

INHOUDSTAFEL

1.1.	Definitie van geluid	3
1.2.	Ontstaan van geluid	3
1.3.	Snelheid van geluid	4
1.4.	Golflengte	4
1.5.	Periode en frequentie	4
1.6.	Geluidsdrukkniveau	5
1.7.	Rekenen met geluidsdrukkniveaus	8
1.8.	Het geluidsspectrum	11
1.9.	Het menselijk gehoor	14
1.10.	De gevoeligheid van het menselijk gehoor en het begrip luidheid	16
1.11.	De frequentieweging "A"	18
1.12.	Vermogen en intensiteit van een geluidsbron	19
1.13.	Uitbreiding en attenuatie van geluid	20
1.13.1.	Geometrische uitbreiding	20
1.13.2.	Wind en temperatuur	21
1.13.3.	Absorptie door de lucht	23
1.13.4.	Absorptie door vegetatie	23
1.13.5.	Grondeffecten	23
1.13.6.	Reflectie, absorptie en diffractie	24
1.14.	Beoordelingsgrootheden voor geluid	26
1.14.1.	Het equivalent, A-gewogen geluidsdrukkniveau over een periode T ($L_{Aeq,T}$)	26
1.14.2.	De statistische parameters L_{A99} , L_{A95} , L_{A50} ,...	27
1.15.	Voorspellen van geluidsdrukkniveaus	29
1.16.	Metten van geluidsdrukkniveaus	31
1.17.	Referenties	32

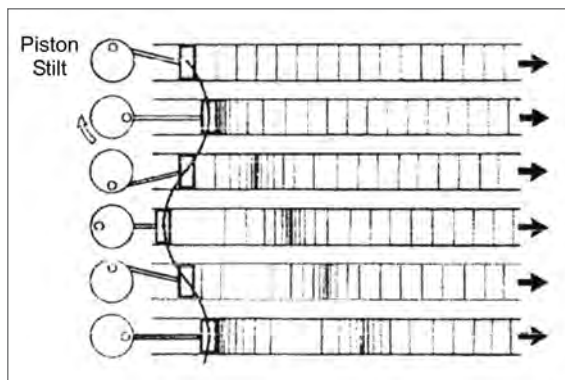


1.1. Definitie van geluid

Geluid kan worden gedefinieerd als het opwekken, de transmissie en de ontvangst van golven in elastische media. Het kan zich dus voortplanten in gassen, vloeistoffen en vaste stoffen. In het kader van deze handleiding is echter enkel het geluid dat zich door lucht voortplant van belang.

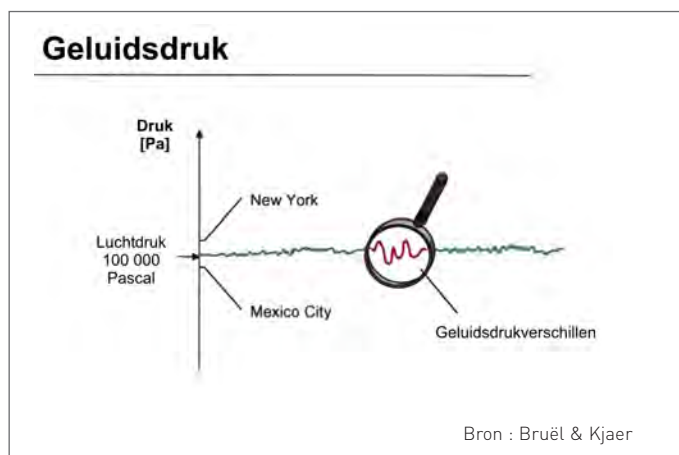
1.2. Ontstaan van geluid

Figuur 1 toont een zuiger die één uiteinde van een met lucht gevulde buis afsluit.



Figuur 1 : Het opwekken van geluid door een bewegende zuiger in een buis

De luchtmoleculen, gesymboliseerd door verticale lijnen, zijn gelijkmatig gespreid zolang de zuiger in rust blijft. Beweegt de zuiger zich naar rechts, dan worden de luchtmoleculen samengedrukt en ontstaat er een plaatselijke luchtdrukverhoging (met een maximale waarde Δp), bovenop de heersende atmosferische luchtdruk. Deze luchtdrukverhoging plant zich voort naar rechts met een snelheid die afhangt van het medium. Intussen beweegt de zuiger zich naar links en zorgt voor een plaatselijke luchtdrukverlaging (met een minimum van $-\Delta p$). Deze verlaging plant zich eveneens voort naar rechts. Wanneer de zuiger regelmatig blijft heen en weer bewegen, verkrijgt men aldus een opeenvolging van drukverhogingen en -verlagingen die zich met een welbepaalde snelheid voortbewegen. Dit is geluid. De op de atmosferische druk gesuperponeerde drukwisselingen worden de geluidsdruk genoemd en kortweg aangeduid met p . De geluidsdruk is dus sterk afhankelijk van de tijd. De hoogte van de top t.o.v. de evenwichtstoestand, Δp , wordt de amplitude van de geluidsgolf genoemd en voortaan aangeduid met A . De geluidsdruk p en natuurlijk ook de amplitude ervan worden uitgedrukt in de S.I.-eenheid pascal (Pa). Bij dagdagelijkse geluiden is A klein (tussen 10^{-5} en 100 Pa) ten opzichte van de atmosferische druk (ca. 10^5 Pa). De geluidsdruk is dan ook maar een "rimpel" op de atmosferische druk (Figuur 2).



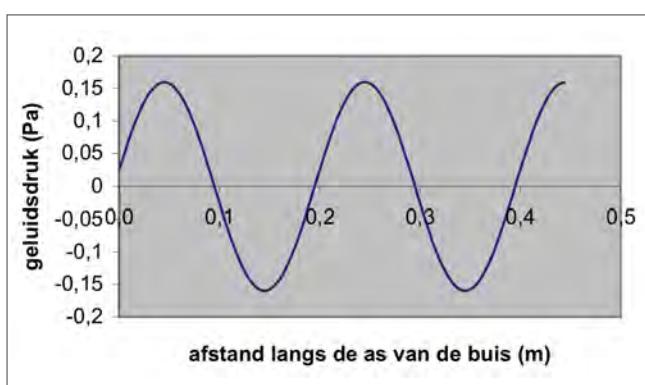
Figuur 2 : De geluidsdruk is slechts een rimpel op de atmosferische druk

1.3. Snelheid van geluid

De **snelheid** waarmee het geluid zich voortplant in lucht is sterk afhankelijk van het medium: zij bedraagt in lucht en bij kamertemperatuur ca. 344 m/s; in water bedraagt de snelheid van geluid ca. 1400 m/s en in graniet zelfs 6000 m/s. De geluidssnelheid in lucht is in lichte mate afhankelijk van de temperatuur en van de relatieve vochtigheid.

1.4. Golflengte

Een momentopname van de luchtdrukverhogingen en -verlagingen veroorzaakt door het zuigersysteem van Figuur 1 in werking toont een sinusoidaal verloop van de luchtdruk langs de as van de buis (Figuur 3). De afstand tussen twee gelijkwaardige punten (bijvoorbeeld tussen twee opeenvolgende toppen) wordt de **golflengte** van de geluidsgolf genoemd. De golflengte wordt aangeduid met het symbool λ en uitgedrukt in meter.



Figuur 3 : Het verloop van de geluidsdruk langs de as van de buis

1.5. Periode en frequentie

Een waarnemer die het geluidsdrukkniveau in een willekeurig punt op de as van de buis zou registreren gedurende een bepaalde tijd, vindt een sinusoidaal verloop van de geluidsdruk in functie van de tijd (Figuur 4). De tijd die verstrijkt tussen twee gelijkwaardige punten is de **periode**, aangeduid met het symbool "T" en uitgedrukt in seconden. De **frequentie** "f" is het aantal cycli dat de waarnemer per seconde waarneemt en is niets anders dan de omgekeerde waarde van de periode:

$$f = 1/T \quad \text{(vergelijking 1)}$$

De eenheid van frequentie is 1/s, ook hertz (Hz) genoemd.

Golflengte, frequentie en geluidssnelheid staan met elkaar in relatie volgens de betrekking:

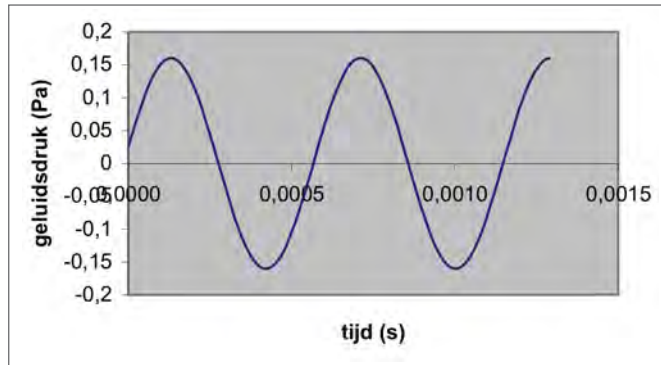
$$\lambda = c/f \quad \text{(vergelijking 2)}$$

De golflengte wordt uitgedrukt in meter (m).

Het menselijk gehoor is in staat om geluiden te horen met een frequentie van 20 tot 20 000 Hz, wat overeenkomt met een golflengte van respectievelijk 17 m en 1,7 cm. Enkele waarden van de frequentie met de corresponderende golflengte worden weergegeven in Tabel 1.

frequentie (Hz)	20	50	100	250	500	1000	2000	4000	5000	10000	20000
golflengte (m)	17	6,9	3,4	1,4	0,69	0,34	0,17	0,086	0,069	0,034	0,017

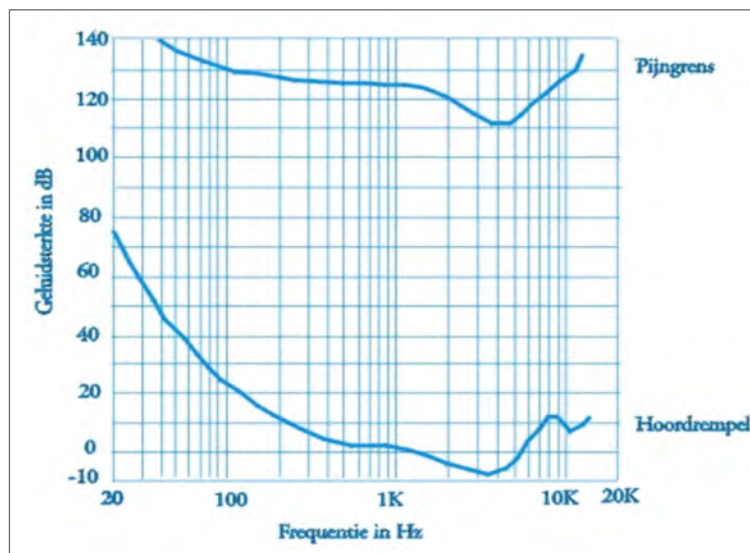
Tabel 1 : Enkele waarden voor de frequentie met bijbehorende golflengte voor geluid



Figuur 4 : Het verloop van de geluidsdruk in functie van de tijd

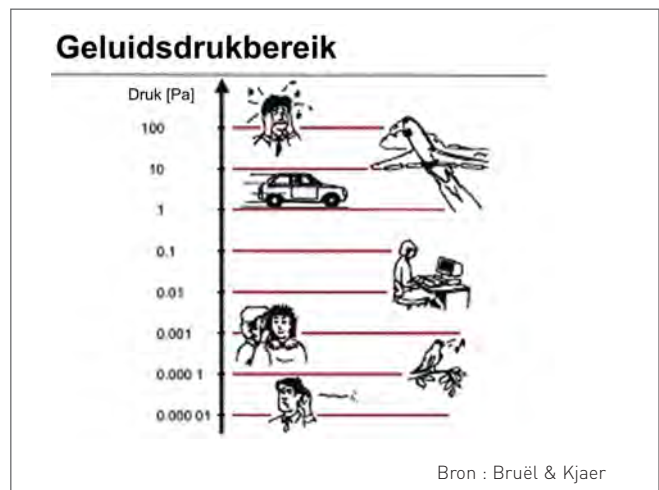
1.6. Geluidsdrumniveau

De geluidsdruk staat in relatie met de subjectieve "sterkte" of "luidheid" waarmee het geluid wordt waargenomen. Hoe groter de geluidsdruk, hoe sterker de subjectieve geluidsdruk. Het (normaal functionerende) menselijk gehoor is in staat om geluiden te horen met een geluidsdruk van $20 \mu\text{Pa}$ tot 100 Pa (bij 1000 Hz). $20 \mu\text{Pa}$ komt bij 1000 Hz overeen met het net hoorbare, de zogenaamde gehoordrempel. Bij 100 Pa veroorzaakt bij de meeste waarnemers pijnsensaties (de zogenaamde pijndrempel) (Figuur 5).



Figuur 5 : De hoor- en pijndrempelcurves voor een persoon met een normaal gehoor. Geluiden waarvan de combinatie frequentie-geluidsdrumniveau in het gebied tussen beide curves vallen zijn hoorbaar zonder pijn te veroorzaken.

Men kan de sterkte van het geluid aanduiden met (de amplitude van) de geluidsdruk; enkele typische waarden worden aangeduid in Figuur 6.



