

88. Vallet, M.
Aspects of annoyance due to noise of road traffic survey results at 10 sites; N 81-280607, NASA TM 76561.
NASA, Washington, 1981.
89. Vos, J.
Rapport in voorbereiding.
Soesterberg, IZF-TNO, 1984.
90. Vos, J. en G.F. Smoorenburg
Annoyance ratings for impulse and traffic sounds at two different background noise levels; report nr. IZF 1983-27.
Soesterberg, IZF-TNO, 1983.
91. Wells, R.J.
Noise complaint potential: ambient noise versus intrusive noise.
Seventh International Congress on Acoustics.
Budapest, 1971.
92. Wyk, A.J. van
Comparison of measurement methods for assessing human perception of loudness: an international survey.
Acustica 1 (1981), p. 33-46.
93. Zwicker, E.
Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit.
Acustica, 8 (1958), p. 237-258.
94. Zwicker, E.
Ein Verfahren zur Berechnung der Lautstärke.
Acustica, 10 (1960), p. 304-308.
95. Zwicker, E.
Subdivision of the Audible Frequency Range into Critical Bands (Frequenzgruppen).
The Journal of the Acoustical Society of America 33 (1966) 2, p. 248.

96. Zwicker, E.
Über die Lautheit von ungedrosselten und gedrosselten Schallen.
Acustica, 13 (1963), p. 194-210.
97. Zwicker, E.
Lautstärkeberechnungsverfahren im Vergleich.
Acustica, 17 (1966), p. 278-284.
98. Zwicker, E.
Der Einfluss der zeitlichen Struktur von Tönen auf die Addition
von Teillautheiten.
Acustica, 21 (1969), p. 16-25.
99. Zwicker, E.
Procedure for calculating loudness of temporary variable sounds.
The Journal of the Acoustical Society of America 62 (1977) 3,
p. 675-682.
100. Zwicker, E.
Psychoakustik.
Berlijn, Springer Verlag, 1982.
101. Zwicker, E., G. Flottorp, S.S. Stevens
Critical band width in loudness summation.
The Journal of the Acoustic Society of America 29 (1957) 5,
p. 548-557.
102. Zwicker, E., B. Scharf
A model of loudness summation.
Psychological Review 72 (1965) 1, p. 3-26.
103. Zwicker, E., Y. Yamada
Lautstärke von Tonkomplexen im Abhängigkeit von der Bandbreite
vom Schallpegel und von zugefügtem Breitbandrauschen.
Acustica, 53 (1983), p. 26-30.

105. Zwislocki, J.J.

Masking: Experimental and theoretical aspects of simultaneous, forward, backward, and central masking.

In: Carterette, E.C., M.P. Friedman. Handbook of Perception, Volume IV, Chapter 8, p. 283-333.

New York etc., Academic Press, 1978.

BIJLAGEENIGE ASPECTEN VAN EEN COMPUTERPROGRAMMA OM GEMASKEERDE OF ONGEMASKEERDE LUIDHEID TE BEPALEN

In deze bijlage worden de belangrijkste verschillen aangegeven tussen het originele programma van Paulus en Zwicker (1972) en de aangepaste versie waarmee ook gemaskeerde luidheid kan worden berekend. Vier punten van verschil worden aan de orde gesteld, elk in een aparte paragraaf. In een vijfde paragraaf worden enige punten aangegeven waarop het programma mogelijk verbeterd kan worden, en er wordt gewezen op een beperking bij de toepassing van het programma. Voor een gedetailleerde bespreking van het programma en een listing van het programma, zie Van Meurs en Miedema (1984).

1. De bepaling van het excitatieniveaupatroon

Het programma van Paulus en Zwicker is geënt op de als ISO-norm uitgebrachte wijze van luidheidsbepaling volgens Zwicker (ISO 532-1975 (E), Section Two). In beide gevallen wordt uitgegaan van de geluidsniveaus per kritische band (of per tertsband)*. Deze worden omgezet in specifieke-luidheidswaarden per kritische band. Vervolgens wordt het N'-patroon vastgesteld door de spreiding van excitatie vanuit een kritische band naar hogere frequenties te bepalen. De hellingen van de flanken van het N'-patroon worden echter niet uitgedrukt als $-L_E/dz$, maar als $-N'/dz$. Dus, niet de hellingen van de excitatiecurven worden gebruikt, maar de hieruit afgeleide hellingen in termen van het verval in specifieke luidheid per Bark worden gehanteerd. Zodoende is in het programma een datamatrix opgenomen waarin per kritische band en per niveauklasse in die kritische band voor de helling van de rechterflank de $-N'/dz$ -waarde gegeven wordt. (Aangezien deze gegevens voor de hogere frequentiegebieden niet verschillen zijn in feite niet voor alle hogere kritische banden apart de gegevens opge-

