortplanting, geluidisolatie, laagfrequente geluidbronnen;
- fysiologische aspecten: wijze van waarnemen, maskering, tonen, luidheid;
- psychologische aspecten: klachten, klagers;
- hinder door laagfrequent geluid;
- laagfrequent geluid als stressor.

1. INLEIDING

1.1 Achtergrond

Dit rapport is opgesteld in het kader van een project over laagfrequent geluid van de Nederlandse Stichting Geluidhinder. Het doel van het project is het vervaardigen van een handleiding over het meten en beoordelen van laagfrequent geluid in de woonomgeving. Die handleiding beoogt een richtlijn te geven die bruikbaar is voor de *afhandeling van klachten over binnenshuis optredend laagfrequent geluid*. De handleiding wordt geschreven voor een brede doelgroep: van de technisch milieu-ambtenaar met relatief weinig akoestische kennis en hulpmiddelen tot het meer gespecialiseerde akoestische adviesbureau. De handleiding wordt samengesteld door de Nederlandse Stichting Geluidhinder. In dit rapport wordt een methode gegeven om de waarneembaarheid van laagfrequent geluid in woonsituaties te beoordelen. Deze methode wordt in de handleiding verwerkt. De bijbehorende methode om laagfrequent geluid te meten (Van den Berg, 1998) wordt eveneens in de handleiding opgenomen.

Er bestaat reeds een aantal documenten (DIN 45680, 1997; Draft ANSI S12.9-1996-Part 4, 1996) die betrekking hebben op laagfrequent geluid in de woonomgeving. Deze documenten zijn opgesteld in het kader van wet- en regelgeving en geven grenswaarden voor laagfrequent geluid. Deze grenswaarden zijn niet geschikt om te gebruiken in het kader van klachten over laagfrequent geluid, omdat op basis van de aan deze grenswaarden ten grondslag liggende criteria verwacht moet worden dat ook onder de grenswaarden klachten over laagfrequent geluid kunnen optreden.

In het kader van het project is een literatuuronderzoek verricht naar het voorkomen en naar de effecten van laagfrequent geluid in de woonomgeving. Het resultaat van het literatuuronderzoek is eveneens in dit rapport opgenomen.

1.2 Inhoud van het rapport

De doelstellingen van dit rapport zijn:

- het geven van een beoordelingscurve van laagfrequent geluid in verband met de afhandeling van klachten en een verantwoording van de wijze waarop de curve is afgeleid;
- het geven van achtergrondinformatie voor degenen die van de handleiding van de Nederlandse Stichting Geluidhinder gebruik maken, over het voorkomen en de effecten van laagfrequent geluid. Degenen die zich meer in het algemeen willen oriënteren op effecten van

geluid op de gezondheid wordt verwezen naar de brochure 'Hoe ongezond is geluid?', die in 1997 door TNO Preventie en Gezondheid is uitgegeven (Passchier-Vermeer, Huizing, 1997).

Hoofdstuk 2 geeft een algemene inleiding over laagfrequent geluid en klachten over laagfrequent geluid. In hoofdstuk 3 worden hinder en stress door blootstelling aan laagfrequent geluid besproken. Hoofdstuk 4 behandelt waarneming van laagfrequent geluid en geeft de afleiding van een beoordelingscurve voor laagfrequent geluid ten behoeve van de vaststelling of klachten over laagfrequent geluid in een woning kunnen berusten op de waarneming van laagfrequent geluid in die woning.

Eventueel kunnen de hoofdstukken 2 en 3 worden overgeslagen door de lezers die uitsluitend geïnteresseerd zijn in de afleiding van het beoordelingscriterium.

2. ASPECTEN VAN LAAGFREQUENT GELUID

2.1 Omschrijving van laagfrequent geluid

Geluid is trilling van de lucht. Geluid zorgt voor verdichtingen en verdunningen in de lucht, doordat een (trillende) geluidbron de deeltjes in de lucht telkens aanstoot. De verdichtingen en verdunningen verplaatsen zich vanaf de geluidbron achter elkaar door de lucht. Geluid heeft onder meer de volgende twee kenmerken: *toonhoogte en sterkte*. De *toonhoogte* (frequentie, uitgedrukt in hertz (Hz)) wordt bepaald door het aantal verdichtingen per seconde. Bij een toon¹ van 50 Hz bijvoorbeeld zijn er vijftig verdichtingen (en ook vijftig en verdunningen) per seconde. Een ruisachtig geluid (bijvoorbeeld het geluid van een snelweg op grotere afstand) kan opgebouwd gedacht worden uit een veelheid van tonen. De *sterkte* van geluid hangt af van de mate van verdichting van de lucht. Hoe meer de lucht in elkaar gedrukt wordt hoe harder het geluid en hoe hoger het geluiddrukkniveau. Het geluiddrukkniveau van een geluid wordt gegeven in dB ten opzichte van de referentie geluiddruk van 20 μ Pa. Bij een ruisachtig geluid kunnen de geluiddrukkniveaus in aaneensluitende frequentiebanden bepaald worden. Als deze frequentiebanden elk één octaaf breed worden gekozen, dan wordt de grafiek die het verband geeft tussen de geluiddrukkniveaus in de frequentiebanden en de middenfrequenties van de octaafbanden, een octaafbandspectrum genoemd. Bij een tertsbandspectrum wordt elke octaafband in drie aaneensluitende banden verdeeld en worden de tertsbandsniveaus weergegeven als functie van de middenfrequenties van de tertsbanden.

Laagfrequent geluid is geluid dat componenten in het laagst hoorbare frequentiegebied heeft. Bij de vaststelling van het frequentiebereik moet zowel voor de laagste als de hoogste frequentie een keus gemaakt worden. Deze keuzes zijn tot op zekere hoogte arbitrair. In DIN 45680 (1997) is laagfrequent geluid gedefinieerd als geluid met frequenties in de 10 tertsbanden met middenfrequenties van 10 tot en met 80 Hz. Door de Socialstyrelsen (Gezondheidsraad) van Zweden worden de tertsbanden met middenfrequenties van 31,5 tot en met 160 Hz genomen, terwijl Draft ANSI S12.9-1996-Part 4 (1996) de drie octaafbanden rond 16, 31,5 en 63 Hz gekozen heeft. De Duitse DIN-norm neemt dus frequenties onder de 10 Hz (vanaf 8,8 Hz) mee, terwijl de andere documenten het beoordelingsgebied bij hogere frequenties afkappen. Omdat het in dit rapport gaat om een instrument dat geschikt moet zijn om klachten te beoordelen lijkt het gewenst om ook frequenties beneden 10 Hz bij de beschouwingen te betrekken. Immers, ook in dat gebied zijn luchttrillingen waarneembaar en een deel van de klachten over laagfrequent geluid heeft wellicht te maken met luchttrillingen in dit frequentiegebied. In hoofdstuk 4 wordt de waarnemingsdrempel afgeleid voor frequenties vanaf 4 Hz.

¹ Een toon is een geluid met één frequentie.

De bovengrens van het laagfrequente gebied wordt in dit rapport gelegd bij de tertsband met middenfrequentie 100 Hz. Deze keus voor de bovengrens is gemaakt omdat laagfrequente 50 Hz geluidbronnen vaak ook een goed waarneembare toon bij 100 Hz produceren. Het te beschouwen frequentiegebied omvat derhalve 15 tertsbanden met middenfrequenties van 4 tot en met 100 Hz.

2.2 Bronnen van laagfrequent geluid

In de natuur komt een verscheidenheid aan geluidbronnen voor die ook laagfrequente componenten bevatten: wind, donder, golfslag, vulkaanuitbarstingen en aardbevingen. Volgens Heringa en Vercammen (1988) zijn er in het woonmilieu vier soorten geluidbronnen met laagfrequente componenten, die niet van natuurlijke oorsprong zijn:

- . Transportmiddelen, zoals auto's, vrachtwagens, treinen en vliegtuigen;
- . Bruggen. Stalen bruggen met een overspanning kunnen gaan resoneren bij lage frequenties;
- . Zware industriële installaties: dieselmotoren, compressoren, pompen, ventilatoren, boilers en mechanische installaties zoals betontrillers, persen en schaven;
- . Discotheken/live music. Door nieuwere technieken neemt het laagfrequent vermogen van geluidinstallaties steeds verder toe, waardoor in het frequentiegebied rond 50 Hz tegenwoordig aanzienlijke niveaus kunnen worden opgewekt.

Bronnen van laagfrequent geluid in de eigen woning of buurwoning zijn onder meer ventilatoren, cv-pompen en wasmachines.

Tempest (1989) heeft in UK een landelijk onderzoek gedaan naar klachten bij lokale autoriteiten over laagfrequent geluid. Naar schatting waren er in 1989 in UK ruim 500 klachten over laagfrequent geluid. Hij noemt de volgende bronnen: industrie 35%, muziek 13%, wegverkeer 11%, handels lokaties 9%, gieterijen 6%, elektrische installaties 5%, explosies 4%, bouw 4%, mijnen 3%, en overig 10%, waaronder 2% rail- en 2% vliegverkeer.

2.3 Fysische aspecten

Voortplanting laagfrequent geluid

De absorptie van laagfrequent geluid in de atmosfeer is veel lager dan van hoger frequent geluid. Door de lage absorptie van laagfrequent geluid kunnen laagfrequente geluidbronnen op grote afstand

hoorbaar zijn. Dit wordt versterkt doordat geluidreflecties op kunnen treden door temperatuurinversies in de atmosfeer.

Laagfrequent geluid in een woning kan veroorzaakt worden door transmissie van (laagfrequent) luchtgeluid van buiten de woning, door bronnen in de woning en door het afstralen van laagfrequent geluid door trillende gebouwdelen. Daarbij kan opslinging van gebouwdelen optreden doordat de eigenfrequenties van constructies in het betreffende frequentiegebied liggen. Een secundair effect van laagfrequent geluid is dat het serviesgoed, ramen en deuren in trilling brengt, waardoor hoorbaar hoger frequent geluid (rammelen) ontstaat.

Geluidisolatie van de woning

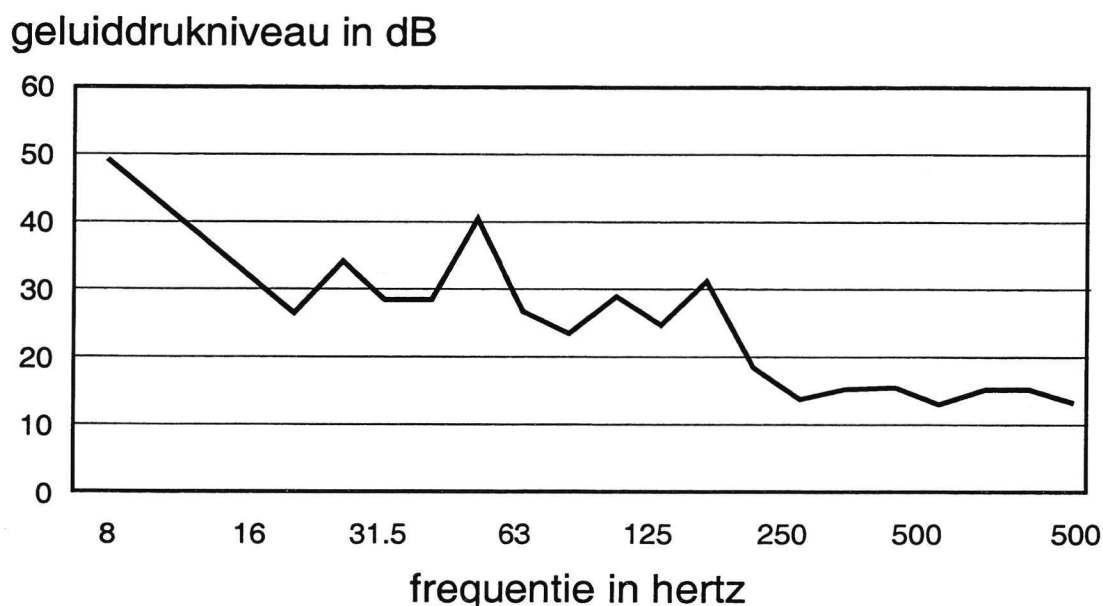
Voor laagfrequent geluid is de geluidisolatie van een woning veel geringer dan voor hoger frequent geluid. Bijvoorbeeld, voor een gevel met een 'gewoon' raam van enkel glas is de geluidisolatie rond 50 Hz ongeveer 15 dB en rond 500 Hz ongeveer 30 dB. Dit impliceert dat laagfrequent geluid veel beter in de woning doordringt dan hoger frequent geluid.