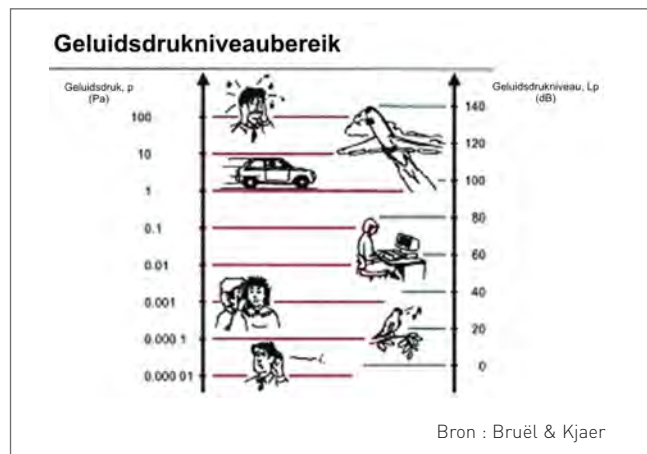
Figuur 6 : Enkele typische waarden voor de geluidsdruk

Bron : Bruël & Kjaer

Door het grote bereik van het hoorbare gebied van de mens (de geluidsdrukken bij de gehoordrempel en de pijndrempel verschillen een factor van meer dan een miljoen) is dit echter weinig praktisch. Bovendien reageert het gehoor niet lineair maar logaritmisch op auditieve prikkels. Daarom wordt geopteerd om de geluidsterkte aan te geven met een getal op een logaritmische schaal, gedefinieerd als:

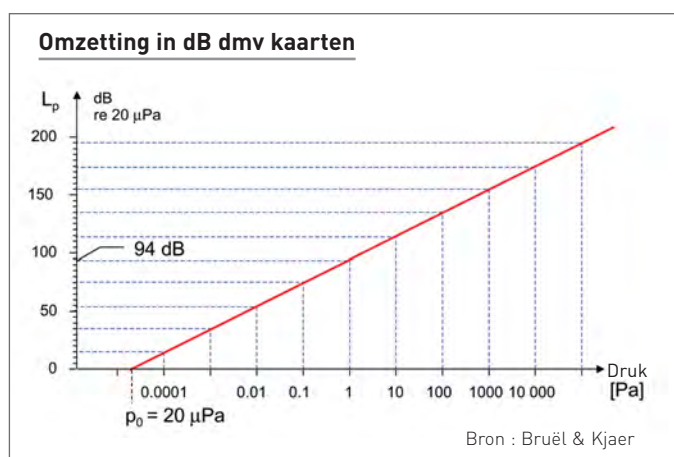
$$L_p = 10 \log (p^2/p_0^2) \quad (\text{vergelijking 3})$$

waarbij L_p het zogenaamde **geluidsdruk niveau** voorstelt, in wezen een dimensieloos getal. Toch wordt het de "eenheid" decibel, afgekort dB, toegekend. De grootte p_0 is een referentiedruk, bij internationale conventie vastgelegd als $20 \mu\text{Pa}$, d.i. dus de gehoordrempel voor de mens bij 1000 Hz. De decibelschaal is een veel handiger instrument om er de geluidsterkte in uit te drukken (Figuur 77): de gehoordrempel komt overeen met 0 dB en de pijndrempel met 130 dB (beide bij 1000 Hz).



Figuur 7 : Geluidsdruk versus geluidsdruk niveau

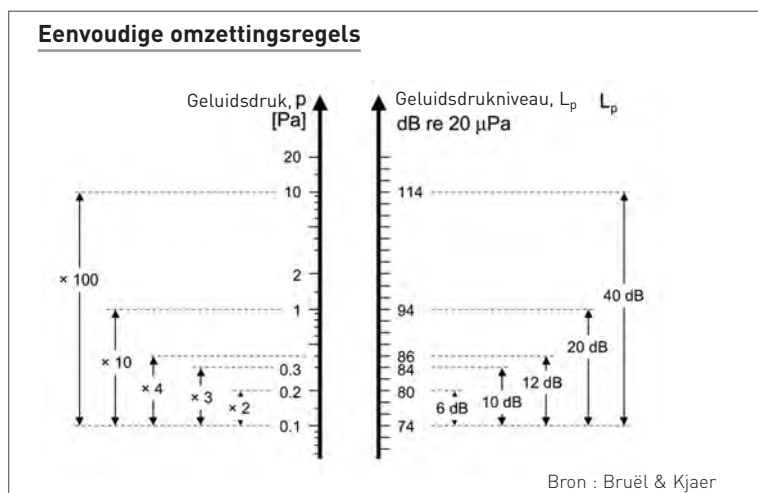
Het omrekenen van geluidsdruk naar geluidsdruk niveau kan met vergelijking 3, met de grafiek in Figuur 8 of met Tabel 2. Enkele vuistregels worden gegeven in Figuur 9.



Figuur 8 : Omrekenen van geluidsdruk naar geluidsdruk niveau en vice versa met de grafische methode

verhouding geluidsdrukken	verschil geluidsdrukniveau (dB)	verhouding geluidsdrukken	verschil geluidsdrukniveau (dB)
1,000	0,000	1,000	0,000
0,989	-0,100	1,012	0,100
0,977	-0,200	1,023	0,200
0,966	-0,300	1,035	0,300
0,955	-0,400	1,047	0,400
0,944	-0,500	1,059	0,500
0,933	-0,600	1,072	0,600
0,923	-0,700	1,084	0,700
0,912	-0,800	1,096	0,800
0,902	-0,900	1,109	0,900
0,891	-1,000	1,122	1,000
0,841	-1,500	1,189	1,500
0,794	-2,000	1,259	2,000
0,708	-3,000	1,413	3,000
0,631	-4,000	1,585	4,000
0,562	-5,000	1,778	5,000
0,501	-6,000	1,995	6,000
0,447	-7,000	2,239	7,000
0,398	-7,000	2,512	7,000
0,355	-9,000	2,818	9,000
0,316	-10,000	3,162	10,000
0,251	-12,000	3,981	12,000
0,200	-14,000	5,012	14,000
1,158	-16,000	6,310	16,000
0,126	-18,000	7,943	18,000
0,100	-20,000	10,000	20,000
0,0316	-30,000	31,620	30,000
0,0100	-40,000	100,000	40,000
0,0032	-50,000	316,200	50,000
10^{-3}	-60,000	103	60,000
10^{-4}	-80,000	104	80,000
10^{-5}	-100,000	105	100,000

Tabel 2 : Omrekenen van geluidsdruk naar geluidsdrukniveau en vice versa met getabuleerde numerieke waarden



Figuur 9 : Enkele vuistregels voor de omzetting van geluidsdruk naar geluidsdrukniveau

Het geluidsdrukniveau p is zoals gesteld functie van de tijd en wisselt zeer snel van teken (bij een zuivere toon van 1000 Hz dus 1000 keer per seconde). Dit is problematisch indien men de eerder gedefinieerde, tijdsafhankelijke geluidsdruk zou gebruiken in vergelijking 3. Om tot een praktisch bruikbare, van een sonometer afleesbare waarde te komen, gebruikt men in de praktijk niet $p(t)$ maar een kwadratisch gemiddelde waarde, geïntegreerd over een korte periode met duur τ :

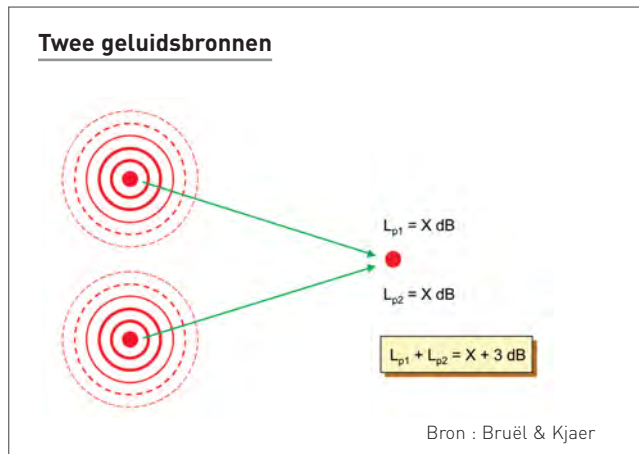
$$p_{rms} = ((1/\tau) \int p^2(t)dt)^{1/2} \quad (\text{vergelijking 4})$$

Het is deze p_{rms} (root-mean-square) die men gebruikt¹ voor de berekening van L_p in vergelijking 3.

De tijdsconstante τ bepaalt hoe getrouw de geïntegreerde waarde van L_p de reële waarde benadert. De integratie in vergelijking 4 noemt men het toepassen van een tijdsweging. Voor de meeste toepassingen kiest men tegenwoordig $\tau = 0,125$ s (zie verder). In dit geval spreekt men van de "snelle" tijdsweging, ook aangeduid met "F" (fast). Vroeger werd, vooral om technische redenen, gebruik gemaakt van de "trage" tijdsweging ($\tau = 1$ s)[aangeduid met "S", slow].

1.7. Rekenen met geluidsdrukniveaus

Het invoeren van een logaritmische schaal heeft bijzondere consequenties bij het rekenen met geluidsdrukniveaus. In een waarnemingspunt op een bepaalde afstand van een geluidsbron (bijvoorbeeld een vrachtwagen met draaiende motor) wordt een geluidsdrukniveau L_{p1} opgetekend (Figuur 10).

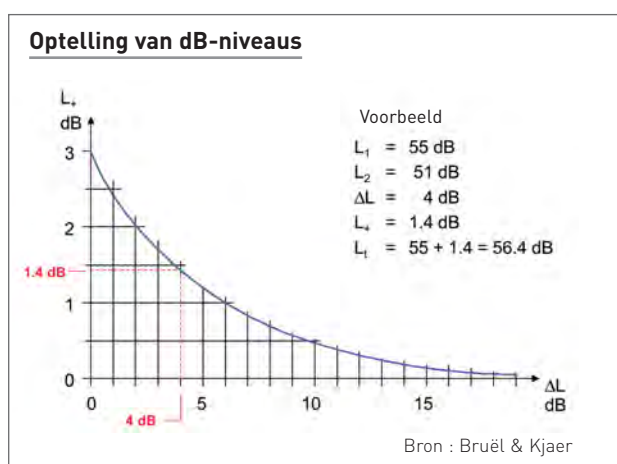


Figuur 10 : Een tweede identieke geluidbron zorgt voor een stijging van het geluidsdrukniveau bij de waarnemer

Welk geluidsdrukniveau wordt er waargenomen wanneer men een tweede geluidsbron in de buurt van het waarnemingspunt plaatst die een geluidsdrukniveau L_{p2} veroorzaakt wanneer de eerste bron niet in werking is? De geluidsdrukniveaus mogen niet eenvoudigweg opgeteld worden; maar wel de **geluidsenergieën** van beide bronnen. De geluidsenergie is evenredig met het kwadraat van de geluidsdruk. Algemeen geldt dus:

$$L_{p1+2} = 10 \log(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10}) \quad (\text{vergelijking 5})$$

Men kan de berekening ook doorvoeren aan de hand van de grafiek in Figuur 11.



Figuur 11 : Optelling van geluidsdrukniveaus met de grafische methode. Het resultaat van de optelling bekomt men door het lineair verschil te nemen van beide op te tellen niveaus, de corresponderende ordinaatwaarde te nemen en dit op te tellen bij het hoogste van de twee op te tellen niveaus

¹ Men kan als alternatief ook een L_p -waarde berekenen met de amplitude A . Dit wordt in de praktijk echter weinig gebruikt. De meeste moderne sonometers bieden de gebruikers de keuze tussen "peak"-mode (op basis van amplitude) en "rms"-mode (op basis van p_{rms})

Men neemt het rekenkundig verschil van beide op te tellen geluidsdrukniveaus ΔL en men gaat na welke absciswaarde L_+ hiermee correspondeert. De som van beide geluidsdrukniveaus is gelijk aan het hoogste van de twee, vermeerderd met L_+ .