*) Als wordt uitgegaan van tertsbandniveaus worden in het begin van de procedure hieruit de bijbehorende kritischebandniveaus afgeleid.

Deze tabel geeft dus per kritische band voor de verschillende niveaueklassen een hellingscoëfficiënt. Als eerste stap in de omzetting kunnen de ondergrenzen van de niveaueklassen uitgedrukt worden in excitatieniveaus in plaats van specifieke luidheden. Deze omzetting gebeurt met behulp van inverse van de specifieke luidheidsfunctie. De specifieke luidheidsfunctie is:

$$N'(L_E) = 0,064 \cdot 10^{0,025 L_T} \left((1 + \frac{1}{4} \cdot 10^{0,1(L_E - L_T)})^{0,25} - 1 \right) \quad (21)$$

waarbij L_T het gehoordrempelniveau is voor de betreffende kritische band.

Deze formule is ontleend aan Paulus en Zwicker (1972: 256) en is een alternatief voor formule (11) in paragraaf 4.1*). De inverse functie van N' is:

*) Formule (21) is equivalent met:

$$N'(L_E) = 0,045 \cdot 10^{0,025 L_{GR}^*} \left((1 + 10^{0,1(L_E^* - L_{GR}^*)})^{0,25} - 1 \right)$$

waarbij L_E^* en L_{GR}^* op gelijke wijze gedefinieerd zijn als L_E respectievelijk L_{GR} , behalve dat in de definities a_v op 6 dB in plaats van 3 dB wordt gesteld. Een verschil van bovenstaande formule met formule (11) is dat in bovenstaande formule als macht 0,25 genomen wordt in plaats van 0,23. Verder zijn L_E en L_{GR} vervangen door L_E^* en L_{GR}^* . Om redenen genoemd in de noot in 2.1

zou, als consequentie daarvan $(1 + 10^{0,1(L_E^* - L_{GR}^*)})$ vervangen

moeten worden door $(\frac{3}{4} + 10^{0,1(L_E^* - L_{GR}^*)})$. Dat hier een factor 0,045 in plaats van 0,068 gebruikt wordt hangt samen met de reeds genoemde verschillen en de wens om de luidheid van een 1000 Hz toon met een niveau van 40 dB 1 sone te laten zijn. Tot slot van deze noot kan er op worden gewezen dat het gebruik van L_E^* en L_{GR}^* in plaats van L_E en L_{GR} een mogelijk niet direct voorziene consequentie voor berekende luidheden heeft. Namelijk, hoewel $L_E^* - L_{GR}^* = L_E - L_{GR}$ is de waarde die bij de in praktijk gehanteerde luidheidsbepaling voor een bepaald geluid aan $L_E^* - L_{GR}^*$ wordt toegekend 3 dB lager dan de waarde die wordt toegekend aan $L_E - L_{GR}$. Dit wordt veroorzaakt doordat zowel het L_E als het L_E^* -patroon in de praktijk niet wordt afgeleid uit het maskeerpatroon voor het objectgeluid door daar 3 dB respectievelijk 6 dB bij op te tellen. In praktijk wordt de 'hoogte' van zowel het L_E als het L_E^* -patroon bepaald door de gemeten kritischebandniveaus. Doordat het L_{GR} en L_{GR}^* -patroon wel wordt verkregen door optelling van 3 dB respectievelijk 6 dB bij gehoordrempelniveaus (= maskeercurve voor de inwendige ruis) ontstaat de aangestipte complicatie).

$$L_E(N') = 10 \lg \left(4 \left(\frac{N'}{0,025 L_T} + 1 \right)^4 - 1 \right) + L_T \quad (22)$$