Vorm van het spectrum van laagfrequent geluid

Alle gepubliceerde spectra van binnen gemeten laagfrequent geluid op plaatsen waar dit voor klagers (en eventueel anderen) soms hoorbaar is, hebben vanaf 50 á 63 Hz naar hogere frequenties globaal een aflopend spectrum (Heringa en Vercammen, 1988; Vasudevan en Leventhall, 1982, 1989; Vercammen, 1990, 1992; Dawson, 1982; Mirowska, 1995; Van den Berg, 1998). In figuur 1 is een tertsbandspectrum van geluid met laagfrequente componenten weergegeven. Het is een tertsbandspectrum dat 's avonds laat binnenshuis (in de slaapkamer) is opgenomen op de plaats waar de betreffende persoon het laagfrequente geluid hoort. Het spectrum bevat een piek rond 50 Hz, die bij nadere analyse aangemerkt kan worden als een toon bij deze frequentie. De hellingen van de eerder genoemde gepubliceerde spectra boven 50 Hz variëren. In de meeste situaties waarin klachten optreden, zijn de tertsbandniveaus boven 500 Hz niet meer dan 10 tot 15 dB. In veel van deze situaties is het binnen gemeten A-gewogen geluidniveau over het gehele frequentiegebied niet meer dan 25 tot 30 dB(A).

In veel situaties waarin men klaagt over laagfrequent geluid, zijn in het tertsband- of lijnenspectrum pieken zichtbaar in het laagfrequente gebied die duiden op tonen. Volgens Piorr en Wietlake (1990) komen er bij laagfrequent geluid in een (woon)ruimte waarover geklaagd wordt, altijd één of meer laagfrequente tonen voor. De gepubliceerde spectra van laagfrequent geluid ondersteunen deze stelling (Heringa en Vercammen, 1988; Vasudevan en Leventhall, 1982, 1989; Vercammen, 1990, 1992; Dawson, 1982; Mirowska, 1995; Van den Berg, 1998).

Figuur 1 Voorbeeld van een tertsbandspectrum met middenfrequenties van 8 tot 500 Hz van geluid met laagfrequente componenten.



2.4 Psycho-fysiologische aspecten

Waarneming van laagfrequent geluid

Laagfrequent geluid kan worden waargenomen via het gehoor en door:

- een gevoel van druk, onder meer in de gehoorgang en op het hoofd;
- trillingen in buik, borst en extremiteiten.

In de literatuur zijn de resultaten vermeld van een aantal laboratorium onderzoeken waarin is nagegaan op welke wijze laagfrequent geluid wordt waargenomen. Deze resultaten worden hierna kort beschreven.

Inukai en medewerkers (Ikunai et al., 1986) hebben in het laboratorium bij 17 proefpersonen de waarneembaarheid van effecten door tonen van 3, 5, 10, 20 en 40 Hz met geluiddrukkniveaus van 100 en 110 dB vastgesteld. De tonen werden geproduceerd in een speciaal daarvoor geschikte ruimte en de proefpersonen werden in het geluidveld van de toon geplaatst (whole-body exposure). Gevraagd is naar de waarneembaarheid van effecten als druk op het lichaam (hoofd, borst, buik), druk op de oren, trillingen (van hoofd, borst, buik en extremiteiten) en hoorbaarheid. Uit de uitvoerige analyse van de testresultaten blijkt dat:

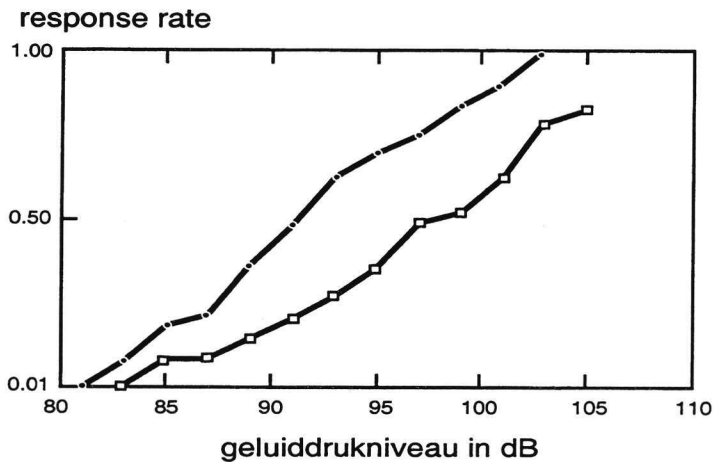
- bij 3 en 5 Hz zijn druk op de oren en het lichaam bij lagere niveaus waarneembaar dan trillingen en geluid;

- bij 10 en 20 Hz trillingen van het lichaam bij lagere niveaus waarneembaar zijn dan geluid en druk op de oren en het lichaam;
- bij 40 Hz geluid bij lagere niveaus waarneembaar is dan druk en trillingen.

Nagai et al. (1982) hebben de gehoordrempels vastgesteld voor tonen en smalle banden witte ruis in het frequentiegebied van 2 tot 32 Hz. De proefpersonen kregen de geluidssignalen in een ruimte aangeboden (whole-body exposure). Bij vrijwel alle proefpersonen (62 in totaal) neemt de waarnemingsdrempel zowel voor tonen als bandjes ruis toe met toenemende frequentie. Echter, bij ongeveer 10% van de proefpersonen nam de waarnemingsdrempel beneden 5 Hz bij aanbieding van tonen toe met toenemende frequentie. Nagai is van mening dat dit komt doordat deze proefpersonen de tonen niet via het gehoor, maar op andere wijze waarnemen. Nagai merkt op dat proefpersonen bij de laagste frequenties de ervaring van een pulsatie of een drukkend gevoel hebben. Niet duidelijk is of dat slaat op alle proefpersonen of alleen op de 10% proefpersonen met de afwijkende gehoordrempel.

Tsunekawa et al. (1987) hebben bij proefpersonen in reële situaties (onder bruggen, in een auto, naast een koeltoren) de waarneming van druk op de oren en het hoofd, en van trillingen in borst en buik bepaald als functie van het geluidsdruk-niveau van het laagfrequente geluid. In figuur 2 is een voorbeeld van een resultaat gegeven voor het laagfrequente geluid met een toon bij 13 Hz tengevolge van een brug. De response rate is de fractie van de proefpersonen dat een effect waarneemt. De totale response rate (som van de fracties voor druk en trillingen) en de response rate voor trillingen is te zien. Ook de overige situaties geven eenzelfde beeld. De totale response rate is ongeveer twee keer zo groot als die door trillingen. Dit betekent dat trillingen ongeveer even vaak worden waargenomen als druk op hoofd en oren. In de publikatie wordt vermeld dat het eventuele horen van het laagfrequente signaal is nagegaan door de proefpersonen gedurende een deel van de experimenten oorkappen op te zetten. Het effect van het eventuele horen van de aangeboden signalen op de trillings- en druksensaties bleek gering (in de publikatie niet gekwantificeerd) te zijn.

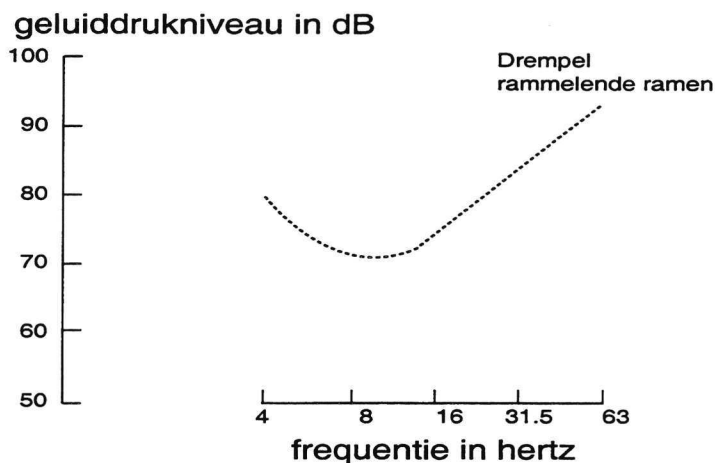
Figuur 2 De totale response rate (fractie van de proefpersonen dat een effect waarneemt) voor druk en trillingen (gesloten punten) en de response rate voor trillingen (open punten) bij proefpersonen in een situatie met laagfrequent geluid met een toon bij 13 Hz tengevolge van een brug. (Bron: Tsunekawa et al., 1987).



Zoals hiervoor reeds is vermeld kan laagfrequent geluid onder normale leefomstandigheden objecten in trilling brengen, waardoor secundair geluid wordt afgestraald. In publikaties uit Japan (Yamada, 1980; Nagai et al., 1989) wordt het geluiddrukkniveau waarbij ramen gaan rammelen gegeven als functie van de frequentie (zie figuur 3). Gerefereerd wordt aan een in het Japans gepubliceerd rapport over het rammelen van ramen door laagfrequent geluid. Niet bekend is of deze waarden ook van toepassing zijn op in Nederland gebouwde woningen.

Op basis van de hiervoor besproken onderzoeken is het niet onwaarschijnlijk dat personen laagfrequent geluid met frequenties beneden ongeveer 10 Hz ook waarnemen op een andere wijze dan via het gehoor, bijvoorbeeld door druk in de gehoorgang, bij het trommelvlies of op het hoofd. Bij hogere frequenties (tot ongeveer 20 Hz) kunnen daarbij ook trillingen die gevoeld worden in borst, buik of extremiteiten van belang zijn bij de waarneming van laagfrequent geluid.

Figuur 3 Het geluiddrukkniveau van laagfrequent geluid waarbij ramen beginnen te rammelen als functie van de frequentie van het geluid (Bron: Nagai et al., 1989; Yamada, 1982).



Maskering

Maskering is het effect dat een geluid onhoorbaar is door de aanwezigheid van een ander (maskeer)geluid. Maskering van geluid treedt niet alleen op in het frequentiegebied van het maskeergeluid maar ook in de naastgelegen frequentiegebieden. Het maskerende effect is daarbij naar hogere frequenties veel groter dan naar lagere frequenties. Maskeergeluid kan een geluid dat gelegen is in één tot drie lager gelegen tertsbanden maskeren, afhankelijk van zowel de sterkte van het maskeergeluid als van het andere geluid.