Bij twee identieke bronnen op dezelfde afstand van het waarnemingspunt die er elk afzonderlijk een geluidsdrukniveau van X dB veroorzaken wordt dit:

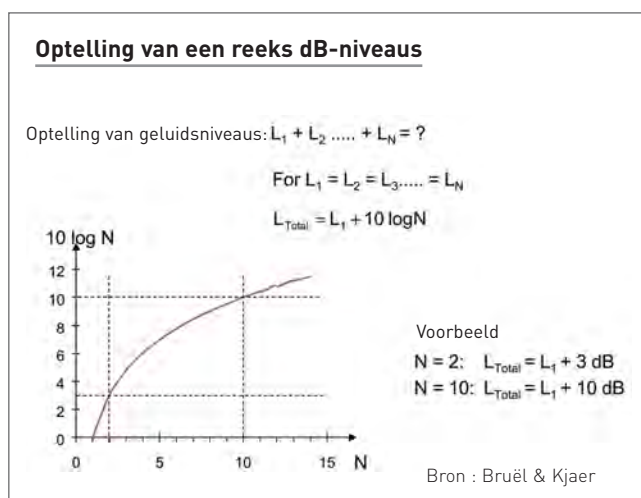
$$L_{p1+2} = 10 \log(2 \cdot 10^{X/10}) = X + 10 \log 2 \approx X + 3 \text{ dB} \quad (\text{vergelijking 6})$$

Bij N identieke bronnen op dezelfde afstand van een waarnemingspunt die op deze plaats bij afzonderlijke werking een geluidsdrukniveau van X dB produceren, kan deze formule worden veralgemeend als volgt (zie ook Figuur 12):

$$L_{p1+2+\dots+N} = X + 10 \log N \quad (\text{vergelijking 7})$$

Bij N niet gecorreleerde bronnen met verschillende geluidsdrukniveaus in het waarnemingspunt geldt algemeen:

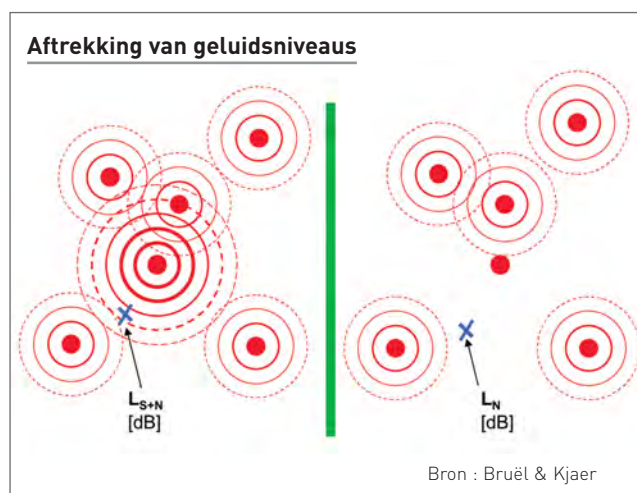
$$L_{p1+2+\dots+N} = 10 \log(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10} + \dots + 10^{L_{pN}/10}) \quad (\text{vergelijking 8})$$



Figuur 12 : Optelling van meerdere identieke geluidsdrukniveaus

Uitgaande van deze formules kan men gemakkelijk nagaan dat indien de verkeersintensiteit op een bepaalde verkeersader verdubbelt, het geluidsdrukniveau van het verkeerslawaai met 3 dB toeneemt. Bij een vertienvoudiging van het verkeer, neemt de geluidsbelasting met 10 dB toe.

In een aantal gevallen wenst men het geluidsdrukniveau van een bron te kennen in een bepaald punt (LS), waarbij het echter onmogelijk is om met een meting enkel het gewenste brongeluid te meten (zie Figuur 13).

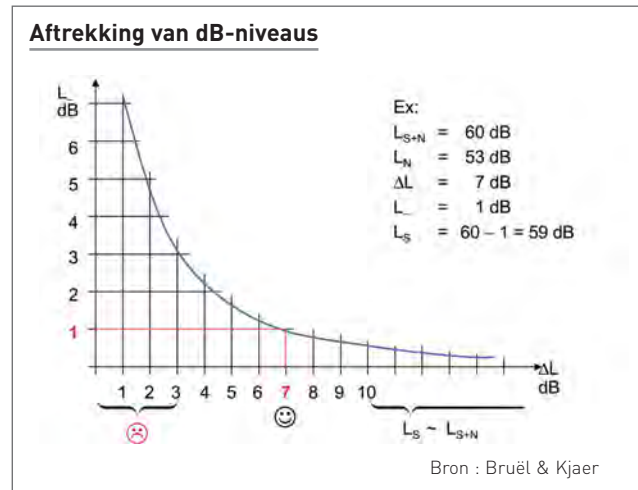


Figuur 13 : Aftrekken van geluidsdrukniveaus. Men meet in een waarnemingspunt het geluidsdrukniveau van de bron (S) en de achtergrond (situatie links). Vervolgens meet men het geluidsdrukniveau van de achtergrond B met de bron S uitgeschakeld.

Het meetresultaat bevat ook nog bijdragen van één of meerdere andere bronnen ($L_{\text{gemeten}} = L_{S+N}$). Stel dat men wel in staat is een meting in het bewuste punt uit te voeren met de gewenste bron uitgeschakeld; men bekomt aldus het geluidsdrumniveau van de andere bronnen L_N . Om het brongeluidsdrumniveau L_S te kennen dient men van L_{S+N} het achtergrondgeluidsdrumniveau L_N af te trekken. Men kan dit doen met de formule:

$$L_S = 10 \log (10^{L_{S+N}/10} - 10^{L_N/10}) \quad (\text{vergelijking 9})$$

Men kan ook gebruik maken van de grafische methode (Figuur 14).



Figuur 14 : Aftrekken van geluidsdrumniveaus met de grafische methode. Het resultaat van de aftrekking wordt bekomen door het lineair verschil te maken tussen de beide geluidsdrumniveaus, de overeenkomstige ordinaatwaarde te nemen en dit bedrag af te trekken van het hoogste van de twee geluidsdrumniveaus. Wanneer het lineair verschil minder dan 3 dB bedraagt, is het resultaat van de logaritmische aftrekking echter onbetrouwbaar

Men bepaalt de ordinaatwaarde L_- die overeenkomt met het rekenkundig verschil ΔL tussen de twee van elkaar af te trekken geluidsdrumniveaus en men vermindert het grootste van de twee geluidsdrumniveaus met het bedrag L_- . Indien ΔL kleiner is dan 3 dB is het resultaat van de aftrekking onnauwkeurig.

Merk nog op dat wanneer de geluidsdrumniveaus L_{p1} en L_{p2} meer dan 10 dB verschillen, men op enkele tienden van een dB na kan stellen:

$$L_{p1+2} \approx L_{p1} \quad (\text{vergelijking 10})$$

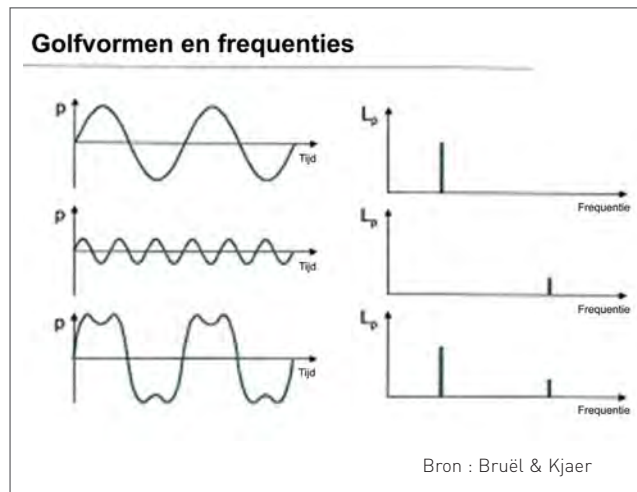
en

$$L_{p1-2} \approx L_{p1} \quad (\text{vergelijking 11})$$

Wanneer het geluidsdrumniveau van de te meten bron meer dan 7 dB hoger is dan geluidsdrumniveau van het achtergrondgeluid, is de invloed van dit laatste op het meetresultaat niet groter dan 1 dB, wat dus nauwelijks waarneembaar (en dus niet significant) is. Bij een verschil van 10 dB is de invloed slechts enkele tienden van een dB.

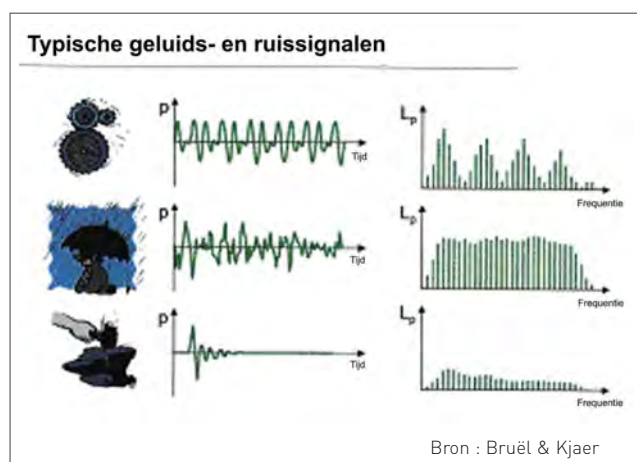
1.8. Het geluidsspectrum

De zuiger die aan de afbeelding 1 wordt vertegenwoordigd brengt een geluid voort waarbij het geluidsdrukniveau sinusoidaal varieert met de tijd. Het geluid kan worden getypeerd door één frequentie. Dit noemt men een zuivere toon. In een diagram waarbij men het geluidsdrukniveau van een geluid aangeeft in functie van de frequentie (dit noemt men het spectrum van het geluid) heeft een zuivere toon een zeer eenvoudige voorstelling: één lijn met een ordinaatwaarde L_p bij de frequentie van de zuivere toon. Al de andere ordinaatwaarden zijn nul. Wanneer men twee zuivere tonen aanbiedt in een waarnemingspunt worden de geluidsdrukken gesuperponeerd en krijgt men een tijdsafhankelijkheid zoals eveneens aangegeven in Figuur 15.



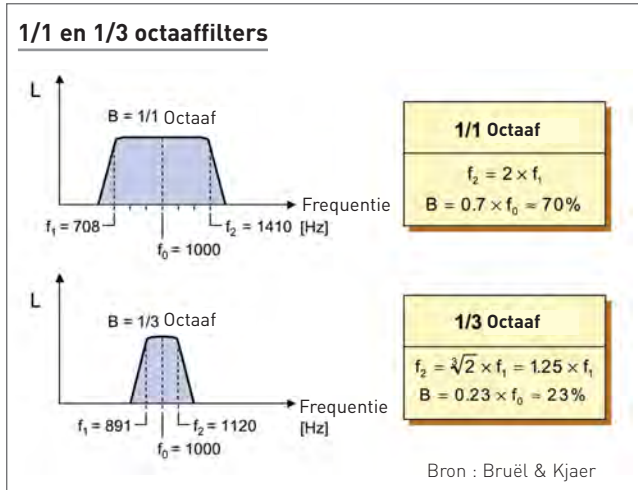
Figuur 15 : Bovenste diagrammen: de voorstelling van twee zuivere tonen in het tijdsdomein (geluidsdruk in functie van de tijd) en het bijbehorend spectrum afzonderlijk. Onder: de resulterende klank wanneer beide tonen tegelijkertijd worden aangeboden.

Het diagram dat het geluidsdrukniveau toont in functie van de frequentie vertoont nu twee lijnen. Een geluid met enkele zuivere tonen noemt men een klank. Veel dagdagelijkse geluiden (het geruis van de regen of de zee, het geritsel van bladeren, ...) zijn geen zuivere tonen of klanken. Deze geluiden kunnen echter steeds op een unieke manier worden gereconstrueerd door zeer veel (of oneindig veel) zuivere tonen met verschillende frequenties te superponeren (theorem van Fourier). Men krijgt continue spectra waarvan een paar voorbeelden worden gegeven in Figuur 16.



Figuur 16 : Enkele voorbeelden van geluiden die geen zuivere tonen zijn en zijn samengesteld uit een groot aantal componenten met verschillende frequenties

Men is voor tal van toepassingen geïnteresseerd in welke mate de verschillende frequenties bijdragen tot een bepaald geluid. Deze informatie kan men onmiddellijk aflezen uit het spectrum van dit geluid. In de praktijk verdeelt men het spectrum in banden met een bepaalde breedte. Ofwel is deze breedte constant, ofwel is deze breedte (B) een constante fractie van de centrale frequentie (f_0) van de band. Tot dit laatste type behoren de in deze context meest relevante 1/1-octafband- en 1/3-octafbandspectra, kortweg aangeduid met respectievelijk octaaf- en tertsbanden. Een band wordt gekarakteriseerd door zijn centrale frequentie f_0 , zijn ondergrens f_1 en zijn bovengrens f_2 . De geluidsdrukken van alle zuivere tonen waarvan de frequentie groter is dan f_1 en kleiner dan f_2 worden energetisch opgeteld waardoor men voor de band één geluidsdrumniveau verkrijgt. Men realiseert dit in de praktijk door het gebruik van filters zoals getoond in Figuur 17.