0,064 . 10

Het blijkt hieruit direct dat de L_E -waarden voor de grenzen uit Tabel 1 afhankelijk zijn van L_T en dus van de kritische band waarvoor een excitatieniveaugrens moet worden aangegeven. Immers, L_T verschilt bij de lagere frequenties per kritische band. Voor de 9de kritische band en verder is L_T constant. Omdat de L_T -waarde dus van invloed is op de bij een N' horende L_E -waarde is de eerste kolom van Tabel 2 in Tabel 3 vervangen door acht kolommen: voor ieder van de tweede tot en met de negende kritische band een kolom met grenswaarden in L_E . Voor de tiende en verdere kritische banden zijn de grenswaarden gelijk aan die voor de negende kritische band*).

Tabel 3. De hellingen van de flanken voor een excitatieniveaupatroon. De hellingen zijn op in de tekst beschreven wijze afgeleid uit Tabel 2. Voor iedere kritische band is aangegeven welke $-L_E/dz$ -waarde voor een bepaald waardebereik van L_E in die band geldt. De linker kolom geeft telkens de ondergrens van het waardebereik, de rechterkolom de bijbehorende $-L_E/dz$ -waarde.

2		3		4		5		6		7		8		>8	
108,8	8,6	108,7	5,5	108,7	3,8	108,7	3,3	108,7	3,3	108,7	3,3	108,7	3,3	108,7	3,3
105,1	7,3	105,0	6,1	105,0	4,9	105,0	4,2	105,0	3,7	105,0	3,7	105,0	3,7	105,0	3,5
101,2	7,9	101,1	6,8	101,1	5,7	101,0	5,0	101,0	4,5	101,0	4,0	101,0	4,0	101,0	4,0
97,1	8,1	97,0	7,0	97,0	6,0	97,0	5,3	97,0	4,6	96,9	4,1	96,9	4,1	96,9	4,1
92,4	9,2	92,2	8,3	92,2	7,5	92,1	7,1	92,1	5,8	92,1	4,8	92,1	4,8	92,1	4,8
87,1	9,2	86,9	8,6	86,8	8,2	86,8	7,3	86,8	6,4	86,8	5,4	86,8	5,4	86,8	5,4
81,1	9,7	80,8	8,6	80,7	7,7	80,6	7,1	80,6	6,8	80,6	6,8	80,6	6,8	80,6	6,2
75,1	11,9	74,7	9,1	74,6	8,3	74,5	7,9	74,5	7,5	74,4	7,1	74,4	7,1	74,4	6,2
68,6	9,8	68,0	9,4	67,8	8,9	67,7	8,3	67,6	7,7	67,6	7,0	67,6	7,1	67,6	6,5
61,7	13,5	60,7	11,3	60,4	9,0	60,3	7,4	60,2	7,4	60,2	7,4	60,1	7,4	60,1	7,4
54,4	9,7	52,9	9,6	52,5	9,0	52,3	8,0	52,1	8,1	52,1	8,1	52,0	8,2	52,0	8,2
46,1	9,3	43,7	9,7	43,0	9,7	42,7	9,6	42,4	9,7	42,3	9,8	42,2	9,8	42,1	9,9
38,6	9,9	35,0	9,9	33,8	9,2	33,2	9,4	32,9	9,6	32,6	9,7	32,4	9,8	32,3	9,9
31,1	8,7	26,1	8,9	24,2	9,6	23,3	9,9	22,7	10,2	22,2	10,4	21,9	10,5	21,7	10,6
25,4	6,8	19,6	6,5	17,3	6,9	16,2	7,2	15,3	7,3	14,7	7,5	14,3	7,6	14,1	7,6
21,0	5,9	12,5	9,4	9,0	11,0	7,3	11,8	6,0	12,5	5,0	12,9	4,4	13,2	4,0	13,4

*) Voor de eerste kritische band zijn noch in Tabel 2 noch in Tabel 3 grenswaarden of hellingen opgenomen, omdat er geen lagere kritische band is van waaruit zich excitatie naar de eerste kritische band uit kan spreiden.