Het volgende is een praktijkvoorbeeld van het effect van maskering op het horen van laagfrequent geluid. Bij een woonhuis treedt zowel het (min of meer constante) geluid van een nabijgelegen snelweg als het laagfrequente geluid van een compressor op. Buiten zijn de geluiddrukkniveaus van het wegverkeer overdag zo hoog, dat de compressor buiten niet wordt gehoord. Gezien het frequentieafhankelijke effect van de geluidisolatie van de woning wordt het geluid van de compressor binnen niet door het wegverkeersgeluid gemaskeerd en kan binnen dus wel hoorbaar zijn. Dit horen zal duidelijker zijn als 's avonds het wegverkeersgeluid afneemt en het geluid van de compressor dezelfde sterkte houdt als overdag. Door het wegvallen van het maskerende effect van het wegverkeersgeluid is de compressor 's nachts binnen duidelijk hoorbaar.

Hoorbaarheid van een toon

Er wordt wel aangenomen dat een toon hinderlijker is dan breedbandig geluid (ISO 1996). Er kunnen twee mogelijkheden worden onderscheiden. De eerste mogelijkheid is dat de geluiddrukkniveaus in de frequenties rond een toon te laag zijn om te worden waargenomen. Er kan dan geen maskering van de toon door het omringende geluid optreden en om te bepalen of een toon gehoord wordt hoeft er geen rekening met de omliggende geluiddrukkniveaus gehouden te worden. Bij de tweede mogelijkheid zijn de geluiddrukkniveaus in de frequenties rond de toon wel hoorbaar. Of een toon in een (breedbandig) geluid hoorbaar is, hangt af van het verschil in geluiddrukkniveau van de toon en van de geluiddrukkniveaus in een frequentiegebied (de zogenoemde kritische band) van het geluid rond de toon. In het geval van laagfrequent geluid moet de kritische band met een breedte van 100 Hz (rond de frequentie van de toon) beschouwd worden. In een geluid wordt een *laagfrequente toon* waargenomen als het geluiddrukkniveau van de toon ten minste gelijk is aan het geluiddrukkniveau in de kritische band rond de toon verminderd met 2 dB².

² Een 100 Hz gebied is 8 tertsbanden breed bij een toon van 20 Hz en 3 tertsbanden bij een toon van 125 Hz. Bij beoordeling op basis van een tertsbandspectrum of een toon al dan niet hoorbaar is moet het geluiddrukkniveau van een toon bij 20 Hz om als toon gehoord te worden 7 dB boven de omringende 8 tertsbanden uitkomen, ervan uitgaande dat de geluiddrukkniveaus in de omringende tertsbanden gelijk zijn ($10 \lg 8 = 9$; $9 - 2 = 7$). Voor een toon van 125 Hz betreft dit 3 dB ($10 \lg 3 = 5$; $5 - 2 = 3$).

2.5 Klachten en klagers

Klachten

In publikaties worden de volgende details over de ervaringen van mensen met klachten over laagfrequent geluid genoemd (Gielkens, 1998; Inaba, 1988; Tempest, 1989; Benton, 1997; Tesarz, 1992; Vasudevan, 1982; Persson, 1996):

- . De richting van het geluid is niet te bepalen;
- . Het geluid domineert de omgeving;
- . Het is moeilijk om het geluid te negeren;
- . Het geluid is overal aanwezig in de ruimte;
- . Het is 's nachts erger;
- . Oudere mensen hebben er meer last van;
- . De gevoeligheid voor het geluid neemt bij iemand met klachten in de loop van de tijd toe.

Hoe omschrijven laagfrequent geluid waarnemers wat ze horen

In de literatuur wordt het gehoorde geluid omschreven als een voortdurende dreun, als een in sterkte wisselend gebonk, en ook wel als een steeds terugkerend 'gediesel'. Volgens Tempest (1989); (zie ook International Conference on Low Frequency Noise, 1985) antwoorden mensen die klagen over laagfrequent geluid steeds op de zelfde wijze op vragen als 'Vind je het lawaaiig?' 'Nee' 'Klinkt het luid?' 'Nee' 'Is it a big noise?' 'Nee' 'Is er een aspect dat je ingrijpend vindt?' 'Ja' 'Kun je aangeven welk aspect dat is?' 'Nee, dat kan ik niet omschrijven'.

Leventhall (International Conference on Low Frequency Noise, 1985) spreekt over het 'tuning-in' van een waarnemer van laagfrequent geluid. Het lijkt er op dat de waarnemingsdrempel van een klager over laagfrequent geluid langzaam afneemt en het laagfrequente geluid steeds duidelijker en gemakkelijker wordt waargenomen. Persson (International Conference on Low Frequency Noise, 1985) heeft dit bij klagers over laagfrequent geluid ook waargenomen. Zij merkt tevens op dat er waarnemers van laagfrequent geluid zijn, die aangeven dat ze niet weten hoe, maar eerst op de een of andere manier een sensatie ervaren en dan laagfrequent geluid horen.

Klagers over laagfrequent geluid

Mensen met klachten over laagfrequent geluid behoren vooral, maar niet uitsluitend, tot de leeftijdsgroep boven 50 jaar (Gielkens, 1998; Inaba, 1988; Benton, 1997; Tesarz, 1992; Vasudevan, 1982). Volgens Tempest (1989) en Gielkens (1998) hebben mensen die klagen over laagfrequent geluid geen beter gehoor dan hun leeftijdgenoten. Klachten betreffen ook vaak, maar niet altijd, laagfrequent geluid gedurende de (late) avond en de nacht (Nagai, 1989; Mirowska 1995). Het in de

diverse publikaties meest genoemde gevolg van laagfrequent geluid houdt verband met aspecten van de slaap, zoals het niet in kunnen slapen³.

Klagers in het laboratorium en thuis

Broner en Leventhall (1984) hebben laboratorium experimenten gedaan met 75 proefpersonen waarvan 21 personen met klachten over laagfrequent geluid en 54 controles. Beide groepen zijn blootgesteld aan 7 geluiden met frequenties tussen 20 en 90 Hz bij drie verschillende sterktes. Het bleek dat de gemiddelde hinderscores van beide groepen in alle 21 situaties niet verschilden, noch bleek er een systematische trend in alle resultaten tesamen. Er is ook gevraagd of men een bepaald geluid thuis acceptabel zou vinden. Dan scoren de personen met klachten bij het laagste geluiddrukkniveau veel hoger dan de anderen. Bij de zeven blootstellingen aan het laagste geluiddrukkniveau zouden 19,8% van de klagers de situatie thuis onacceptabel vinden en 5,5% van de controles. Bij de hogere geluiddrukkniveaus bleek er weinig verschil.

³ Er is één klein onderzoek verricht waarbij de invloed is bestudeerd van laagfrequent geluid op de slaap. Inaba en Okada (1988) onderzochten in het laboratorium zes studenten. Er werden slaap EEG's opgenomen. Bij blootstelling aan laagfrequent geluid blijken meer veranderingen in slaapstadia op te treden dan in een stille omgeving. Er bleek verder geen invloed op andere slaapparameters, zoals de inslaaptijd.

3. DE GEVOLGEN VAN LAAGFREQUENT GELUID

3.1 Geluidhinder

Ongewenste geluiden kunnen een gevoel geven van ergernis, wrevel, ontstemming of onbehagen. Dit heet geluidhinder. De reacties van mensen op geluid kunnen verschillen. De houding ten opzichte van het geluid speelt daarbij een rol. Ook geluidgevoeligheid, angst, en het gevoel van controle over de geluidbron is van belang voor de hinder.

De geluidhinder die in een bevolkingsgroep optreedt kan worden vastgesteld door een steekproef uit deze groep over geluidhinder te ondervragen (vragenlijstonderzoek). Dergelijk onderzoek naar de geluidhinder van diverse geluidbronnen in de woonomgeving vindt regelmatig in Nederland plaats (o.a. de Jong, 1981; de Jong, 1988; de Jong, Opmeer, Miedema, 1994; de Jong, Miedema, Hendriks et al., 1996). Specifiek onderzoek naar geluidhinder door laagfrequent geluid in bevolkingsgroepen heeft in Nederland niet plaatsgevonden. Wel mag verwacht worden dat een deel van de bij de vragenlijstonderzoeken gerapporteerde geluidhinder het gevolg is van laagfrequent geluid, bijvoorbeeld door de industrie. In welke mate laagfrequent geluid bijdraagt aan de geluidhinder is onbekend.

Op basis van vragenlijst- en geluidonderzoeken zijn voor diverse soorten geluidbronnen (onder andere wegverkeer, railverkeer, vliegverkeer) zogenaamde dosis-effectrelaties opgesteld (zie bijvoorbeeld Miedema, 1992). Dosis-effectrelaties voor laagfrequent geluid en geluidhinder zijn niet vastgelegd. Evenmin is er specifieke op laagfrequent geluid gerichte wet- en regelgeving. Weliswaar kan laagfrequent geluid worden beoordeeld als 'gewoon' geluid, maar door de A-weging van de frequenties in het geluidsspectrum en doordat in het kader van wet- en regelgeving beoordeling plaatsvindt van buitenniveaus, is deze beoordeling niet geschikt voor laagfrequent geluid.

Op het verband tussen geluidhinder, bepaald in laboratoriumonderzoek, en luidheid van laagfrequent geluid wordt in de paragrafen 4.6 en 4.7 ingegaan. De daartoe benodigde basis-informatie wordt in paragraaf 4.2 behandeld.

3.2 Laagfrequent geluid als stressor

Stress kan naar de oorzaak ervan worden ingedeeld in drie categorieën: stress tengevolge van gebeurtenissen op wereldschaal (rampen/oorlog), stress ten gevolge van ingrijpende persoonlijke gebeurtenissen (overlijden/scheiding) en stress als gevolg van 'achtergrond' stressoren (Lazarus en

Cohen, 1977). Laagfrequent geluid is een typisch voorbeeld van een achtergrond stressor (Benton en Leventhall, 1994). Stress tengevolge van rampen en gebeurtenissen in het persoonlijke leven hebben gemeen dat de oorzaak en het begin van het optreden van de stressor bekend is en dat over het algemeen begrip voor en steun van derden aanwezig is. Veelal wordt het door de omgeving aan de getroffene toegestaan om zo'n gedrag te ontwikkelen dat deze leert omgaan met de stressor (coping gedrag). Achtergrond stressoren zijn anders in die zin dat de betrokkene zich van de stress in het begin niet volledig bewust is en de stressor vrijwel ongemerkt een integraal onderdeel van de omgeving van betrokkene wordt. Personen die aan achtergrond stressoren worden blootgesteld zijn over het algemeen niet in staat aan te geven wanneer specifieke stress symptomen zijn begonnen op te treden, noch kunnen zij de oorzaak van de symptomen onderkennen. Aangezien achtergrond stressoren over het algemeen niet onmiddellijk een volledige ineenstorting tot gevolg hebben, gaat men in het begin gewoon met het dagelijkse leven door. Daarom is het gevolg van de stressor cumulatief (bouwt zich op) waarbij een langzame vermindering van taakuitvoering en kwaliteit van leven begint op te treden. Het algemene probleem met achtergrond stressoren is dat ontdekking niet altijd gepaard gaat met een toename van de controle over de stressor. Het gebrek aan controle over een achtergrond stressor staat dan ook centraal bij de gevolgen van zo'n stressor.