Figuur 17 : De octaaf- en tertsbandsfilter

Volgens de IEC 1260 norm kan men de middenfrequentie, onder- en bovengrenzen van de tertsbanden berekenen uitgaande van een grondtal $G = 10^{3/10}$ en ten opzichte van een referentiefrequentie f_r , bijvoorbeeld 1000 Hz:

$$f_0 = 10^{x/10} \cdot f_r \quad (\text{vergelijking 12})$$

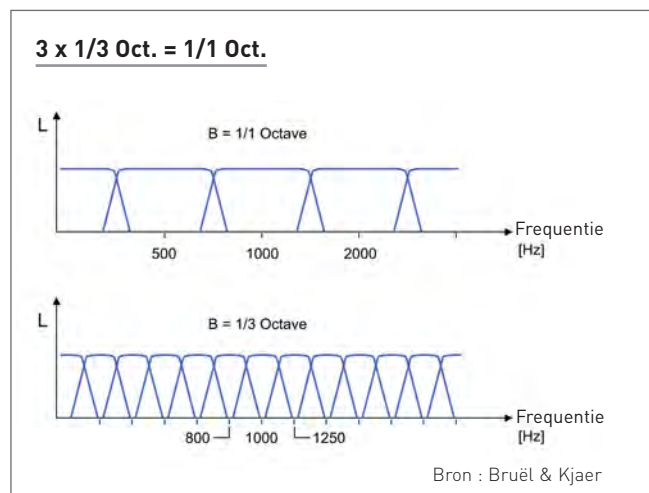
$$f_1 = G^{-1/6} \cdot f_0$$

$$f_2 = G^{1/6} \cdot f_0$$

$$B = f_2 - f_1$$

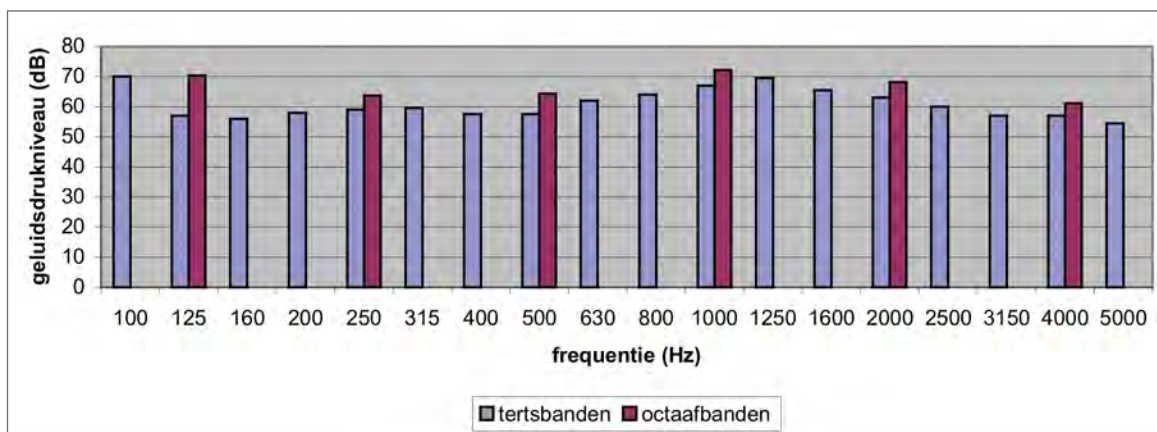
waarbij x een gehele index is ten opzichte van de tertsband met als middenfrequentie de referentiefrequentie f_r .

Octaafbanden omvatten telkens drie tertsbanden en hebben dezelfde middenfrequentie als de middenfrequentie van hun centrale tertsband. Hun bovengrens en ondergrens zijn uiteraard gelijk aan respectievelijk de boven- en ondergrens van de bovenste en onderste samenstellende tertsband. Bij octaafbanden is de middenfrequentie f_0 (nagenoeg) gelijk aan het dubbel van de middenfrequentie van de linksaangrenzende band en uiteraard de helft van deze van de rechtsaangrenzende band. De banden grenzen ook aan elkaar zodat het hele spectrum "bedekt" wordt (Figuur 18).



Figuur 18 : De octaaf- en tertsbandsfilter sluiten aan zodat het volledige spectrum wordt bedekt

Figuur 19 toont de voorstelling van het geluid van een voorbijrijdende auto als octaaf- en tertsbandspectrum.



Figuur 19 : Het geluid van een voorbijrijdende auto, voorgesteld als octaaf- en tertsbandspectrum. Het geluidsdrukkniveau van een octaafband is de logaritmische som van de geluidsdrukken van de tertsbands met dezelfde middenfrequentie als de bewuste octaafband en van de links en rechts aanliggende tertsbands.

De nominale² en "exacte" middenfrequenties, onder- en bovengrenzen van de tertsbands in het hoorbare gebied worden gegeven in Tabel 3. Tevens wordt aangeduid welke middenfrequenties van tertsbands ook middenfrequenties van octaafbanden zijn.

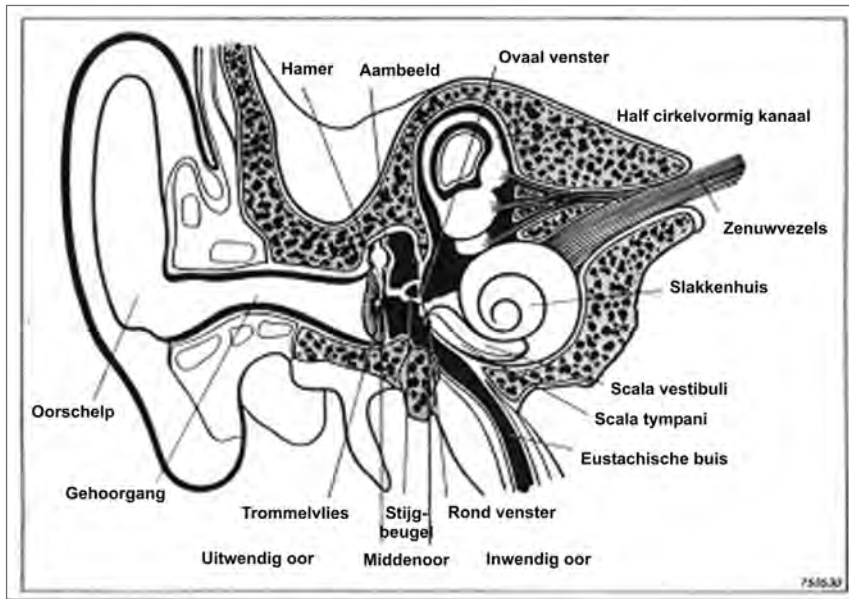
index	nominale middenfrequentie	octaafband	"exacte" middenfrequentie	ondergrens tertsbands	bovengrens tertsbands
-16	25		25,119	22,387	28,184
-15	31,5	*	31,623	28,184	35,481
-14	40		39,811	35,481	44,668
-13	50		50,119	44,668	56,234
-12	63	*	63,096	56,234	70,795
-11	80		79,433	70,795	89,125
-10	100		100,00	89,13	112,20
-9	125	*	125,89	112,20	141,25
-8	160		158,49	141,25	177,83
-7	200		199,53	177,83	223,87
-6	250	*	251,19	223,87	281,84
-5	315		316,23	281,84	354,81
-4	400		398,11	354,81	446,68
-3	500	*	501,19	446,68	562,34
-2	630		630,96	562,34	707,95
-1	800		794,33	707,95	891,25
0	1000	*	1000,0	891,3	1122,0
1	1250		1258,9	1122,0	1412,5
2	1600		1584,9	1412,5	1778,3
3	2000	*	1995,3	1778,3	2238,7
4	2500		2511,9	2238,7	2818,4
5	3150		3162,3	2818,4	3548,1
6	4000	*	3981,1	3548,1	4466,8
7	5000		5011,9	4466,8	5623,4
8	6300		6309,6	5623,4	7079,5
9	8000	*	7943,3	7079,5	8912,5
10	10000		10000	8913	11220
11	12500		12589	11220	14125
12	16000	*	15849	14125	17783
13	20000		19953	17783	22387

Tabel 3 : De middenfrequenties f_0 , de onder- en bovenfrequenties f_1 en f_2 van de octaaf- en tertsbands van het hoorbare gebied

² om de tertsbands en octaafbanden aan te duiden worden de volgens de IEC 1260-norm afgeronde waarden middenfrequentie gebruikt

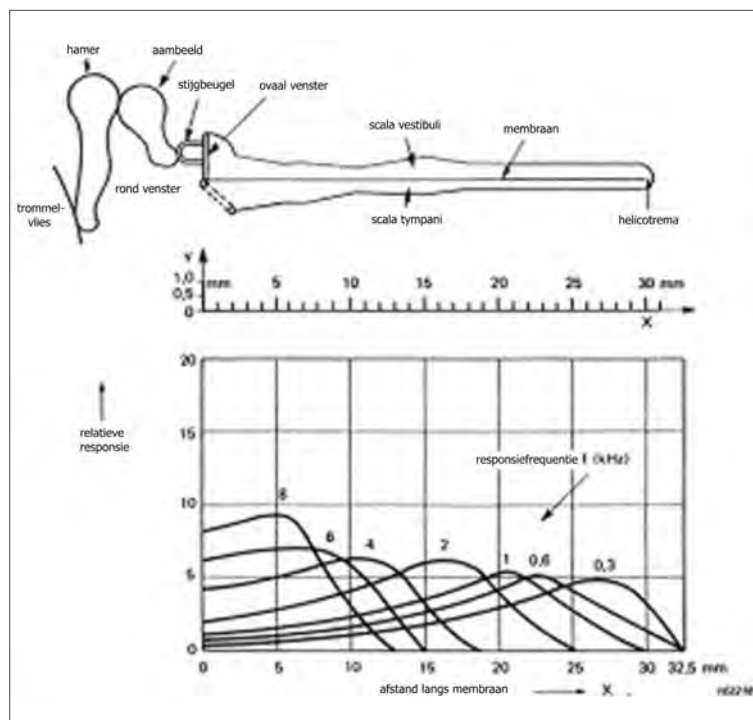
1.9. Het menselijk gehoor

Het auditief systeem bij de mens bestaat uit drie delen (Figuur 20): het buitenoor, het middenoor en het binnenoor.



Figuur 20 : Het auditief systeem van de mens

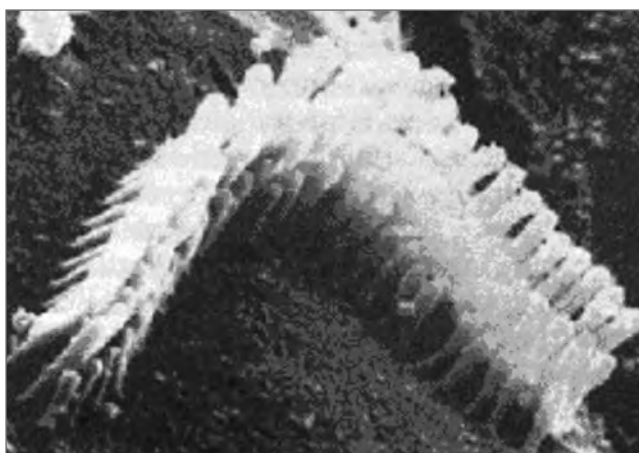
Het buitenoor (met de oorschelp en de gehoorgang) wordt van het luchtgevulde middenoor gescheiden door het trommelvlies. Het binnenoor is vloeistofgevuuld en wordt door zijn typische vorm ook slakkenhuis³ genoemd. Geluidsgolven dringen de gehoorgang binnen en brengen het trommelvlies aan het trillen. Deze beweging wordt via de gehoorbeentjes in het middenoor (hamer, aambeeld en stijgbeugel) doorgegeven aan het "ovale venster" dat de "ingang" is van het slakkenhuis. De gehoorbeentjes spelen een hefboomfunctie: de (relatief) grote beweging van het trommelvlies wordt omgezet in een beweging met een kleinere amplitude maar met meer kracht aan het ovale venster. Het slakkenhuis (Figuur 21) is een opgerold kanaal (3,5 windingen, ca. 30 mm lang) dat bijna over de gehele lengte verdeeld is in twee helften door een vlies, het basilair membraan.



Figuur 21 : Het slakkenhuis (afgerold). Door golfbewegingen van het basilair membraan, die afhankelijk van de frequentie een maximale amplitude bereiken op een andere plaats, is de mens in staat verschillende frequenties te onderscheiden.

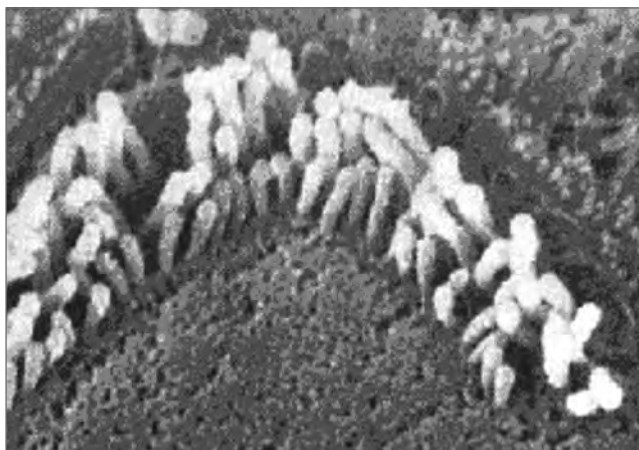
³ Latijn: Cochlea

Over de gehele lengte is dit membraan voorzien van zogenaamde haarcellen⁴ (in totaal ca. 10 000) die verbonden zijn met de gehoorzenuw die van hieruit naar het auditief deel van de hersenen loopt. De beweging die aan het ovale venster wordt doorgegeven door de stijgbeugel brengt de vloeistofkolom in het binnenoor in beweging en hiermee ook het basilair membraan dat als het ware gaat meegolven. Het fenomeen kan worden vergeleken met de rollende golven van de zee aan het strand. De plaats waar de golfbeweging van het basilair membraan een maximale amplitude bereikt, hangt af van de frequentie van het binnenkomend auditief signaal: hoogfrequent geluid doet het basilair membraan vooral bewegen dicht bij het ovale venster en laagfrequent geluid aan het andere uiteinde. Door het feit dat andere haarcellen worden gestimuleerd bij verschillende frequenties is de mens in staat deze te onderscheiden. De haartjes en haarcellen zijn niet gelijkmatig ingeplant, maar in rijen en in V-vormige groepjes (Figuur 22).