Een tweede stap in de omzetting van Tabel 2 is het vervangen van de $-N'/dz$ -waarden door $-L_E/dz$ -waarden. Hierbij moet bedacht worden dat L_E geen lineaire functie van N' is. Dus, als voor een klasse van N' waarden één $-N'/dz$ -waarde aangenomen wordt, en dus N' van de bovengrens tot de ondergrens van de klasse lineair daalt, daalt L_E tussen de corresponderende grenzen niet lineair. De hellingscoëfficiënt voor L_E hangt af van de precieze waarde die L_E tussen de grenzen aanneemt. Voor één waarde van L_E in de niveauklasse met L_{Eb} als boven- en L_{Eo} als ondergrens is de hellingscoëfficiënt vrij eenvoudig te bepalen. Hiervoor kan de volgende formule worden gebruikt:

$$L_E/dz = \frac{(L_{Eb} - L_{Eo}) \cdot N'/dz}{N'_b - N'_o} \quad (23)$$

waarin N'_b en N'_o respectievelijk de boven- en de ondergrens van een specifieke luidheidsklasse uit Tabel 2 zijn, L_{Eb} en L_{Eo} de hiermee corresponderende grenzen voor een bepaalde kritische band uit Tabel 3 en N'/dz de absolute waarde van de in Tabel 2 voor de kritische band gegeven hellingscoëfficiënt. Immers, $N'_b - N'_o / (N'/dz)$ geeft de afstand op de z -dimensie aan waarover L_E daalt van L_{Eb} tot L_{Eo} . Formule (23) geeft dus de helling van de rechte lijn die L_{Eb} en L_{Eo} verbindt. Volgens de middenwaardestelling is ergens in het betreffende gebied op de z -as de hellingscoëfficiënt van L_E gelijk aan de helling van deze rechte lijn. De in Tabel 3 ingevulde waarden voor $-L_E/dz$ zijn op de beschreven wijze met formule (23) berekend.

Uit Tabel 3 blijkt dat voor een bepaalde kritische band de $-L_E/dz$ -waarden niet monotoon veranderen als de achtereenvolgende L_E -klassen worden doorlopen. Om de grilligheid van het verloop van de door Tabel 2 geïmpliceerde $-L_E/dz$ -waarden nauwkeuriger in kaart te brengen kan gebruik gemaakt worden van de vergelijking voor de afgeleide over z van $L_E(N'(z))$:

$$\frac{L_E(N'(z))}{dz} = \frac{L_E(N'(z))}{dz} \cdot \frac{N'(z)}{dz} \quad (24)$$

De vergelijking voor $L_E(N'(z))$ is gegeven in (22), waarbij N' hier als functie van z opgevat is. Uit (22) kan de afgeleide worden bepaald:

$$\frac{L_E(N'(z))}{dz} = \frac{1085,7}{0,25 L_T} \cdot \frac{1}{(4(\frac{N'(z)}{0,025 L_T} + 1)^4 - 1)} \cdot (\frac{N'(z)}{0,025 L_T} + 1)^3$$

(25)

Vervolgens kan (25) in (24) gesubstitueerd worden. Met het resultaat zijn de N'/dz -waarden uit Tabel 2 om te zetten in L_E/dz -waarden. Voor elke waarde van N' is bij een bepaalde kritische band (met een bijbehorende L_T -waarde) de L_E/dz -waarde te bepalen.

Om op deze wijze systematisch te onderzoeken welke L_E/dz -waarden door Tabel 2 geïmpliceerd worden, voert in het huidige kader te ver. Een vergelijking van de geïmpliceerde waarden met empirisch vastgestelde waarden zou evenwel interessant zijn en aanleiding kunnen geven tot bijstelling van het programma voor luidheidbepaling.

2. De specifieke luidheidsformule

In het programma van Paulus en Zwicker wordt voor de specifieke luidheid formule (21) gebruikt. In de aangepaste versie wordt gewerkt met de formule:

$$N'_x(L_E) = 0,068 \cdot 10^{0,023 L_x} \left(\left(\frac{1}{2} + 10^{0,1(L_E - L_x)} \right)^{0,23} - 1 \right) \quad (26)$$

Hierin is $L_x = \max(L_{GR}, L_M)$, waarbij L_{GR} het excitatieniveau van de grondruis in de betreffende band is en L_M het niveau uit de excitatiecurve van de maskeerder voor die band. Voor $L_x = L_{GR}$ is (26) equivalent met formule (11) uit paragraaf 4.1. In het aangepaste programma wordt met (26) in plaats van (21) gewerkt omdat formule (21) bedoeld is voor (hoge) frequenties die in omgevingsgeluid een onderge-

schikte rol spelen. Formule (26) is bedoeld voor frequenties in de buurt van de 1000 Hz.