Met betrekking tot 'gewone' omgevingsgeluiden, zoals afkomstig van het verkeer en de industrie, komen steeds meer onderzoeksgegevens beschikbaar die aantonen dat deze geluiden bij langdurige blootstelling bij een deel van de blootgestelden stress veroorzaken (Passchier-Vermeer, 1993; Gezondheidsraad, 1994). Met 'gewoon' omgevingsgeluid kunnen mensen in de omgeving de ervaren stress begrijpen, ook al ervaart men zelf geen of minder overlast. Veel gecompliceerder is het over het algemeen met stress door laagfrequent geluid. Vaak is er in een woonomgeving maar één persoon die het laagfrequente geluid waarneemt en bij deze persoon ontstaat soms twijfel aan de eigen geestelijke vermogens. Daarbij is een belangrijke factor dat de bron door de klager veelal niet is aan te wijzen. Als men een klacht indient bij de betrokken autoriteiten, wordt als vervolg daarop soms ook niet door geluidmetingen aangetoond dat er laagfrequent geluid in een situatie aanwezig is. Vaak blijkt dat de omgeving zelfs erg rustig is. Dit heeft vaak tot gevolg dat de betrokkene steeds sterker geobsedeerd raakt door het laagfrequente geluid, en steeds slechter gaat functioneren.

Gevolgen van stress

De reacties op een stressor kunnen van psychologische, gedragsmatige en somatische aard zijn (Gezondheidsraad, 1992). Psychologische effecten zijn naast hinder bijvoorbeeld, depressie, frustratie en irritatie. Voorbeelden van gedrag als reactie op stressoren zijn agressie, vermijdingsgedrag en overmatig gebruik van alcohol, tabak, drugs of voedsel. Somatisch zijn effecten als veranderingen in de bloedsomloop (hoge bloeddruk) en ademhaling, hoofdpijn, duizeligheid, zweten, en slapeloosheid.

De gevolgen van stress door laagfrequent geluid kunnen in epidemiologisch onderzoek in kaart gebracht worden. Een voorbeeld van een dergelijk onderzoek is het in Engeland in 1982 uitgevoerde onderzoek bij 40 klagers over laagfrequent geluid in hun woning (Vasudevan en Leventhall, 1982). Uit de dagelijks gedurende enkele maanden ingevulde logboekjes bleek dat de overlast door het laagfrequente geluid het grootst was tussen laat op de avond en vroeg in de morgen. Tijdens de interviews bleek bij velen dat het geluid hun zo bezighield dat ze ternauwernood aan iets anders konden denken. Dat leidde tot gebrek aan concentratie, gezondheidsklachten zoals hoofdpijn, depressieve gevoelens, slapeloosheid. Het voornaamste aspect dat volgens de deelnemers aan het onderzoek overlast veroorzaakt is het dieselen/bonken van het geluid, niet de sterkte. De auteurs hebben tevens in een aantal woningen van respondenten geluidmetingen uitgevoerd. In alle gevallen waren laagfrequente tonen in het spectrum aanwezig. Op één lokatie bevatte het spectrum bij ongeveer 215 Hz twee tonen met slechts een gering verschil in frequentie (2 Hz). Door het optreden van een variatie in het niveau van het geluid (een zogenoemde zweving) met een frequentie van 2 Hz is het dieselende karakter van het geluid te verklaren.

Nagai et al. (1989) hebben vragenlijstonderzoek gecombineerd met metingen van laagfrequent geluid. De onderzoekslokatie was een woonwijk vlakbij een 'superhighway' die over een grote hoge brug was aangelegd. Uit geluidmetingen bleek dat het laagfrequente gedeelte van het geluidsspectrum een toon bevatte met een frequentie van 6 Hz. Het mediane geluiddrukkniveau in de frequentie range van 1 tot 50 Hz was overdag 85 dB en 's nachts 73 dB (dichtbij de brug, in de woonwijk buiten gemeten). Binnen in de woningen waren de geluiddrukkniveaus in deze frequentie range ongeveer 10 dB lager. Er hebben 909 personen in de woonwijk een vragenlijst over hun gezondheid ingevuld en op 368 adressen is per gezin een vragenlijst over de woonomgeving ingevuld. Zeventig procent van de gezinnen ondervond hinder van het schudden van ramen en 66% van het rammelen van ramen. Op minder dan 20 meter van de superhighway lag het percentage gehinderden door rammelen tussen 80 en 90%.

De gezondheidsvragenlijst is ook ingevuld door een controle populatie uit een andere stad, met eveneens veel verkeersgeluid maar niet met de laagfrequente componenten als gevolg van de aanwezigheid van een brug. Er is gevraagd naar 21 gezondheidsaspecten. Bij 11 van deze aspecten bleek het percentage mensen met klachten over een aspect in de onderzoekspopulatie tenminste 10% hoger te liggen dan in de controle populatie. Het betreft onder meer hoofdpijn, een zwaar gevoel in het hoofd, vermoeidheid, oorsuizen, moeilijkheden met ademen, druk op de oren. Het grootste verschil tussen onderzoeks- en controle populatie bestond echter uit de mate waarin slaapproblemen optraden. In de belaste groep had 48% van de personen slaapproblemen en in de controle groep 11%. Een nadere analyse toonde aan dat met name het rammelen van ramen de oorzaak van de slaapproblemen was.

Het probleem met de interpretatie van deze uitkomst

is dat er waarschijnlijk een hoge correlatie is tussen het geluidniveau bij hogere frequenties en het laagfrequente geluidniveau. De vermindering in gezondheid kan dus niet alleen aan laagfrequent geluid toegeschreven worden. De auteurs zijn van mening dat het gerammel van de ramen en de daardoor verminderde slaapkwaliteit wel uitsluitend een effect van laagfrequent geluid is.

Laboratoriumexperimenten

Osguthorpe en Mills (1982) hebben in het laboratorium het effect van blootstelling aan laagfrequent geluid (octaafbanden rond 63, 125, en 250 Hz) op bloedcirculatie (hartslag, bloeddruk) en stresshormonen (cortisol, catecholaminen) in het bloed onderzocht. Zij stellen een statistisch significante verhoging van cortisol door blootstelling aan elk van de octaafbanden vast. Dit resultaat wijst er op dat laagfrequent geluid dezelfde fysiologische gevolgen heeft als hoger frequent geluid.

4. WAARNEMING VAN LAAGFREQUENT GELUID

4.1 Introductie

Gehoordrempel en waarnemingsdrempel

Centraal bij de behandeling van klachten over laagfrequent geluid staat de vraag of een klager in staat is het eventueel in een ruimte aanwezige geluid waar te nemen. Deze waarneming zal over het algemeen via het gehoor gebeuren. Echter, op basis van de in paragraaf 2.4 besproken onderzoeksresultaten is het waarschijnlijk dat personen laagfrequent geluid met frequenties beneden ongeveer 10 Hz ook waarnemen op een andere wijze dan via het gehoor, bijvoorbeeld door druk in de gehoorgang, bij het trommelvlies of op het hoofd. Bij iets hogere frequenties (ongeveer 20 Hz) kunnen daarbij ook trillingen gevoeld worden in borst, buik of extremiteiten. Bij de laagste frequenties zou dus niet over gehoordrempel maar over waarnemingsdrempel gesproken moeten worden. Opvallend is echter dat in alle betreffende publikaties met resultaten over psycho-akoestische testen niet de term waarnemingsdrempel maar de term gehoordrempel wordt gehanteerd, ook voor de waarneming in het zeer laagfrequente gebied. Toch zijn de proefnemingen vrijwel altijd zo ingericht dat het laagfrequente geluid door de proefpersonen ook via druk en trillingen zou kunnen zijn waargenomen. Bij de volgende bewerkingen van gegevens wordt de term gehoordrempel gehanteerd. In de conclusie na de bewerking wordt op het boven gestelde teruggekomen.

Horen met twee oren

Voor veel toepassingen wordt de gehoordrempel van personen bepaald met behulp van een audiometer die is uitgerust met hoofdtelefoons. Bij deze 'gewone' vorm van audiometrie wordt de gehoordrempel als functie van de frequentie bepaald voor beide oren afzonderlijk. Een audiometer wordt zo geijkt dat een geselecteerde groep jonge mensen bij alle frequenties een mediane gehoordrempel heeft van 0 dB. In dit hoofdstuk worden gehoordrempels beschouwd die zijn bepaald met behulp van geluid dat via luidsprekers wordt gepresenteerd aan luisteraars die zich in een daartoe speciaal ingerichte ruimte bevinden. Deze vrijwel uitsluitend in de psycho-akoestiek toegepaste methodiek levert de gehoordrempel als functie van de frequentie als de luisteraar met beide oren tegelijkertijd naar het aangeboden geluid luistert, de zogenoemde binaurale gehoordrempel. Deze gehoordrempel (in dB) is het juist hoorbare geluidsdrukkniveau (ten opzichte van een geluidsdruk van 20 μ Pa) en dat geluidsdrukkniveau wordt bepaald met 'gewone' geluidmeet-apparatuur. De binaurale gehoordrempels zijn dus geschikt om te worden vergeleken met de uitkomsten van geluidmetingen die worden uitgevoerd in woningen om na te gaan of laagfrequent geluid aanwezig is. Immers, als de binaurale gehoordrempel van een persoon bij een bepaalde frequentie bijvoorbeeld 50 dB is en het geluidsdrukkniveau van een geluid in een ruimte bij deze frequentie gelijk aan 60 dB, dan zal deze

persoon het geluid kunnen horen. Een andere persoon met een binaurale gehoordrempel van 70 dB bij dezelfde frequentie echter niet.

Beschrijving gehoordrempels van groepen personen

Er zijn individuele verschillen tussen de gehoordrempels (bij een bepaalde frequentie). De verdeling van de gehoordrempels van een groep personen bij een bepaalde frequentie wordt beschreven met een 'gemiddelde' en één of meer maten voor de spreiding in de gehoordrempels. De gehoordrempels van doorsnee populaties zijn over het algemeen niet 'statistisch normaal verdeeld'. Allerlei oorzaken van gehoorverlies hebben bij een doorsnee populatie tot gevolg dat er meer spreiding is in de hogere (slechtere) gehoordrempels dan in de lagere (betere) gehoordrempels, waardoor de gehoordrempels niet normaal maar scheef verdeeld zijn. Daarom karakteriseren de gemiddelde gehoordrempel en de standaarddeviatie in de gehoordrempels de verdeling van de gehoordrempels van een groep personen niet volledig. In dit hoofdstuk wordt de verdeling van gehoordrempels van een groep personen beschreven met de mediane gehoordrempel en de gehoordrempel die juist wordt overschreden door 90% van de gehoordrempels. Het verschil tussen de mediane gehoordrempel en de gehoordrempel die door 90% van de gehoordrempels wordt overschreden wordt in dit hoofdstuk kortheidshalve de spreiding in de (betere) gehoordrempels genoemd.