Figuur 22 : Groepje haarcellen dat bestaat uit drie rijen haarcellen

Door heftige en langdurige beweging van het basilair membraan (dus bij blootstelling aan geluiden met hoog geluidsdrumniveau) kunnen de haarcellen onomkeerbaar beschadigd raken (Figuur 23), wat aanleiding kan geven tot lawaaislechthorendheid of -doofheid (zie fiche 2).



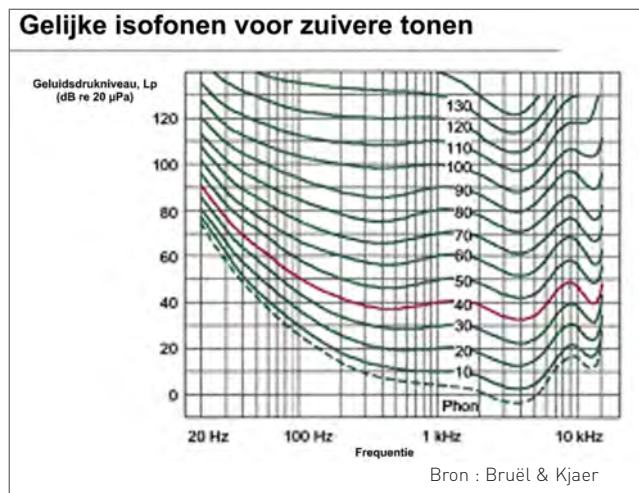
Figuur 23 : Groepje haarcellen beschadigd door overdreven lawaai-blootstelling

De variatie van het geluidsdrumniveau moet minimum 0,125 s duren om als dusdanig te worden waargenomen door het menselijk gehoor. Vandaar dat dit tijdsinterval werd gekozen als tijdsconstante bij de snelle tijdsweging.

⁴ men spreekt van "haarcellen" omdat ze voorzien zijn van een minuscule haartje

1.10. De gevoeligheid van het menselijk gehoor en het begrip luidheid

Het normale menselijke gehoor is in staat geluiden waar te nemen met frequenties van 20 Hz tot 20 000 Hz, maar het gehoor heeft zeker geen constante gevoeligheid over dit frequentiebereik. Dit betekent dat bij bepaalde frequenties er een veel groter geluidsdrukkniveau vereist is om eenzelfde luidheidssensatie op te wekken dan bij andere frequenties. Figuur 24 toont de curven van gelijke luidheid in functie van de frequentie. Deze curven worden isofonen genoemd.



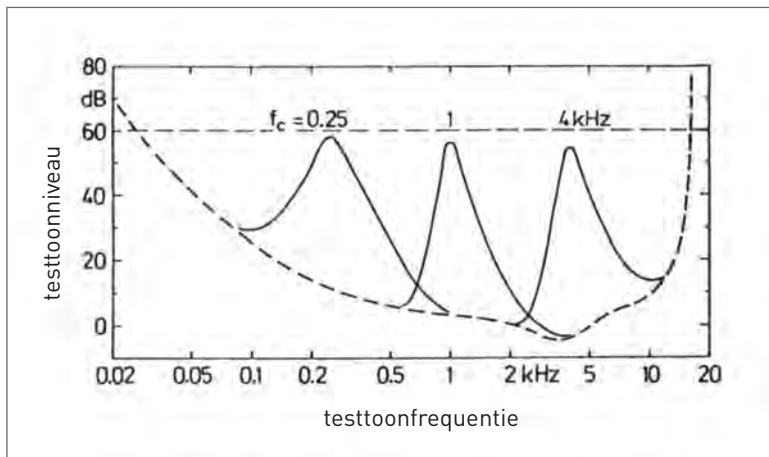
Figuur 24 : De curven van gelijke (subjectieve) luidheid of isofonen

Men kan bijvoorbeeld zien dat een toon van 1000 Hz met een geluidsdrukkniveau van 40 dB even luid klinkt als een zuivere toon met frequentie 20 Hz met een geluidsdrukkniveau van 88 dB en even luid als een toon met frequentie 3500 Hz en 34 dB. De **luidheid** van een geluid, uitgedrukt in foon, wordt gedefinieerd als het geluidsdrukkniveau van een zuivere toon bij 1000 Hz die even luid klinkt als de gegeven toon. De luidheden van de pure tonen in het hierboven vermelde voorbeeld bedragen dus allemaal 40 foon. Voor zuivere tonen kan de luidheid in foon onmiddellijk afgelezen worden van Figuur 24. De luidheid van een geluid dat geen zuivere toon is kan worden berekend aan de hand van zijn spectrum (octaaf-, tertsbandspectrum of ander) aan de hand van de methode van Stevensⁱⁱ of aan de hand van de methode van Zwickerⁱⁱⁱ. Ook de eerder vermelde gehoordrempel (cfr. isofoon van 0 foon) en pijndrempel (cfr. isofoon van 130 foon) zijn dus sterk afhankelijk van de frequentie.

De verhoging van het geluidsdrukkniveau van een gegeven geluid wordt niet volgens een lineaire wetmatigheid door het gehoor waargenomen. Een verhoging van het geluidsdrukkniveau met minder dan 1 dB is nauwelijks waarneembaar, maar een verhoging van 5 dB is wel heel duidelijk. Wanneer men een proefpersoon achtereenvolgens twee tonen (met dezelfde frequentie) aanbiedt waarvan de tweede een geluidsdrukkniveau heeft dat 10 dB hoger ligt dan de eerste, dan zal de proefpersoon de tweede toon als grosso modo twee maal zo luid ervaren als de eerste. Een toename van 20 dB wordt ervaren als ongeveer vier maal luider⁵.

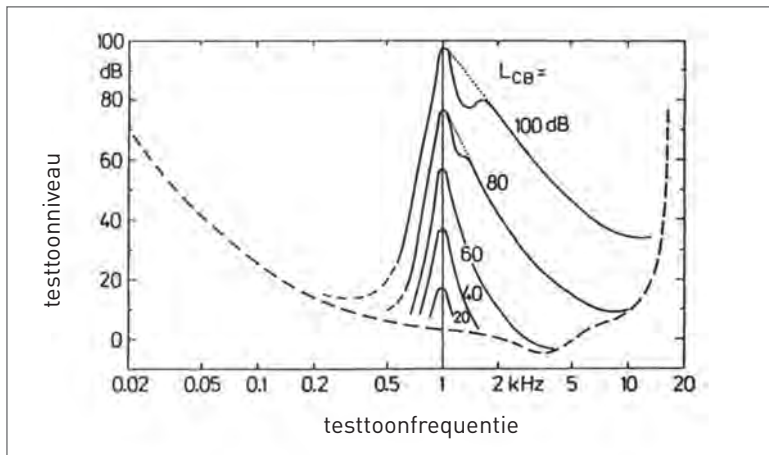
Ingewikkelde fenomenen doen zich voor wanneer het menselijk gehoor wordt blootgesteld aan verschillende geluiden tegelijkertijd. Wanneer twee zuivere tonen met hetzelfde geluidsdrukkniveau worden aangeboden, kunnen die van elkaar worden onderscheiden wanneer zij niet binnen dezelfde kritische band vallen. Deze kritische banden komen ruwweg overeen met de tertsbanden. In bepaalde gevallen, wanneer het geluidsdrukkniveau van de tonen verschillend is, is slechts één toon hoorbaar en wordt de tweede toon **gemaskeerd** door de andere. Figuur 25^{iv} toont een aantal **maskeringskrommen** die horen bij de referentietonen bij 250 Hz, 1000 Hz en 4000 Hz met geluidsdrukkniveau 60 dB. Biedt men aan een proefpersoon een zuivere toon aan van 4000 Hz en 60 dB en tegelijkertijd ook een zuivere toon van 5000 Hz en 40 dB, dan zal deze laatste toon door de proefpersoon (net) niet worden waargenomen: hij wordt gemaskeerd door de luider toon.

⁵ Dit zijn benaderende waarden, want ook afhankelijk van de frequentie van het geluid



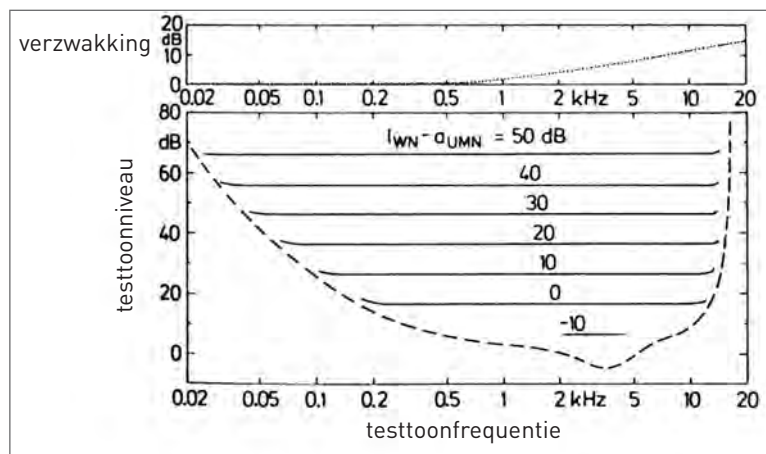
Figuur 25 : Maskeringskrommen voor referentietonen met frequentie 250 Hz, 1000 Hz en 4000 Hz en 60 dB. Zuivere tonen waarvan het geluidsdrumniveau onder één van de curven ligt is niet hoorbaar wanneer tegelijkertijd de referentietoon wordt aangeboden

Figuur 26 toont de maskeringskrommen voor een referentietoon met frequentie 1000 Hz en met verschillende geluidsdrumniveaus. Op te merken valt dat de maskeringskrommen in Figuren 25 en 26 duidelijk asymmetrisch zijn: aan de zijde van de lagere frequenties is de helling veel steiler dan aan de zijde van de hogere frequenties. Dit betekent dat **geluiden met een lage frequentie veel gemakkelijker geluiden met hoge frequenties maskeren dan omgekeerd**. Maskering treedt uiteraard ook op bij niet-zuivere tonen.



Figuur 26 : Maskeringskrommen voor referentietonen met frequentie 1000 Hz en verschillende geluidsdrumniveaus. Zuivere tonen waarvan het geluidsdrumniveau onder één van de curven ligt is niet hoorbaar wanneer tegelijkertijd de referentietoon wordt aangeboden

Figuur 27 toont het maskeren van zuivere tonen door **witte ruis**⁶ van 0 tot 20000 Hz. Uit de figuur kan worden afgelezen dat een zuivere toon met een frequentie van 2000 Hz en 60 dB net wordt gemaskeerd door witte ruis met een geluidsdrumniveau van 83 dB. Hieruit moet worden besloten dat geluiden die nauwelijks voor een verhoging van het geluidsdrumniveau van het omgevingsgeluid zorgen, toch noch hoorbaar kunnen zijn. Om een bepaalde zuivere toon met een breedbandig geluid te maskeren, is een spectrum met een hoog geluidsdrumniveau nodig. Er kan worden aangetoond dat het maskeren van een breedbandig geluid door een ander breedbandig geluid gemakkelijker gaat. De herkenbaarheid van zuivere tonen is dan ook groter. Geluid van wegverkeer is typisch breedbandig.

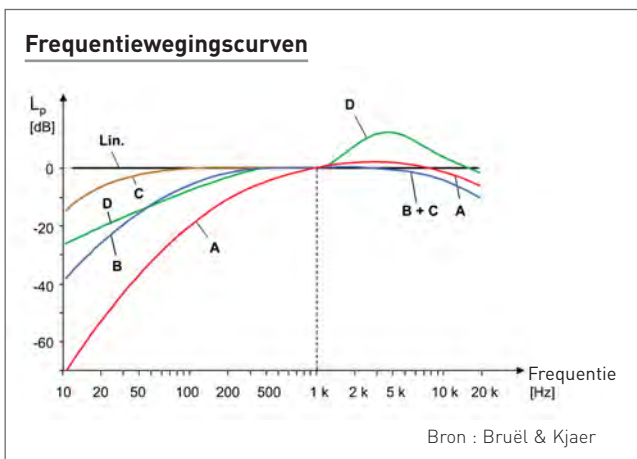


Figuur 27 : Het maskeren van zuivere tonen door witte ruis

⁶ Witte ruis is een geluid dat per spectrale band (met constante breedte) eenzelfde geluidsdrumniveau heeft. In een octaafbandspectrum stijgt het geluidsdrumniveau met 3 dB/octaafband.