3. Bepaling van de totale luidheid uit de specifieke luidheden

In het Paulus en Zwickerprogramma wordt de z-schaal in segmenten verdeeld. Voor elk segment wordt de specifieke luidheid uitgedrukt als lineaire functie van z. De totale luidheid wordt bepaald door de specifieke luidheid per segment te integreren en de resultaten hiervan te sommeren.

Een vergelijkbare werkwijze is minder goed hanteerbaar bij de bepaling van de luidheid van gemaskeerd geluid. Uitgangspunten zijn in dit geval het excitatiepatroon van het te karakteriseren geluid en het excitatiepatroon van een maskerend geluid. Deze patronen tezamen geven dus voor iedere z-waarde een excitatieniveau voor de gemaskeerde (L_E) en een excitatieniveau voor de maskeerder (L_M). Door invulling van L_E en $\max(L_M, L_{GR})$ in (26) wordt een tussenwaarde verkregen bij de berekening van de (gemaskeerde) specifieke luidheid. De (gemaskeerde) specifieke luidheid (N'_{mask}) wordt verkregen door vermenigvuldiging van deze tussenwaarde met een in de volgende paragraaf besproken factor. In het aangepaste programma wordt op deze wijze voor 240 gelijkmatig over de z-schaal verdeelde punten N'_{mask} berekend. Per 1/10 Bark wordt dus een N'_{mask} -waarde bepaald. De totale (gemaskeerde) luidheid (N_{mask}) wordt vervolgens bepaald door sommatie van de 240 N'_{mask} -waarden en deling van de som door 10 *).

4. De correctiefactor bij de berekening van de gemaskeerde specifieke luidheid

In de vorige paragraaf is opgemerkt dat bij de berekening van N'_{mask} als tussenstap N'_* wordt bepaald volgens (26). Uit de bespreking in 4.2. blijkt dat een zo verkregen waarde N'_{mask} onderschat. Om N'_{mask} te bepalen moet een correctie op de tussenwaarde worden uitgevoerd, waarvan de grootte afhankelijk is van het excitatieniveau van de maskeerder (L_M) en van het verschil in excitatieniveau tussen gemaskeer-

*) Details blijven hier voor de overzichtelijkheid buiten beschouwing.

de en maskeerder ($L_E - L_M$). Door Zwicker (1963: 207) worden de correctiewaarden bij $L_M = 40$ dB gegeven voor een aantal waarden van $L_E - L_M$. De kleinste kwadraten fit voor deze correctiewaarden als functie van $L_E - L_M$ met een vierde graads polynoom ziet er als volgt uit:

$$\begin{aligned} \text{fact}(40, x) = & 1,555149255 + 0,152813695 x - 0,016507165 x^2 \\ & + 0,000547228 x^3 - 6,087308033 \cdot 10^{-6} x^4 \end{aligned} \quad (27)$$

waarin $x = L_E - L_M$. In het aangepaste programma wordt $\text{fact}(L_M, L_E - L_M)$ als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned} \text{fact}(40, L_E - L_M) \quad L_M \geq 40 \\ \text{fact}(L_M, L_E - L_M) = \quad (28) \\ \frac{L_M - 7}{33} (\text{fact}(40, L_E - L_M) - 1) + 1 \quad L_{GR} < L_M < 40 \end{aligned}$$

Dus voor L_M -waarden tussen L_{GR} en 40 dB wordt $\text{fact}(L_M, L_E - L_M)$ bepaald met behulp van lineaire interpolatie tussen de waarde 1 bij $L_M = 7$ (het niveau van de grondruis bij 1000 Hz) en $\text{fact}(40, L_E - L_M)$ bij $L_M = 40$ dB.