Aanpak in stappen

Omdat het bepalen van de ruimtelijke binaurale gehoordrempels, vooral in het laagfrequente gebied, hoge eisen stelt aan de meetruimte en de apparatuur zijn deze metingen zeldzaam. In de literatuur, zoals bijvoorbeeld in ISO-documenten, zijn dan ook niet 'zomaar' de gegevens voorhanden die benodigd zijn voor een beoordelingsmethodiek. Daarom wordt in het vervolg met behulp van wel aanwezige informatie de beoordelingscurve geschat. Daarbij worden de volgende stappen gezet:

- allereerst wordt voor het laagfrequente gebied de mediane gehoordrempel als functie van de frequentie bepaald voor een groep geselecteerde jonge proefpersonen;
- vervolgens wordt voor het laagfrequente gebied de mediane gehoordrempel als functie van de frequentie bepaald voor een doorsnee bevolkingsgroep van 50 tot 60 jaar, hierna aangegeven met 55-ers. Deze leeftijd is gekozen, omdat mensen met klachten over laagfrequent geluid voor het merendeel van deze leeftijd zijn;
- uit gegevens over de spreiding in de gehoordrempels wordt vervolgens een schatting gemaakt van de gehoordrempel die door 90% van de 55-ers juist wordt overschreden als functie van de frequentie. Deze curve geeft het geluiddrukkniveau van een toon (of een ruisbandje) als functie van de frequentie: naar schatting 90% van een doorsnee groep 55-ers is niet in staat om zo'n toon (of smalle ruisband) te horen. Deze curve wordt aangemerkt als de beoordelingscurve. Omdat het hier gaat om de beoordeling of een klager in staat is een eventueel in een ruimte

aanwezig laagfrequent geluid te horen, is gekozen voor de 90%-gehoordrempel. Immers, laagfrequent geluid met geluiddrukkniveaus onder de curve kunnen door ten hoogste 10% van de klagers gehoord worden. Een beoordelingscurve die op een nog hogere dan de 90 percentielwaarde zou berusten, kan niet betrouwbaar worden afgeleid. In het vervolg wordt wel kort ingegaan op de mogelijke ligging van een curve die berust op de 95% waarde van de gehoordrempels van 55-ers;

- om verder inzicht te krijgen in de gehoordrempels van een doorsnee groep 55-ers wordt ook een schatting gemaakt van de gehoordrempels die door 10% van de groep juist wordt overschreden (de gehoordrempels van degenen met grotere gehoorverliezen).

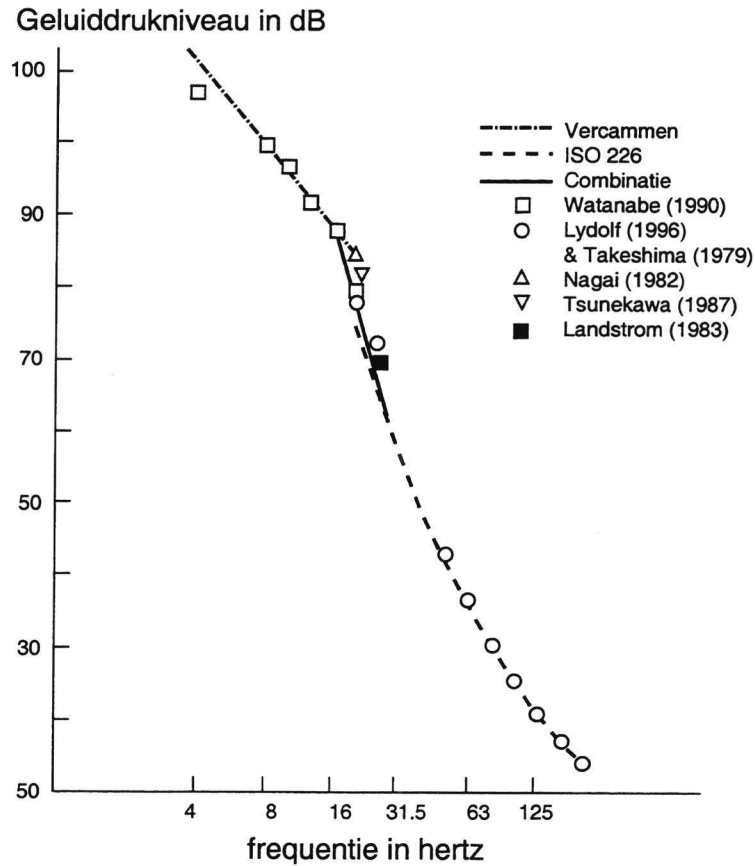
De bijlage behandelt de luidheid en de in het laboratorium vastgestelde hinderlijkheid van laagfrequent geluid. Deze onderwerpen zijn in een bijlage ondergebracht omdat ze kennis vereisen van de in paragraaf 4.2 gegeven informatie en toch niet passen binnen dit hoofdstuk.

4.2 Mediane gehoordrempel otologisch geselecteerde jonge mensen

Gehoordrempels uit ISO 226

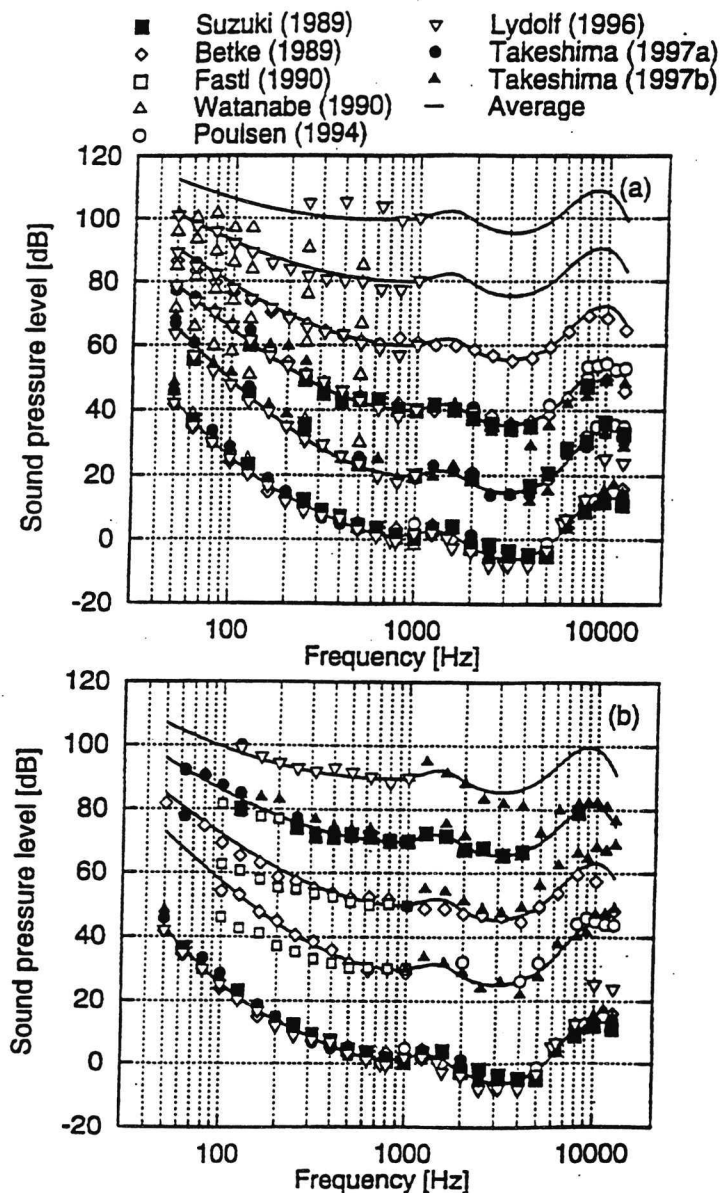
In ISO 226 (1989) zijn gegevens opgenomen over de binaurale gehoordrempels van otologisch geselecteerde jonge (18 - 25 jaar) mensen, die niet aan hoge geluidsniveaus zijn blootgesteld op het werk of in de vrije tijd. Otologische selectie houdt in dat personen met mogelijk gehoorverlies door ziekte, medicijnen of ongevallen niet in de onderzoeksgroep zijn opgenomen. De mediane waarden van de gehoordrempels (in dB) zijn gegeven ten opzichte van een geluiddruk van 20 μ Pa en komen overeen met geluiddrukkniveaus die bepaald kunnen worden met een 'gewone' geluidmeter. De gehoordrempels zijn bepaald voor zuivere tonen en tertsbanden (witte) ruis met geluidvelden die overeenkomen met een vrij veld (waarbij het gezicht van de proefpersoon is gekeerd naar de bron van het signaal) en een diffuus veld. De mediane gehoordrempels zijn in ISO 226 vastgelegd voor frequenties van 20 tot 16 000 Hz. Bij frequenties tot en met 315 Hz is er geen verschil in mediane gehoordrempels bepaald met zuivere tonen met een vrij geluidveld en tertsbanden (of nauwere frequentiebanden) in een diffuus veld. De in ISO 226 gegeven waarden zijn dus geschikt om als basis te dienen om vast te stellen of in een woning laagfrequente geluiden (tonen of breedbandiger ruis) met frequenties vanaf 20 Hz gehoord kunnen worden. De betreffende mediane gehoordrempels zijn in figuur 4 voor het laagfrequente gebied vanaf 20 Hz opgenomen.

Figuur 4 Mediane waarden van de ruimtelijk bepaalde binaurale gehoordrempels (in dB ten opzichte van 20 μ Pa) van groepen otologisch geselecteerde jonge proefpersonen als functie van de frequentie.



De in figuur 4 opgenomen gehoordrempels vanaf 20 Hz uit ISO 226 zijn vastgesteld op basis van onderzoek uit de zestiger en zeventiger jaren. Thans wordt er door ISO/TC43/WG1 een algehele herziening van ISO 226 voorbereid. Hoewel het vooral de 'equal loudness level contours' betreft, wordt ook de mediane gehoordrempel in het bestaande document vergeleken met uitkomsten van recent onderzoek (zie figuur 5). De mediane gehoordrempels in het laagfrequente gebied, in recent onderzoek onderzocht vanaf 50 Hz, behoeven geen wijziging (zie de gecombineerde waarden van Lydolf en Takeshima in figuur 4).

Figuur 5 Mediane gehoordrempel en curven van gelijk luidheidsniveau. Bovenste figuur: mediane gehoordrempel en isofonen voor 20, 40, 60 en 80 phon. Onderste figuur: mediane gehoordrempel en isofonen voor 30, 50, 70 en 90 phon.



Gehoordrempels vastgesteld door Vercammen (1989)

Vercammen (1989), zie ook Heringa en Vercammen (1988), geeft op basis van 7 publikaties, voor het frequentiegebied tussen 4 en 20 Hz de gehoordrempel als functie van de frequentie (zie figuur 4). Het betreft een gewogen gemiddelde van de resultaten van de 7 onderzoeken. De nieuwere meetwaarden van Watanabe en Møller (1990), eveneens opgenomen in figuur 4, vertonen een uitstekende overeenkomst met de relatie opgesteld door Vercammen.

G-curve uit ISO 7196

In ISO 7196 (1994) is een weegcurve voor laagfrequent geluid beneden 20 Hz, de zogenoemde G-curve, vastgelegd. De reciproke van deze weegcurve is in het door Vercammen beschouwde

frequentiegebied identiek aan de relatie gegeven door Vercammen. Volgens Møller en anderen (zie onder meer de discussie tijdens de International Conference on low frequency noise and vibration in London in 1985) geeft de G-curve beneden 20 Hz een goede afspiegeling van de gehoordrempel in dat frequentiegebied.

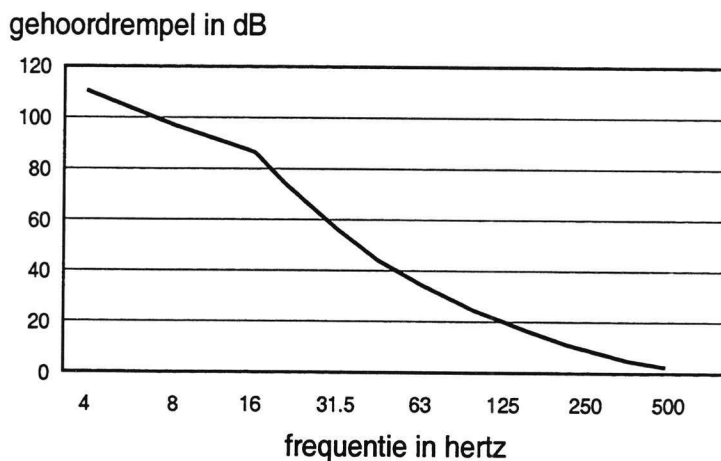
Aanpassing in het frequentiegebied rond 20 Hz

Bij 20 Hz is er een verschil van 10 dB tussen de gehoordrempel volgens Vercammen en die volgens ISO 226. Voor een nadere beschouwing zijn eveneens de gegevens over de gehoordrempels in het frequentiegebied van 16 tot 25 Hz uit vier publikaties in figuur 4 weergegeven. Op basis daarvan lijkt het geoorloofd om bij en beneden 16 Hz de gehoordrempel gegeven door Vercammen aan te houden, bij 25 Hz en hogere frequenties de waarden uit ISO 226 en een lineaire relatie aan te nemen voor de gehoordrempel als functie van de frequentie in het tussengebied.