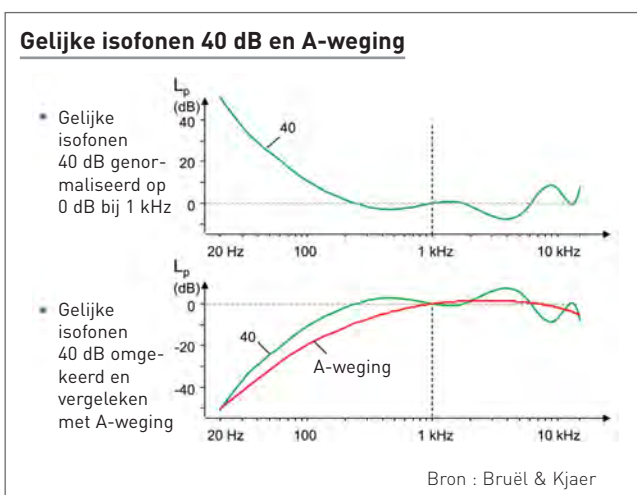
1.11. De frequentieweging "A"

De meeste dagdagelijkse geluiden zijn geen zuivere tonen, maar kunnen worden gekarakteriseerd door hun spectrale verdeling (bijvoorbeeld tertsbandspectrum). In de praktijk is het echter handig om de "sterkte" van het geluid aan te duiden met één getal. Hiertoe kan de luidheid worden gebruikt, berekend volgens de eerder vermelde methode van Zwicker of Stevens. In de praktijk wordt echter meer gewerkt met het geluidsdrukniveau van het spectrum, uitgedrukt in "dB". Men kan het globale geluidsdrukniveau van een gegeven spectrum berekenen door de geluidsdrukwaarden van de relevante tertsbanden logaritmisch op te tellen. Het aldus bekomen geluidsdrukniveau heeft echter als groot nadeel dat het slecht gecorreleerd is met de luidheid, precies door de sterk frequentieafhankelijke gevoeligheid van het menselijk gehoor. Vandaar dat men, vóór men de logaritmische optelling van de geluidsdrukwaarden uitvoert, eerst een frequentieafhankelijke correctie, een **frequentieweging**, toepast om de frequentieafhankelijke gevoeligheid van het gehoor in rekening te brengen. Er zijn verschillende frequentiewegingen in voege, die men aanduidt met de letters A, B, C, D (Figuur 28).



Figuur 28 :
De frequentiewegingscurven

Per definitie is de correctie bij 1000 Hz bij alle wegingscurven gelijk aan 0. Men houdt bij deze wegingen in mindere of meerdere mate rekening met de lagere gevoeligheid bij lage en hoge frequenties in het auditiële spectrum. De frequentieweging "A" is gebaseerd op de isofoon van 40 foon (Figuur 29) en wordt veruit het meest gebruikt, zelfs bij veel hogere geluidsdrukniveaus. De B- en C-weging zijn respectievelijk gebaseerd op de 70 en 100 foon-curve, maar worden daarentegen weinig gebruikt. De D-weging die de grote gevoeligheid van het menselijk gehoor tussen 1000 en 6000 Hz sterk benadrukt, wordt soms gebruikt voor metingen van het karakteristieke lawaai van vliegtuigen.

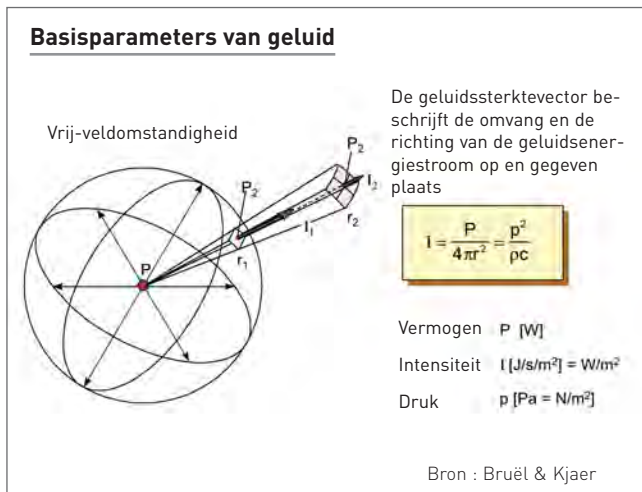


Figuur 29 : De frequentiewegingscurve "A" is afgeleid van (maar geen exacte weerspiegeling van) de isofoon van 40 foon

Een **lineaire** frequentieweging betekent gewoon dat er géén weging wordt toegepast. Geluidsdrukniveaus van spectra die werden berekend rekening houdend met een bepaalde frequentieweging A, B, ... worden respectievelijk uitgedrukt in dB(A), dB(B), ... In het bijzonder de frequentieweging "A" wordt zeer veel gebruikt en levert een vrij goede – zij het niet perfecte – correlatie met de hinderlijkheid van een geluid. Hoewel gebaseerd op de isofoon van 40 foon, voldoet de "A" weging ook redelijk bij hogere en lagere luidheden.

1.12. Vermogen en intensiteit van een geluidsbron

De geluidsdruk die wordt gemeten in de omgeving van een bepaalde geluidsbron kan sterk plaatsafhankelijk zijn. "Het geluidsdrumniveau van die vrachtwagen is 80 dB(A)" is op zich dus een zinloze uitspraak wanneer er niet wordt bij gespecificeerd wáár deze waarde werd gemeten (op 1 m van de vrachtwagen? Op 10 m? Op 100 m?). Een fysische grootheid die onafhankelijk is van het meetpunt is het **geluidsvermogen** P en is gedefinieerd als de hoeveelheid geluidsenergie die per seconde wordt uitgestraald door een bepaalde bron (Figuur 30).



Figuur 30 : Een geluidsbron met vermogen P zendt geluidsgolven uit die de vorm hebben van concentrische bollen met in het middelpunt de bron. De intensiteitsvector I loodrecht op de sferische golffronten. De grootte van de intensiteit I , het vermogen P en de geluidsdruk p zijn verbonden door een eenvoudige relatie

Het geluidsvermogen wordt uitgedrukt in watt (W). Analoog aan het geluidsdrumniveau werd het **geluidsvermogeniveau** L_P ingevoerd:

$$L_P = 10 \log(P/P_0) \quad (\text{vergelijking 13})^7$$

waarbij $P_0 = 10^{-12}$ W het referentievermogen

Het geluidsvermogen is typisch voor een bepaalde geluidsbron, maar kan natuurlijk variëren met de tijd. Het geluidsvermogen typeert de **emissie** van een geluidsbron. Het geluidsdrumniveau, gemeten bij de waarnemer (bijvoorbeeld de woning van een omwonende van een snelweg) geeft informatie over de **immissie**. Er kunnen zowel normen opgelegd worden aan de emissiezijde (bijvoorbeeld Europese regelgeving betreffende het maximale geluidsvermogen van voertuigen en werktuigen) als aan de immissiezijde (bijvoorbeeld geluidsnormen opgenomen in de Vlaamse milieuwetgeving Vlarex).

Een andere belangrijke grootheid is de **vectoriële** grootheid **geluidsintensiteit I** . Geluid afkomstig van een bepaalde bron plant zich voort in een bepaalde richting. Het begrip geluidsdrumniveau houdt hiermee geen rekening: het is een scalaire fysische grootheid (zoals de temperatuur). Indien men in de buurt van een geluidsbron in werking een eenheidsoppervlak beschouwt dat loodrecht staat op de voortplantingsrichting van het geluid, dan is de geluidsintensiteit in het midden van dat oppervlak een vector met als grootte de hoeveelheid geluidsenergie dat per seconde door het oppervlak passeert en als richting de voortplantingsrichting van het geluid. De grootte van de geluidsintensiteit, aangeduid met I , wordt uitgedrukt in W/m^2 . Het **intensiteitsniveau** wordt gedefinieerd als:

$$L_I = 10 \log(I/I_0) \quad (\text{vergelijking 14})^8$$

waarbij $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 de referentieintensiteit.

De geluidsintensiteit en de geluidsdruk zijn in vrij-veld-condities⁹ verbonden door de relatie:

$$I = p^2/(\rho c) \quad (\text{vergelijking 15})$$

met ρ de massadichtheid van het medium (voor lucht bij 20°C = 1.21 kg/m^3) en c de geluidssnelheid (=344 m/s). Men vindt onmiddellijk dat in vrije-veld-condities:

$$L_I = L_P \quad (\text{vergelijking 16})$$

Het totale geluidsvermogen dat door een bepaald oppervlak passeert vindt men door de geluidsintensiteit over dit oppervlak te integreren:

$$P_S = \int_S \mathbf{I} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{vergelijking 17})^{10}$$

met $d\mathbf{S}$ een vector loodrecht op het oppervlak en grootte 1.

⁷ hierbij wordt P ook geïntegreerd over een tijdsinterval, met bijvoorbeeld $\tau = 0,125$ s

⁸ idem voor I

⁹ Dit wil zeggen zonder reflecterende oppervlakken in de buurt

¹⁰ de vermenigvuldiging tussen twee vectoren \cdot is het zogenaamde "inproduct" gedefinieerd als $\mathbf{I} \cdot d\mathbf{S} = I dS \cos\theta$ met θ de hoek tussen beide vectoren \mathbf{I} en $d\mathbf{S}$

Voor een geluidsbron die zich in het middelpunt van een sfeer met straal r bevindt en haar geluidsenergie in alle richtingen uniform uitstraalt, vindt men onmiddellijk:

$$P = I 4\pi r^2 \quad (\text{vergelijking 18})$$

met W het vermogen van de bron en I de intensiteit die over het gehele oppervlak van de sfeer constant is.

Een praktisch voorbeeld is het geluidsvermogen uitgestraald door een deuropening in een scherm langs een snelweg. Indien I gelijk is over de gehele oppervlakte van de opening is:

$$P_{\text{opening}} = I_{\text{opening}} S_{\text{opening}} \quad (\text{vergelijking 19})$$

met I_{opening} de intensiteit gemeten in het vlak van de opening en S_{opening} de oppervlakte van de opening. Om I_{opening} te kennen volstaat het een geluidsdrukmeting uit te voeren (zie vergelijking 15).

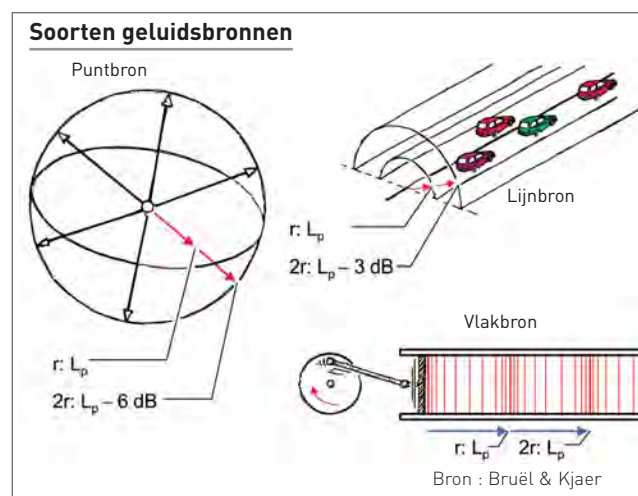
Meestal wordt het vermogen van een bron niet uniform in alle richtingen uitgestraald, maar is er sprake van een **directiviteit**. Onderstel een bron zonder reflecterende oppervlakken of voorwerpen in de ruime omgeving. De bron straalt uniform energie uit in alle richtingen. Plaatst men achter respectievelijk onder de bron een reflecterend scherm of een gladde vloer, dan wordt de volledige energie van de bron in één halve sfeer uitgezonden. In een waarnemingspunt (gelegen in deze halve sfeer) verdubbelt de waargenomen geluidsenergie en stijgt het geluidsdrukkniveau dus met 3 dB. Wordt een geluidsbron bij de snijlijn van twee loodrechte, reflecterende vlakken (bijvoorbeeld een reflecterende muur en een reflecterende vloer) geplaatst, dan kan de geluidsenergie zich slechts uitbreiden in een kwart sfeer; hierdoor verhoogt het geluidsdrukkniveau in het waarnemingspunt met 6 dB. Een bron in een hoek gevormd door drie onderling loodrechte, reflecterende vlakken kan slechts stralen in één achtste van een sfeer. T.o.v. de situatie zonder de vlakken is de waargenomen geluidsenergie in dit octant dus acht maal hoger, wat overeenkomt met een stijging van het geluidsdrukkniveau met 9 dB. De **directiviteitsfactor** Q voor een bepaalde waarnemingsrichting van een bron is de verhouding tussen het reëel in deze richting uitgestuurde vermogen en het vermogen dat zou worden uitgestuurd indien de uitstraling van geluidsenergie uniform over alle richtingen zou gebeuren. In de hierboven beschreven situatie zonder vlakken is $Q = 1$, met één vlak is $Q = 2$, met twee vlakken is $Q = 4$ en met de drie vlakken is $Q = 8$. Wanneer men uitgaande van een bepaald geluidsvermogen van een bron het geluidsdrukkniveau wenst te berekenen in een waarnemingspunt (zie verder), dient men steeds rekening te houden met de directiviteitsbijdrage, die dus kan berekend worden met:

$$D_{\text{dir}} = 10 \log Q \quad (\text{vergelijking 20})$$

1.13. Uitbreiding en attenuatie van geluid

1.13.1. Geometrische uitbreiding

De geluidsbron die tot nu toe werd beschouwd is een puntbron, omdat alle geluidsenergie uit één punt werd uitgestraald (Figuur 31).