Dus, bij de bepaling van N'_{mask} voor een bepaalde z-waarde wordt uitgegaan van L_E en $\max(L_M, L_{GR})$. Door deze te substitueren in (26) wordt een tussenwaarde N'_* berekend. N'_{mask} resulteert als N'_* met de boven gedefinieerde factor vermenigvuldigd wordt. De gezochte luidheid N_{mask} is 1/10 van de som van 240 zodoende bepaalde N'_{mask} -waarden.

5. Verdere ontwikkeling en een beperking van het programma

In 2.3 zijn reeds enige punten voor nader onderzoek met betrekking tot de gemaskeerde luidheid aangestipt. Uitkomsten van dergelijk onderzoek kunnen leiden tot bijstelling van het programma voor de luidheidbepaling van al dan niet gemaskeerd geluid. Punten die specifiek betrekking hebben op de wijze waarop in het programma de luidheid wordt bepaald en die nader onderzoek verdienen zijn:

- a) De werkwijze waarbij excitatieniveaupatronen afgeleid worden uit gegevens van Paulus en Zwicker (1972) over N' -patronen welke op hun beurt afgeleid moeten zijn uit excitatieniveaupatronen is enigszins omslachtig (zie deze Bijlage, paragraaf 1). Een betere werkwijze - die echter in het kader van de huidige studie niet haalbaar was - zou zijn als direct de in de literatuur gegeven maskeercurven gebruikt zouden worden. Dit zou echter een aparte, zij het beperkte literatuurstudie vereisen. Een streven zou kunnen zijn om de standaard excitatieniveaupatronen voor smalbandruisen te specificeren als functie van de middenfrequentie (omgezet in Bark) en het niveau van de ruisen.
- b) Door het programma worden voor 240 z-waarden de N' of N'_{mask} -waarden berekend (zie deze Bijlage, paragraaf 3). Wellicht zou het verlies aan nauwkeurigheid in de resulterende N of N_{mask} -waarde beperkt zijn als deze berekening voor wat minder z-waarden zou worden uitgevoerd. Dit zou echter nader onderzocht moeten worden.
- c) De specificatie van N'_{mask} als het produkt van een correctiefactor $\text{fact}(L_M, L_E - L_M)$ en een tussenwaarde N'_x (zie deze Bijlage, paragraaf 2 en 4) is conceptueel onbevredigend. Bovendien wordt een randvoorwaarde die ten aanzien van N'_{mask} gesteld kan worden, namelijk dat N'_{mask} (zwak) monotoon daalt als functie van L_M , in bepaalde gevallen geschonden. De invloed van deze schendingen op de berekende luidheid zijn beperkt, wat echter niet wegneemt dat een dergelijke schending onbevredigend is.

Tot slot van deze paragraaf kan nog worden gewezen op een beperking van zowel het originele als de aangepaste versie van het programma voor de luidheidbepaling. De beperking geldt bij toepassing op fluctuerend geluid.

De invoer voor het programma is één tertsband (of kritischeband-) spectrum voor een objectgeluid en eventueel één dergelijk spectrum voor een achtergrondgeluid. Om een beeld te krijgen van het verloop van de luidheid over de tijd kan het programma op opeenvolgende spectra worden toegepast. Zodoende kan ook van een fluctuerend geluid een

vrij volledig beeld verkregen worden aan de hand waarvan in 4.4 beschreven indexen kunnen worden bepaald.

De afzonderlijke luidheidberekeningen door het programma zijn onafhankelijk van elkaar. Dat wil zeggen, alleen het voor een berekening ingevoerde objectgeluidsspectrum en eventueel het achtergrondgeluidsspectrum bepalen de resulterende luidheidswaarde. Voorafgaande spectra van object of achtergrondgeluid zijn niet van invloed op het resultaat. Dit is enigszins in strijd met de realiteit. De op een bepaald moment opgewekte excitatie verdwijnt niet onmiddellijk. De resterende excitatie van geluid op een eerder tijdstip kan de luidheid op een direct volgend tijdstip beïnvloeden. Deze beïnvloeding is niet (eenvoudig) in de programma's voor luidheidberekening te verwerken. De beïnvloeding lijkt voor de meeste (omgevings)geluiden echter zeer beperkt, zeker als de uiteindelijke indexwaarden worden bekeken.