De mediane gehoordrempel voor otologisch geselecteerde jonge proefpersonen

In tabel 1 zijn de gehoordrempels als functie van de frequentie weergegeven. Alleen voor het frequentiegebied boven 20 Hz is vastgesteld dat het mediane waarden betreffen. In het lagere frequentiegebied zijn de waarden bepaald door middeling van onderzoeksresultaten. Omdat de gehoordrempels van een groep *jonge* mensen met een *normaal* gehoor bij de lagere frequenties (vrijwel) normaal verdeeld zijn, is het verschil tussen mediaan en gemiddelde in deze gevallen te verwaarlozen. In dit rapport wordt dan ook aangenomen dat het in dit gebied beneden 20 Hz ook medianen betreft. Het resultaat is eveneens in figuur 6 weergegeven.

Figuur 6 Mediane gehoordrempels van een otologisch geselecteerde groep jonge proefpersonen.



4.3 Mediane gehoordrempel bevolkingsgroepen

In het voorgaande is de mediane gehoordrempel gegeven voor een otologisch geselecteerde groep jonge proefpersonen. Voor doorsnee bevolkingsgroepen wijkt de mediane gehoordrempel af van die van deze groep. Er zijn twee aspecten die wat dat betreft nadere beschouwing behoeven: de afhankelijkheid van de leeftijd van de mediane gehoordrempel en het optreden van gehoorafwijkingen in een doorsnee bevolkingsgroep, omdat dat immers geen otologisch geselecteerde populatie betreft.

Leeftijd

Er is nauwelijks onderzoek gedaan bij andere dan jonge proefpersonen naar de binaurale ruimtelijk bepaalde gehoordrempel en naar het verband tussen deze drempel en de leeftijd. In een klein Japans onderzoek (60 personen) uit 1965, waarvan de Japanse publikatie ten behoeve van ISO/TC43/WG1 vertaald is, blijkt het volgende. Bij de laagste in het onderzoek beschouwde frequentie (63 Hz) heeft de gemiddelde gehoordrempel (en de standaarddeviatie van de gemeten gehoordrempels) als functie van de leeftijd de volgende waarden:

Leeftijd	Gemiddelde (in dB)	Standaarddeviatie (in dB)
18 - 24 jaar	34,5	4,1
25 - 34 jaar	34,0	5,2
35 - 44 jaar	36,0	7,3
45 - 54 jaar	38,0	6,1
55 - 64 jaar	47,5	6,8

Er is dus tot 55 jaar een toename van ongeveer 4 dB in de gemiddelde binaurale gehoordrempel bij 63 Hz.

In ISO 7029 is de verdeling van de gehoordrempels (inclusief de mediane waarden) vanaf 125 Hz als functie van de leeftijd gegeven. Het betreft in dit document gehoordrempels die met behulp van een audiometer met hoofdtelefoons door aanbieding van geluid aan één oor (monoraal) bepaald zijn. De gehoordrempels zijn vastgelegd ten opzichte van het nulniveau van de audiometer. Bij de laagste frequenties (125 en 250 Hz) neemt de mediane gehoordrempel toe van 0 dB bij 20 jaar tot 5 dB bij 55 jaar en 8 dB bij 70 jaar. Het is plausibel dat de toename met de leeftijd van de binaurale gehoordrempel hetzelfde verloop heeft als die van de monoraal bepaalde gehoordrempel. Voor een groep 55-ers is de mediane waarde van de binauraal bepaalde gehoordrempel bij de frequenties 125 en 250 Hz dus naar schatting 5 dB hoger dan bij een groep \pm 20 jarigen. Het lijkt niet onredelijk om te veronderstellen dat een dergelijke schatting ook voor de lagere frequenties geldt. Voor een otologisch geselecteerde groep 55-ers wordt derhalve een verschil van 5 dB met de mediane gehoordrempel van otologisch

Tabel 1 Mediane gehoordrempel van een groep otologisch geselecteerde jonge proefpersonen*.

Middenfrequentie tertsband in Hz	Geluiddrukniveau in dB t.o.v.20 µPa
4	112
5	108
6,3	104
8	100
10	96
12,5	92
16	88
20	78
25	66
31,5	59
40	50,5
50	43,5
63	37,5
80	31,5
100	26,5
125	22
(160)	(18)
(200)	(14,5)
(250)	(11)
(315)	(8,5)
(400)	(5,5)
(500)	(3,5)

* De mediane waarden in het frequentiegebied van 160 tot 500 Hz zijn eveneens in de tabel opgenomen.

Otologisch niet geselecteerde groepen

Er is een verschil in de mediane gehoordrempel van otologisch geselecteerde en otologisch niet geselecteerde groepen (zie voor dit onderwerp onder meer de analyse van diverse onderzoeken door Passchier-Vermeer, 1990). Dit verschil in mediane gehoordrempel bedraagt 2 dB en is onafhankelijk van de frequentie waarbij de gehoordrempels zijn bepaald. Bij de analyses zijn gehoordrempels vanaf 500 Hz en leeftijden van 20 tot 60 jaar beschouwd. De oorzaken van de geconstateerde verschillen zijn zeer divers (ototoxisch medicijnen, hoofdletsel, ziekten). Het lijkt aannemelijk dat ongeveer eenzelfde verschil optreedt bij frequenties beneden 500 Hz. Daarom wordt er van uitgegaan dat ook bij de lagere frequenties het verschil in mediane gehoordrempel van otologisch geselecteerde en niet geselecteerde groepen 2 dB is.

Uit het voorgaande volgt dat de mediane gehoordrempels van een doorsnee groep 55-ers naar schatting 7 dB boven de waarden gegeven in tabel 1 liggen.

4.4 Spreiding in gehoordrempels

Spreiding in de gehoordrempels van otologisch geselecteerde jonge mensen

In ISO 7029 is de spreiding in de monoraal bepaalde gehoordrempels van otologisch geselecteerde groepen gegeven voor gehoordrempels vanaf 125 Hz. Bij een leeftijd van 20 jaar is de spreiding bij 125 en 250 Hz 7 dB. Uit de gegevens van ISO 7029 blijkt tevens dat bij deze frequenties de gehoordrempels van een groep jonge proefpersonen normaal verdeeld zijn, in tegenstelling tot die bij hogere frequenties.

Op basis van drie onderzoeken (bij jonge mensen met een normaal gehoor) geeft Vercammen voor het frequentiegebied van 4 tot 20 Hz een standaarddeviatie in de binaurale gehoordrempels van 5 dB. Uitgaande van een normale verdeling van de gehoordrempels impliceert een standaarddeviatie van 5 dB een verschil van 6,4 dB tussen mediane gehoordrempel en gehoordrempel overschreden door 90% van de gehoordrempels. Deze waarde is goed in overeenstemming met de waarden van 7 dB bij 125 en 250 Hz uit ISO 7029.

Over de spreiding in de binaurale gehoordrempels in het tussengebied (Vercammen tot 25 Hz en ISO 7029 vanaf 125 Hz) levert de publikatie van Watanabe en Møller (1990) informatie. Uit de door hen opgegeven standaarddeviatie in de gehoordrempels is, onder aanname van een normale verdeling, het verschil tussen de mediane gehoordrempel en de gehoordrempel overschreden door 90% van de waarden geschat. Het resultaat is als volgt:

Frequentie in Hz	Vershil (in dB) tussen 90% waarde en mediaan
25	7,3
31,5	8,7
40	7,4
50	7,7
63	8,3
80	8,2
100	7,3

Voor de groepen otologisch geselecteerde jonge proefpersonen variëren de in de drie onderzoeken waargenomen verschillen tussen mediane gehoordrempel en gehoordrempel overschreden door 90%

van de gehoordrempels van 6,4 dB (Vercammen), 7 dB (ISO 7029) tot 8,7 dB (Watanabe). De waargenomen variatie lijkt niet systematisch afhankelijk van de frequentie. Er wordt in het vervolg voor dit verschil de waarde 7,5 dB aangehouden.

Voor een otologisch geselecteerde groep jonge proefpersonen liggen de 90% waarden van de gehoordrempels derhalve naar schatting 7,5 dB onder de in tabel 1 gegeven waarden.

Spreiding (verschil mediaan en 90% waarde) als functie van de leeftijd

Volgens ISO 7029 is de spreiding in de gehoordrempels van otologisch geselecteerde groepen bij 125 en 250 Hz 7 dB bij een leeftijd van 20 jaar, 9 dB bij 50 jaar en 11 dB bij 70 jaar. Bij deze lagere frequenties is er dus een relatief geringe toename in de spreiding met de leeftijd. Ook blijven de gehoordrempels bij deze frequenties bij toenemende leeftijd vrijwel normaal verdeeld. Volgens ISO 7029 is de spreiding in de gehoordrempels bij de lagere frequenties bij een groep 55-ers dus ongeveer 2 dB groter dan bij jongeren. Tellen we deze 2 dB op bij de eerder geschatte 7,5 dB voor de spreiding in de gehoordrempels van de groep jongeren, dan is het verschil tussen de mediane gehoordrempel en de gehoordrempel juist overschreden door 90% van de waarden bij een groep otologisch geselecteerde 55-ers in het laagfrequente gebied 9,5 dB. De 90% waarden van de gehoordrempels van de otologisch geselecteerde 55-ers liggen daarmee 4,5 dB onder de mediane gehoordrempel van de groep otologisch geselecteerde jonge proefpersonen (zie tabel 1).

Tussen otologisch al dan niet geselecteerde groepen personen is geen verschil in gehoordrempel die juist wordt overschreden door 90% van de gehoordrempels (Passchier-Vermeer, 1990). Dit houdt dus in dat de 90% waarden van de gehoordrempels van een doorsnee groep 55-ers ook 4,5 dB onder de in tabel 1 gegeven waarden liggen.