Figuur 31 : Bij een puntbron wordt de geluidsenergie uitgesmeerd over sferische golffronten waarvan de diameter toeneemt. Een afstandsverdubbeling veroorzaakt een afname van het geluidsdrukkniveau met 6 dB. Een drukke, rechte snelweg is een voorbeeld van een lijnbron. Hierbij hebben de golffronten de vorm van cilinders met als gemeenschappelijke middellijn de bron. Een afstandverdubbeling zorgt voor een afname van het geluidsdrukkniveau met 3 dB. Bij vlakke golffronten, zoals bij geluid veroorzaakt door een bewegende zuiger in een buis, is er geen afname van het geluidsdrukkniveau door de geometrische uitbreiding

In een dergelijk geval is de voortplantingsrichting van de geluidsgolven radiaal en de golffronten (punten in het medium die in dezelfde fase van de golfbeweging zijn) hebben de vorm van concentrische sferen. Een voorbeeld van een puntbron is een vliegtuig in de lucht waarbij de waarnemer zich op enige afstand (bijvoorbeeld 1 km) ervan bevindt. Het geluidsdrukkniveau wordt zwakker naarmate de waarnemer zich van de puntbron verwijdert omdat de geluidsenergie over een sfeer met een steeds grotere straal wordt uitgesmeerd. De geluidsenergie die wordt waargenomen op een afstand r van de puntbron is daardoor evenredig met $1/r^2$. Een verdubbeling van de afstand betekent dat de geluidsenergie met een factor 4 afneemt en het geluidsdrukkniveau dus met 6 dB. Bij een puntbron is de relatie tussen geluidsvermogeniveau van de bron en het geluidsdrukkniveau op een afstand r , geen rekening houdend met alle andere effecten die hierna worden besproken:

$$L_p = L_p - 20 \log r - 8 \text{ dB} \quad (\text{vergelijking 21})$$

Bij het voorbeeld van de zuiger die beweegt in een buis (zie ook Figuur 31) heeft men vlakke golffronten en neemt de geluidsenergie niet af met toenemende afstand tot de bron. Dit verklaart waarom lawaai zich door buizen in gebouwen soms over grote afstanden kan voortplanten en nauwelijks verzwakt.

Een druk bereden, rechte autoweg (zie ook Figuur 31) is een voorbeeld van een **lijnbron**. De golffronten hebben de vorm van cilinders met een gemeenschappelijke middellijn (de bron). De geluidsenergie wordt uitgesmeerd over een cilindrisch oppervlak en daardoor is de waargenomen geluidsenergie op afstand r van de bron evenredig met $1/r$. Een verdubbeling van de afstand betekent hier dat de geluidsenergie met een factor 2 afneemt en het geluidsdrukkniveau dus slechts met 3 dB. Dit is de reden waarom het lawaai van een autoweg doorgaans vrij ver hoorbaar is. Bij een lijnbron geldt de relatie:

$$L_p = L_p - 10 \log r - 5 \text{ dB} \quad (\text{vergelijking 22})$$

Men heeft ten slotte ook nog het algemene geval, waarbij de golffronten een grillige vorm aannemen. Als voorbeelden gelden een industriële installatie met enkele tientallen geluidsbronnen, een vliegtuig of een auto op korte afstand enz..

Een belangrijke stelregel is dat **elke** bron zich als een **puntbron** gaat gedragen zodra de waarnemer zich op een afstand bevindt die veel groter is dan de afmetingen van de bron. Een voorbeeld is het vliegtuig: geluidsmetingen op kleine afstand en op verschillende posities t.o.v. het vliegtuig brengt grillige golfpatronen aan het licht, veroorzaakt door de verschillende motoren die zich op enige afstand van elkaar bevinden. Op een afstand van hoogstens enkele honderden meter is de afstand waarnemer - vliegtuig echter veel groter dan de onderlinge afstanden van de motoren en kan het vliegtuig in goede benadering als een puntbron worden beschouwd. Hetzelfde geldt voor een rijdende auto die op korte afstand (enkele meter) golffronten met grillige vormen verspreidt ten gevolge van de verschillende geluidsbronnen (bandengeluid, geluid motor, uitlaat e.d.).

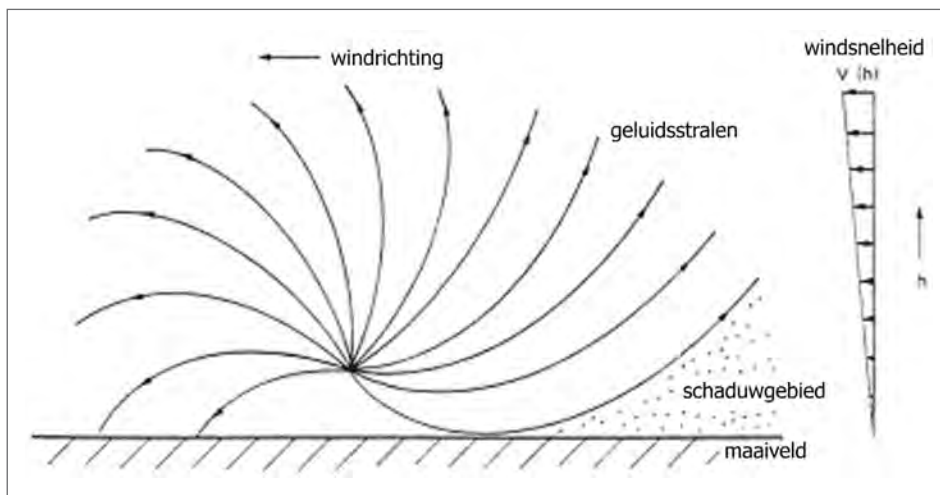
Een stuk autoweg van 500 m lang gedraagt zich tot op enkele honderden meter als een lijnbron en het geluidsdrukkniveau neemt af met 3 dB per afstandsverdubbeling; op enkele km afstand wordt deze bron echter waargenomen als een puntbron met een afname van 6 dB per afstandsverdubbeling. Bij een weg met een lage verkeersintensiteit worden de voertuigen echter als bewegende puntbronnen waargenomen.

1.13.2. Wind en temperatuur

Naast de afname van het geluidsdrukkniveau door geometrische uitbreiding zijn er nog een aantal andere factoren die het geluidsdrukkniveau in het waarnemingspunt doen af- of toenemen.

Meteorologische omstandigheden, en in het bijzonder wind en temperatuur, kunnen een belangrijke rol spelen, wanneer de afstand tussen bron en waarnemer meer dan 50 m bedraagt. Hoe groter deze afstand, des te groter de mogelijke invloed van de meteo-omstandigheden.

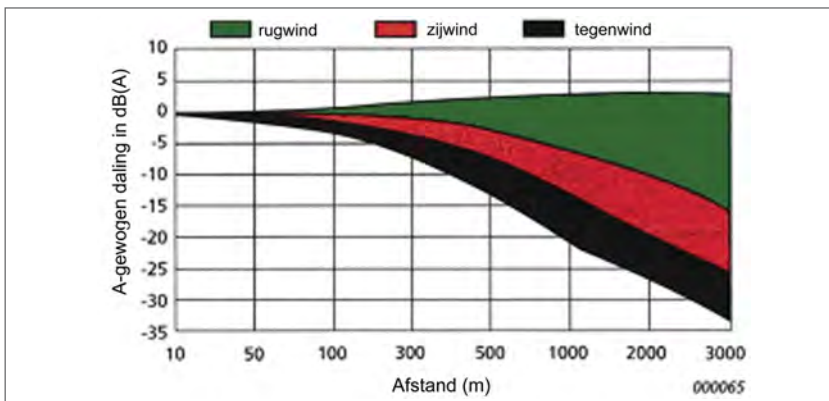
De windsnelheid neemt toe met toenemende hoogte. Ten gevolge van deze **gradiënt** van de windsnelheid worden geluidsgolven die in dezelfde richting van de wind lopen naar het aardoppervlak gebogen (situatie wind mee, cfr. Figuur 3432) en zorgen windafwaarts voor een geluidsdrukverhoging. In het andere geval worden de geluidsgolven van het aardoppervlak weggeleid, wat windopwaarts zorgt voor een geluidsarme "schaduwzone".



Bron: P.M. Nelson, BSc, PhD, FIOA , « Transportation Noise Reference Book », Butterworth & Co, 1987

Figuur 32 : Door de toenemende windsnelheid met toenemende hoogte worden de voortplantingsrichtingen van de geluidsgolven afgebogen, waardoor het geluid zich niet langs rechte lijnen voortplant. Hierdoor ontstaat er windafwaarts een gebied met een verhoogd geluidsdruk niveau en windopwaarts een schaduwzone (gebied met verlaagd geluidsdruk niveau)

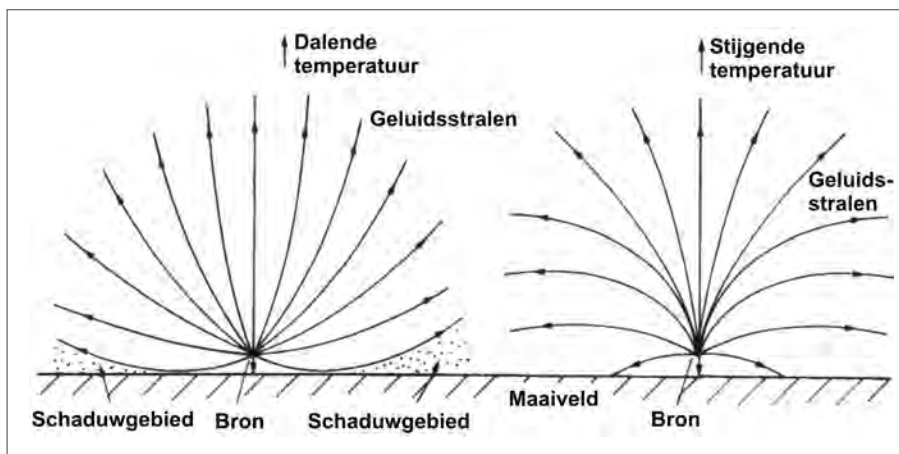
Figuur 33 toont dat bij een afstand bron – waarnemer van 1000 m er bij wind mee een attenuatie kan optreden van ca. -3 tot +3 dB, maar bij wind tegen kan de attenuatie oplopen tot -20 dB.



Figuur 33 : De toe- of afname van het geluidsdruk niveau ten gevolge van windefecten in functie van de afstand

Bron: Brüel & Kjaer « Bruit de l'Environnement », Brüel & Kjaer, 2000

Bij normale meteo-omstandigheden neemt de temperatuur af met stijgende hoogte. Omdat de snelheid van de geluidsgolven afhankelijk is van de temperatuur, worden de geluidsgolven naar boven afgebogen en zorgen voor een verlaging van het geluidsdruk niveau op het aardoppervlak. Bij temperatuursinversie worden de geluidsgolven naar het aardoppervlak toegebogen en wordt daar een verhoging van het geluidsdruk niveau veroorzaakt (zie Figuur 34). Wegens het ontbreken van cijfergegevens wordt dit effect enkel kwalitatief behandeld.



Bron: P.M. Nelson, BSc, PhD, FIOA , « Transportation Noise Reference Book », Butterworth & Co, 1987

Figuur 34 : De invloed van de af- of toename van de temperatuur met stijgende hoogte: links de normale situatie, rechts bij temperatuursinversie. Bij de normale situatie ontstaat er op grotere afstand van de bron een schaduwzone, die echter niet optreedt bij temperatuursinversie

1.13.3. Absorptie door de lucht

De energie van geluidsgolven die zich voortplanten door de lucht wordt in zekere mate geabsorbeerd door omzetting in warmte-energie van de luchtmoleculen. Het fenomeen is sterk afhankelijk van de frequentie van het waarnemer enkele tientallen meter bedraagt. Voor de laagste frequenties is het effect zelfs over grote afstand (> 10 km) te verwaarlozen. Het effect is voor hoogfrequent geluid al belangrijk zodra de afstand tussen bron en. Het effect is ook afhankelijk van de temperatuur van de lucht. Enkele waarden worden gegeven in Tabel 4.

Octaafband (Hz)	0°C	10°C	20°C
500	0,2	0,2	0,3
1000	0,5	0,4	0,5
2000	1,5	1,0	1,1
4000	4,5	2,7	2,3
8000	10,4	6,7	4,8

Tabel 4 : de absorptie van geluid door de lucht uitgedrukt in dB/100m bij verschillende temperaturen en bij een relatieve luchtvochtigheid van 80%

Men kan ook gebruik maken van de formule:

$$D_{\text{abs}} = f \cdot r / 152500 \quad (\text{vergelijking 23})$$

met f de frequentie van het geluid in Hz en r de afgelegde afstand in m.

Voor frequenties lager dan 500 Hz worden met de formule echter te hoge waarden gevonden.

1.13.4. Absorptie door vegetatie

De afscherming verkregen door het plaatsen van vegetatie tussen bron en ontvanger worden over het algemeen **sterk overschat**. Algemeen gesproken is vegetatie een slechte reflector/absorber van geluid, zoals blijkt uit de waarden in Tabel 5, waar de waarden voor de absorptie door een dicht loofbos zijn weergegeven^v.