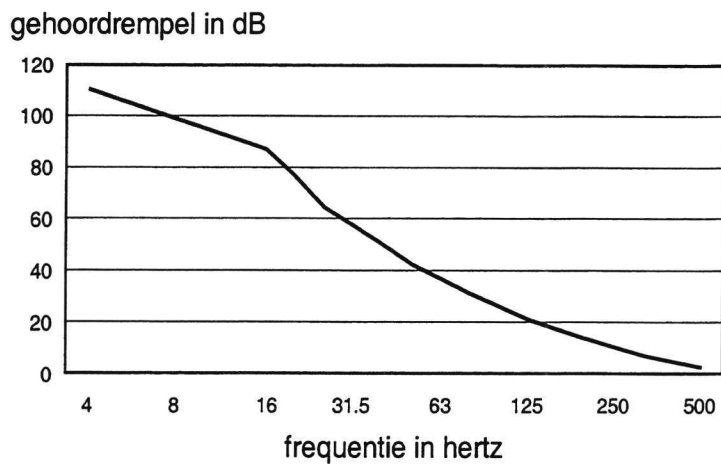
4.5 Samenvatting

In tabel 2 zijn de in de vorige paragrafen gemaakte stappen om te komen tot een beoordelingscurve voor de hoorbaarheid van laagfrequent geluid samengevat. Naar schatting is de uiteindelijke aanpassing ten opzichte van de mediane gehoordrempel van otologisch geselecteerde jonge proefpersonen - 4,5 dB. In figuur 7 is de beoordelingscurve weergegeven. De beoordelingscurve is dus een curve waarvoor geschat wordt dat 10% van een doorsnee groep 55-ers in staat is om een toon of tertsband ruis met een waarde op de curve nog net waar te nemen. Daarbij de volgende opmerkingen:

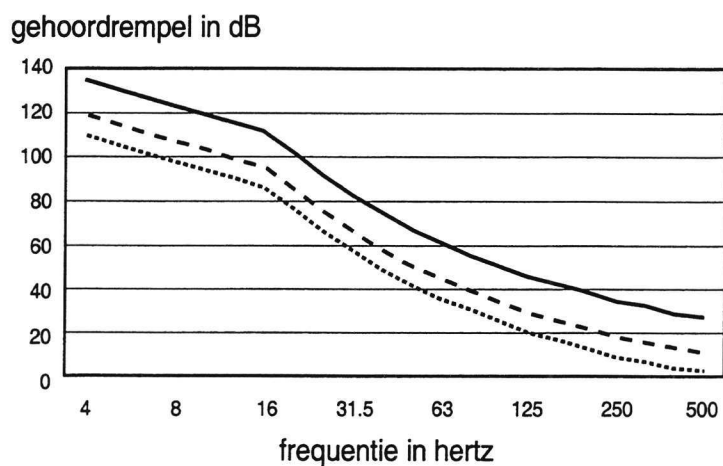
- naar schatting hoort 10% van een groep 55-ers ook nog lagere geluidsdruk-niveaus dan aangegeven door de beoordelingscurve. Gezien de beschikbare gegevens over spreiding in

- gehoordrempels en de diverse schattingen die gemaakt zijn om tot de beoordelingscurve te komen is het niet verantwoord om schattingen te doen over lagere percentages dan 10%. Wel geeft ISO 7029 voor de frequenties 125 en 250 Hz een verschil tussen de gehoordrempels overschreden door 90 en 95% voor een leeftijd van 50 - 60 jaar van 2 dB. Een beoordelingscurve voor 95% van een doorsnee groep 55-ers zou dus wel eens 2 dB onder de beoordelingscurve voor 90% kunnen liggen;
- naar schatting hoort 90% van een doorsnee groep 55-ers de geluiddruk niveaus gegeven door de beoordelingscurve niet. Om inzicht te krijgen in de gehoordrempels van deze 90% zijn in figuur 8 zowel de 90% waarden als de 50% (mediane) en 10% waarden gegeven. De 10% waarden zijn analoog aan de 90% waarden geschat, rekening houdend met de in de diverse publikaties gegeven waarden. De resultaten zijn eveneens opgenomen in tabel 3;
 - de beoordelingscurve heeft betrekking op een doorsnee groep 55-ers. Voor jongere mensen met klachten over laagfrequent geluid zou een lagere beoordelingscurve meer geschikt zijn. Naar schatting zou een beoordelingscurve voor een doorsnee groep klagers met een leeftijd van ongeveer 20 jaar 3 dB onder de beoordelingscurve voor een doorsneegroep 55-ers liggen;
 - er ontbreken teveel gegevens om voor klagers met een leeftijd ruim boven 55 jaar (70 jaar) een voorstel voor aanpassing aan de beoordelingscurve voor 55-ers te rechtvaardigen. Uit gegevens uit ISO 7029 blijken bij hogere frequenties de mediane en andere percentiel waarden van de gehoordrempels vanaf 50 - 60 jaar sterk toe te nemen. Deze waarden uit ISO 7029 berusten bij hogere leeftijden op veel minder waarnemingen dan bij de lagere leeftijden, zodat de betrouwbaarheid boven 60 jaar veel geringer is. Voor oudere leeftijdsgroepen zijn ook geen kwantitatieve gegevens beschikbaar over het verschil in gehoordrempels van otologisch geselecteerde en otologisch niet geselecteerde populaties;
 - de beoordelingscurve is gebaseerd op bepalingen van de gehoordrempel en in de achterliggende publikaties wordt niet gesproken over waarnemingen van druk en trillingen door proefpersonen. Omdat echter de testen zo zijn opgezet dat dergelijke waarnemingen ook bij de proefpersonen kunnen zijn opgetreden, wordt aangenomen dat in de gehoordrempel ook de waarneming via druk en trillingen zijn verdisconteerd. Het verdient daarom aanbeveling om bij klachten aandacht te besteden aan de wijze waarop klagers hun ervaringen omschrijven.

Figuur 7 Beoordelingscurve voor de behandeling van klachten over laagfrequent.



Figuur 8 Geluidrukniveaus (in dB ten opzichte van 20 µPa) van tonen en tertsbanden ruis die door 90%, 50% en 10% van een groep doorsnee 55-ers juist gehoord kunnen worden.



Tabel 2 Aanpassingen met betrekking tot leeftijd, otologische selectie en spreiding in gehoordrempels om de in tabel 1 gegeven mediane gehoordrempel van een groep otologisch geselecteerde jonge proefpersonen om te rekenen naar de geluidrukniveaus van tonen of tertsbanden ruis die door 10% van een doorsnee groep 55-ers nog juist worden waargenomen.

Aspect	Aanpassing
Leeftijd 55-60 jaar ten opzichte van jonge proefpersonen	mediaan + 5 dB
Doorsnee ten opzichte van otologisch geselecteerd	mediaan + 2 dB
Spreiding in gehoordrempels doorsnee groep 55-ers	90% waarde -11,5 dB
Resultaat 90% waarde doorsnee groep 55-ers ten opzichte van mediaan otologisch geselecteerde jonge proefpersonen	- 4,5 dB

Tabel 3 Procentuele waarden van de gehoordrempels (geluidrukniveau in dB t.o.v 20 µPa) van een doorsnee groep 55-ers. Het betreft de gehoordrempels overschreden door 90%, 50% (mediaan) en 10% van de gehoordrempels. De beoordelingscurve voor klagers over laagfrequent geluid is vetgedrukt.

Frequentie in Hertz	Gehoordrempel overschreden door		
	90%	50% (mediaan)	10%
4	110	119	135
5	106	115	131
6,3	102	111	127
8	98	107	123
10	94	103	119
12,5	90	99	115
16	86	95	111
20	76	85	101
25	66	75	91
31,5	57	66	82
40	48,5	57,5	73,5
50	41,5	50,5	66,5
63	35,5	44,5	60,5
80	29,5	38,5	54,5
100	24,5	33,5	49,5
125	20	29	45
160	16	25	41
200	12,5	21,5	37,5
250	9	18	34
315	6,5	15,5	31,5
400	4	12,5	28,5
500	2,2	10,5	26,5

LITERATUUR

ANDRESEN J, MØLLER H. Equal annoyance contours for infrasonic frequencies. *J Low Frequency Noise & Vibration* 1984;3:1-9

BENTON S. An investigation into the self generation of annoyance responses to low level low frequency noise. *J Low Frequency Noise & Vibration* 1991; 10(2):59-62

BENTON S. Measurement challenges in assessing the annoying characteristics of noise: is low frequency noise a special case? *J Low Frequency Noise & Vibration* 1997; 16(1):13-24

BENTON S, LEVENTHALL HG. The effect of auditory processing on the development of low level low frequency noise criteria. *J Low Frequency Noise & Vibration* 1982;1:97-108

BENTON S, LEVENTHALL HG. The role of 'background stressors' in the formation of annoyance and stress responses. *J Low Frequency Noise & Vibration* 1994;13:95-101

BERG GP VAN DEN, ALTENA PGW, NEDERHOED RR. Laagfrequent geluid in woningen. Groningen: Natuurkundewinkel RuG, 1998

BERGLUND B, HASSMEN P, JOB RFS. Health-Effects of Low-Frequency noise. ICA 95- proceedings of the 15th International Congress on Acoustics vol II. Trondheim: Sintef, 1995:17-20

BERGLUND B, HASSMEN P, JOB RF. Sources and effects low-frequency noise. *J Acoust Soc AM* 1996; 99: 2985-3002

BRONER N, LEVENTHALL HG. A criterion for predicting the annoyance due to higher level, low frequency noise. *J Sound and Vibration* 1982;84(3):443-8.

BRONER N, LEVENTHALL HG. Low frequency noise annoyance assessment by low frequency noise rating (LFNR) Curves. *J Low Frequency Noise & Vibration* 1983;2(1):20-8

BRONER N, LEVENTHALL HG. The annoyance and unacceptability of lower level low frequency noise. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1984;3(4):154-166

BRONER N, LEVENTHALL HG. Annoyance Loudness and Unacceptability of Higher Level Low Frequency Noise. *J Low Frequency Noise & Vibration*. 1985 4(1):1-11

BURDICK CK, PATTERSON JH Jr, MOZO BT, CAMP RT Jr. Threshold shifts in chinchillas exposed to low-frequency noise. *J Acoust Soc Am* 1977;61(suppl 1) S 78.

CEI/IEC Electroacoustics - Sound Level Meters. International Standard. CEI/IEC, 1997. CEI/IEC 1672

DANISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Comments on the proposed Annex D "Sounds with Strong Low-Frequency Content" ISO/DIS 1996-1-WD 1 (Jan 1988). *Delta Acoustics & Vibration* 1-3.

DAWSON H. Practical aspects of the low frequency noise problem. *J Low Frequency Noise & Vibration* 1982;1:28-44

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft. Berlin: DIN, 1997. DIN 45680:1997-03

Gezondheidsraad. Commissie Stress en gezondheid. Stress en gezondheid. Den Haag: Gezondheidsraad, 1992. Rapport A92/02.

Gezondheidsraad. Commissie Geluid en gezondheid. Geluid en gezondheid. Gezondheidsraad, 1994. Rapport 1994/15.

GIELKENS SIJSTERMANS C, COLIJN TH, JONGMANS LIEDEKERKEN AW. Gevoeligheid voor laagfrequent geluid. Een studie naar mogelijke factoren. Heerlen: juli 1998; GGD Oostelijk Zuid-Limburg

HERINGA PH, VERCAMMEN MLS. Laagfrequent geluid; een literatuurstudie. Den Haag: Ministerie van VROM, 1988. Rapport GF-HR-01-04

HOLMBERG K, LANDSTROM U, KJELLBERG A. Low frequency noise level variations and annoyance in working environments. *J Low Frequency Noise Vibration and Active Control* 1997;16(2):81-7.

HOLMBERG K, LANDSTROM U, SÖDERBERG L, KJELLBERG A, TESARZ M. Hygienic assessment of low frequency noise annoyance in working environments. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1996;15(1):7-15.

INABA R, OKADA A. Study on the effects of infra- and low frequency sound on the sleep by EEG recording. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1988;7:15-9.

International Conference on low frequency noise and vibration, London, 1985. Discussion at the end of the conference.

International Organization for Standardization. ISO 226 Acoustics - Equal-loudness level contours for otologically normal listeners - Part 1: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions. Geneva: ISO, 1997.

International Organization for Standardization. ISO 7196 Acoustics - Frequency weighting characteristic for infrasound. Geneva:ISO, 1994.

INUKA Y, TAYA H, MIYANO H ET ALL. A multidimensional evaluation method for the psychological effects of pure tones at low and infrasonic frequencies. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1986;5:104-12.

KEY KF, PAYNE MC. Effects of noise frequency on performance and annoyance for women and men. *Perceptual and Motor Skills* 1981;52:435-9.

KEY KF. Effects of low-frequency noise on performance and annoyance. *J Acoust Soc Am* 1979;65(suppl 1):S119.

KJELLBERG A, TESARZ M. Evaluation of frequency-weighted sound level measurements for prediction of low-frequency noise annoyance. *Environment Int* 1997;23:519-27.

LAUX PC, DAVIES P, LONG GR. The correlation of subjective response data with measured noise indices of low frequency modulated noise. *Noise Control Engineering J* 1993;40(3):241-53

LAZARUS RS, COHEN F. Environmental stress. In I. Attman en JF Wohlwill (eds), *Human behaviour and the environment: Current theory and research*, vol 2. New York, Plenum.

MIROWSKA M. Results of measurements and limits proposal for low frequency noise in the living environment. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1995;14:135-141.

MØLLER H. Annoyance of audible infrasound. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1987;6:1-17

MØLLER H. Discussion of 'ISO/DIS 7196 Acoustics - Methods for describing infrasound' at *Internoise 84*, Honolulu. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1985;4:34-6.

MØLLER H, LYDOLF M. Equal loudness level contours, literature overview. ISO/TC43/WG1 N 232 (intern werkdokument), 1996.

MØLLER H, ANDRESEN J. Loudness of pure tones at low and infrasonic frequencies. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1984;2:78-87.

NAGAI N, MATSUMOTO K, TAKEUCHI H ET ALL. The threshold of sensation for infrasound. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1982;1:165-73.

NAGAI N, MATSUMOTO K, JAMASUMI Y ET ALL. Process and emergence on the effects of infrasonic and low frequency noise on inhabitants. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1989;8:87-99

OSGUTHORPE JD, MILLS JH. Nonauditory effects of low-frequency noise exposure in humans. *Otolaryngol Head Neck Surg* 1982;90:367-70.

PASSCHIER-VERMEER W. Geluid en gezondheid. Achtergrondstudie. Den Haag: Gezondheidsraad, 1993. Rapport A93/02.

PASSCHIER-VERMEER W. Vibrations in dwellings: exposure and annoyance. Leiden: TNO-PG, 1995. Rapport 95.058.

PIORR D, WIETLAKE KH. Assessment of low frequency noise in the vicinity of industrial noise sources. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1990;9:116-9

RICE CG. Annoyance due to low frequency hums. *BMJ* 1994;308:355-6.

SCHOMER PD. On using the generalized concept of loudness to predict annoyance. Champaign (IL): US Army Construction Engineering Research Laboratories, 1988:1-14.

SOSIALSTYRELSEN. Indoor noise and high sound levels. General guidelines. Stockholm: Swedish National Board of Health and Welfare, 1996.

SUZUKI Y, TAKESHIMA H, OZAWA K ET ALL. Estimation of equal-loudness level contours with an equal-loudness model derived from Zwislocki's loudness function., ISO/TC43/WG1 N 268 (intern werkdocument), 1997.

TESARZ M, KJELLBERG A, LANDSTROM U, HOLMBERG K. Subjective response patterns related to low frequency noise. *J Low Frequency Noise Vibration and Active Control* 1992;16:145-9.

TEMPEST W. A survey of low frequency noise complaints received by local authorities in the United Kingdom. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1989;8:45-9.

TSUNEKAWA S, KAJIKAWA Y, NOHARA M ET ALL. Study on the perceptible level for infrasound. *J Sound and Vibration* 1987;112:15-22.

VASUDEVAN RN, LEVENTHALL HG. A study of annoyance due to low frequency noise in the home. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1982;3:157-164

VASUDEVAN RN, LEVENTHALL HG. Annoyance due to environmental low frequency noise and source location - a case study. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1989;8:30-9

VERCAMMEN MLS. Setting limits for low frequency noise. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1989;8:105-9

VERCAMMEN MLS. Low-frequency noise limits. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1992;11:7-12

VERCAMMEN MLS, HERINGA PH. Laagfrequent geluid; grenswaarden, overdracht en meten. Nijmegen: Adviesbureau Peutz & ass., 1990. Rapport R 548-13.

WATANABE T, MØLLER H. Hearing thresholds in pressure field and in free field at frequencies below 1 kHz. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1990;9:106-15.

WATANABE T, MØLLER H. Hearing thresholds and equal loudness contours in free field at frequencies below 1 kHz. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1990;9:135-48.

YAMADA S. Occurrence and control of low frequency noise emitted from an icecream storehouse. *J Low Frequency Noise and Vibration* 1982;1:19-21

YEOWART NS, EVANS MJ. Thresholds of audibility for very low-frequency pure tones. *J Acoust Soc Am* 1974;55:814-8.

BIJLAGE

LUIDHEID VAN LAAGFREQUENT GELUID

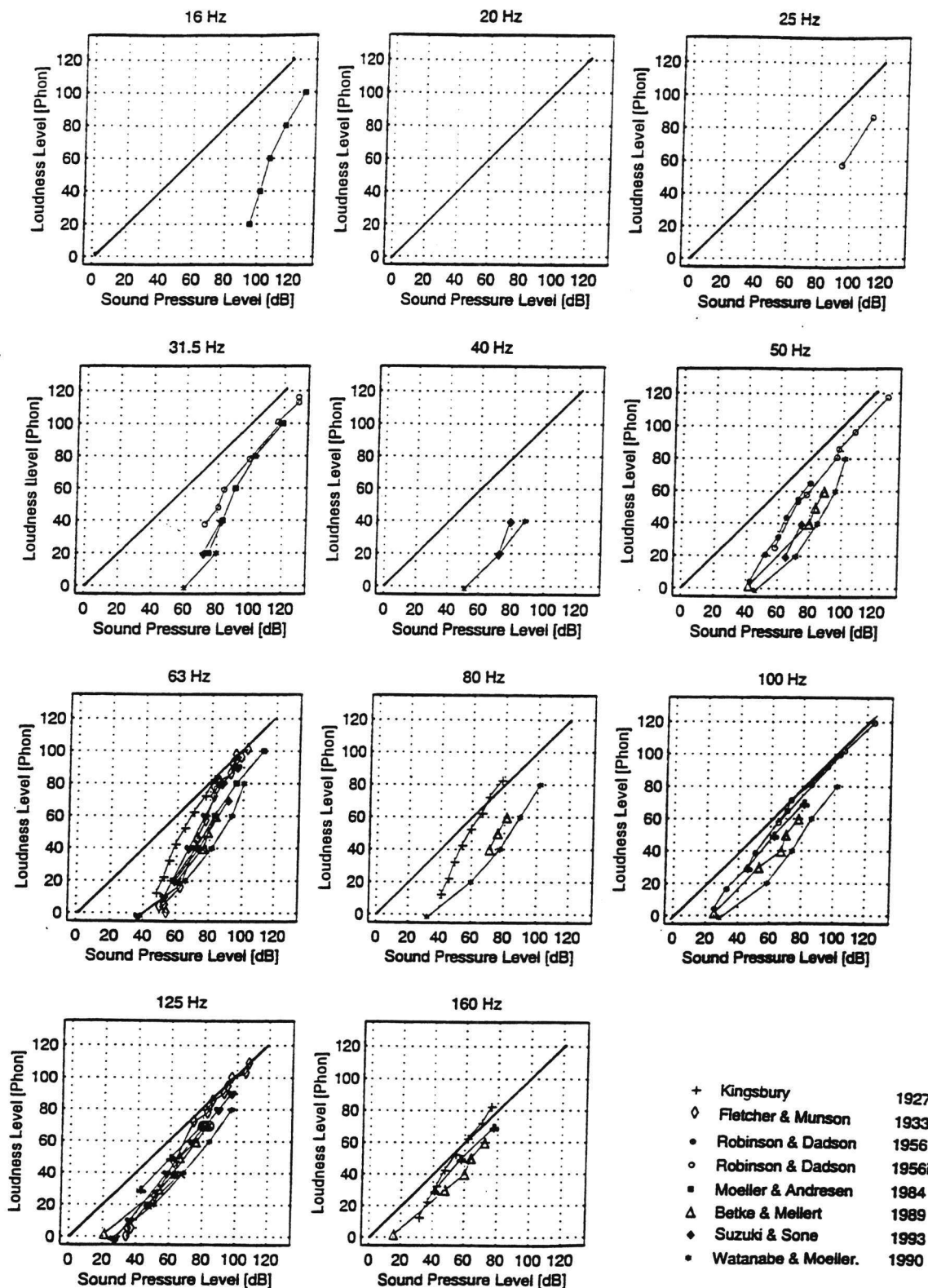
Luidheidswaarneming bij lage frequenties

In het kader van de herziening van ISO 226 zijn door Møller (1996) en door Suzuki (1997) documenten voor ISO/TC43/WG1 opgesteld over wijziging van de 'equal-loudness level contours'. Een resultaat gepresenteerd door Suzuki is reeds gegeven in figuur 5. In figuur 9 is een deel van het overzicht van Møller weergegeven. Elk van de figuurtjes geeft voor een bepaalde frequentie het verband tussen geluiddrukkniveau en luidheidsniveau. Het verband voor de referentietoon van 1000 Hz is eveneens in de figuurtjes gegeven. Duidelijk is dat hoe lager de frequentie hoe steiler de verbanden. De figuren demonstreren dat in het laagfrequente gebied de luidheid veel sterker toeneemt met het geluiddrukkniveau dan in het hoogfrequente gebied rond 1000 Hz, nadat de hogere drempel gepasseerd is.

Vergelijking contouren voor gelijke luidheid en gelijke hinder

Andresen en Møller (1984) hebben curven van gelijke hinderlijkheid van laagfrequent geluid in laboratoriumsituaties opgesteld en vergeleken met in een ander experiment vervaardigde curven van gelijke luidheid. Het resultaat is weergegeven in figuur 10. De vraag over hinder werd in het kader geplaatst van de hinder die men thuis van het betreffende geluid zou hebben. Er is een zeer goede overeenkomst tussen de beide sets curven. De relaties tussen hinder en luidheid blijven behouden over het frequentiegebied beneden 1000 Hz. Bij de lagere frequenties en de lagere niveaus lijkt de tendens aanwezig dat geluid van laag niveau en met lage frequentie nog iets hinderlijker is dan op basis van de luidheid verwacht moet worden. Gezien echter de geringe omvang van de beide onderzochte groepen kan aan dit verschil geen statistisch significante waarde toegekend worden. Een later experiment dat is uitgevoerd door Møller (1987) leverde eenzelfde resultaat op: hinder (in het laboratorium) door laagfrequent geluid is sterk gekoppeld aan de luidheid van het geluid. In het algemeen is het echter de vraag of resultaten over in het laboratorium bepaalde hinder generaliseerbaar zijn naar hinder in de woonomgeving.

Figuur 9 Luidheidsniveau in phon als functie van het geluidsdrukniveau voor frequenties van 16 tot 160 Hertz. Als rechte lijnen het verband tussen beide kenmerken voor de frequentie 1000 Hz. (Møller, 1996).



Figuur 10 Vergelijking van curven van gelijke luidheid en van gelijke hinderlijkheid. Doorgetrokken curven: gelijke hinderlijkheid. Onderbroken curven: gelijke luidheid. (Bron: Andresen en Møller, 1984).