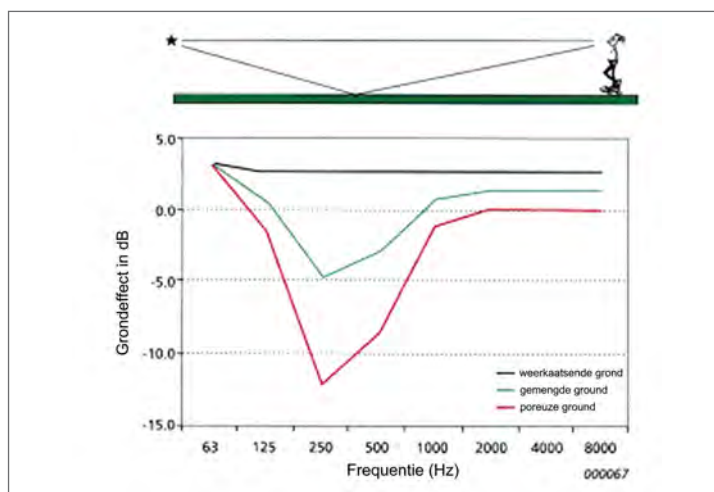
Frequentie (Hz)	200 - 400	400 - 800	800 - 1600	1600 - 3200	3200 - 6400
Absorptie (dB/m)	0,05	0,05 - 0,07	0,08 - 0,10	0,11 - 0,15	0,17 - 0,2

Tabel 5: de absorptie van geluid door dicht loofbos uitgedrukt in dB/m

Om een afscherming te verkrijgen die van dezelfde grootte-orde is als een geluidswerend scherm (zie fiche 9) is een strook dicht bos nodig met een breedte van ca. 100 m.

1.13.5. Grondeffecten

De overdracht van geluid van een bron naar een waarnemer kan beïnvloed worden door reflecties op de bodem tussen beide punten. Geluidsgolven die de waarnemer bereiken kunnen immers niet alleen het rechtstreekse traject door de lucht volgen, maar kunnen ook één maal gereflecteerd zijn door de bodem. De gereflecteerde geluidsgolf kan het geluidsniveau significant versterken of verzwakken. Er dient een onderscheid te worden gemaakt tussen "akoestische harde" oppervlakken (beton, geplaveide oppervlakken, water,...) en akoestisch zachte oppervlakken (grasland, akker met gewassen, besneeuwd oppervlak,...). Figuur 35 toont een voorbeeld van de attenuatie ten gevolge van reflectie op een harde, zachte en "gemengde" bodem.

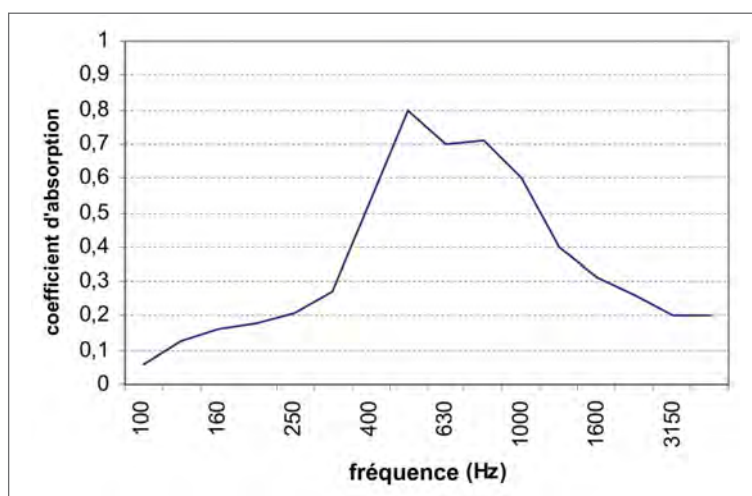


Figuur 35 : De invloed van de bodem om het geluidsdrukniveau bij de ontvanger

Deze waarden zijn geenszins representatief voor alle situaties. Vaak vertoont de attenuatie een grillig verloop als functie van de frequentie als gevolg van afwisselend opbouwende en vernietigende interferentie tussen de rechtstreekse golf en de op de bodem gereflecteerde component.

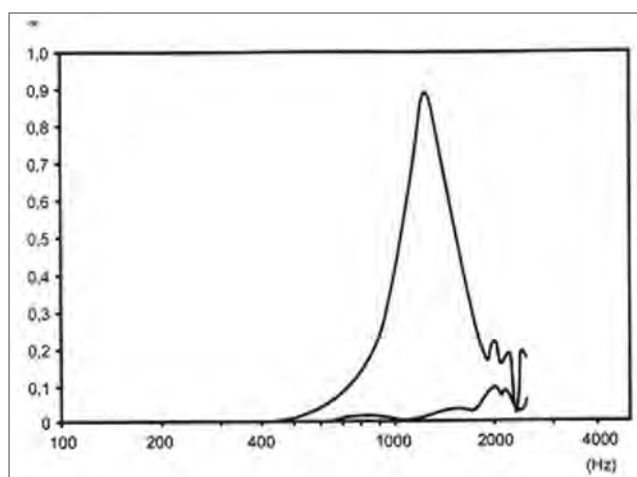
1.13.6. Reflectie, absorptie en diffractie

Enigszins analoog aan de grondeffecten kan het geluidsdrukniveau op de plaats van de waarnemer worden beïnvloed door de aanwezigheid van reflecterende oppervlakken (schermen, gebouwen, muren, taluds, ...). Wanneer de waarnemer zich in de nabijheid van een reflecterend scherm bevindt, wordt niet enkel het geluid waargenomen dat rechtstreeks afkomstig is van de bron, maar ook het geluid dat gereflecteerd is door het scherm. Op niet al te kleine afstand leidt dat tot een verdubbeling van de geluidsenergie in het waarnemingspunt en dus een stijging van 3 dB van het geluidsdrukniveau. Dit echter in de veronderstelling dat het scherm perfect reflecterend is. In de praktijk zal een deel van de energie worden geabsorbeerd en omgezet in warmte-energie. De verhouding tussen de hoeveelheid geabsorbeerde en de hoeveelheid invallende geluidsenergie noemt men de **absorptiecoëfficiënt**. De absorptiecoëfficiënt is in de meeste gevallen afhankelijk van de frequentie: een scherm kan absorberend zijn in een bepaald gedeelte van het spectrum en reflecterend in een ander gedeelte. Figuur 36 toont de absorptiecoëfficiënt in functie van de frequentie voor een scherm uit geperforeerde baksteen^{vi}. Geluidsenergie die invalt op een scherm wordt ook in een zekere mate doorgelaten door het scherm (transmissie). De geluidsabsorberende eigenschappen zijn eveneens van groot belang.



Figuur 36 : De absorptiecoëfficiënt in functie van de frequentie voor een geluidswerend scherm uit geperforeerde baksteen

Figuur 37 toont het typische verloop van de absorptiecoëfficiënt van open asfalt (bovenste lijn) en dicht asfalt (onderste lijn).



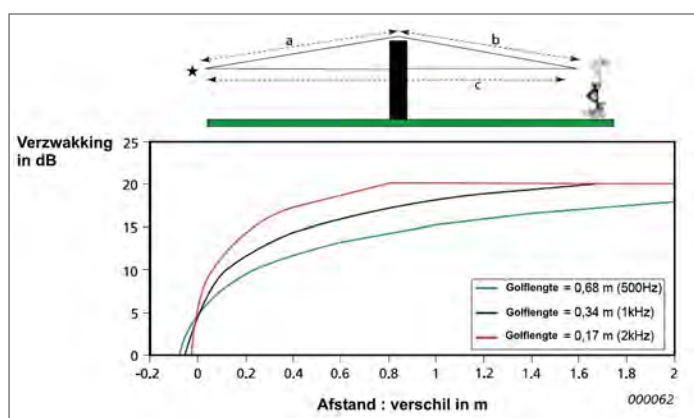
Figuur 37 : De absorptiecoëfficiënt in functie van de frequentie voor open (bovenste lijn) en gesloten asfalt (onderste lijn)

Het plaatsen van geluidsschermen is een veel toegepaste methode om de transmissie van verkeersgeluid naar de omwonenden te verminderen. Een deel van het verkeersgeluid wordt gereflecteerd of geabsorbeerd, waardoor het geluidsdrukniveau bij de ontvanger lager ligt dan het in de situatie zonder scherm zou zijn. Een scherm kan nooit al het verkeersgeluid wegnemen bij de omwonenden. Dit komt deels door de vermelde transmissie van het geluid door het scherm, maar vooral door het fenomeen dat geluidsgolven in staat om als het ware om hindernissen heen te lopen. Dit fenomeen, **diffRACTIE**, doet zich in de natuur bij alle golfverschijnselen voor wanneer de golflengte niet veel kleiner is dan het object. Geluid met frequentie van 100 Hz ($\lambda = 3,4$ m, zie vergelijking 1) wordt bijvoorbeeld weinig efficiënt afgeschermd door een scherm van 3 m hoog.

Er kan dan ook worden gesteld dat de efficiëntie van een scherm afhankelijk is van volgende factoren:

- ◆ het weglengteverschil tussen de directe transmissieweg bron – waarnemer en de weg die loopt over het scherm (a+b-c in Figuur 38). Hoe groter dit weglengteverschil, des te groter de efficiëntie
- ◆ de frequentie van het geluid: laagfrequent geluid (dus met lange golflengte) wordt veel minder efficiënt afgeschermd dan hoogfrequent geluid
- ◆ de massadichtheid per m² van het scherm: deze moet voldoende hoog zijn om transmissie van het geluid door het scherm te beperken

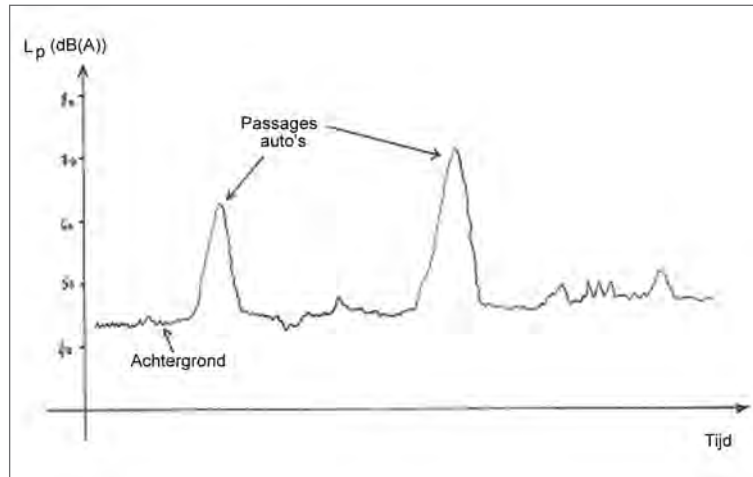
Schermen worden in extenso besproken in fiche 13.



Figuur 38 : Het weglengteverschil dat het geluid moet doorlopen is één van de bepalende factoren voor de efficiëntie van een geluidswerend scherm

1.14. Beoordelingsgrootheden voor geluid

Indien men de "sterkte" van een geluid wenst te beoordelen en te toetsen aan een norm, kan men als beoordelingsgrootte de loudheid berekend volgens de methode van Zwicker of Stevens. Men kan ook het geluidsdrukkniveau van het spectrum van het geluid, L_{pA} ¹¹, gebruiken, op voorwaarde dat het te beoordelen geluid een geluidsdrukkniveau heeft dat constant blijft in de tijd (bijvoorbeeld het geluid van een druk bereden autosnelweg, beschouwd over een niet al te lange periode). In een waarnemingspunt langs een straat waar af en toe een wagen voorbij rijdt is het geluidsdrukkniveau helemaal niet constant, maar vertoont het momentaan geluidsdrukkniveau L_p grote wisselingen (Figuur 39).



Figuur 39 : Het typisch fluctuerend verloop van het geluidsdrukkniveau langs een straat met sporadische passages van auto's

In de figuur ziet men een klokvormige wijziging van het geluidsdrukkniveau bij de passage van een wagen. Tussen de passages (in de akoestiek worden dergelijke kortstondige gebeurtenissen events genoemd) valt het geluidsdrukkniveau terug op een min of meer constante waarde: het **achtergrondniveau**. Het achtergrondniveau wordt meestal veroorzaakt door meerdere, op grote afstand en moeilijk of niet te identificeren geluidsbronnen (ver verwijderd verkeersgeluid, ruisen van bladeren of gewassen, gefluit van vogels, ...)

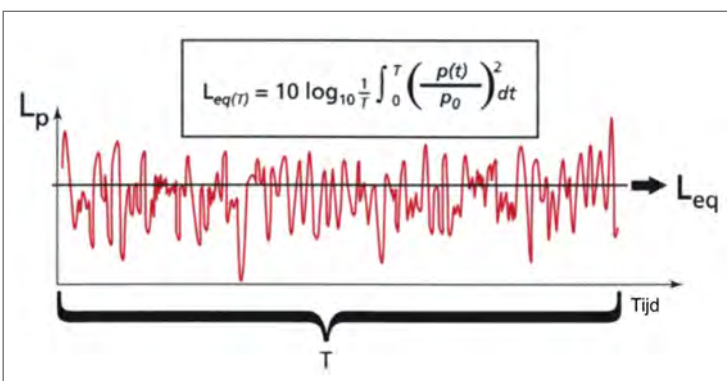
In het geval van fluctuerend geluid is er dus nood aan andere parameters om de geluidsbron(nen) te beoordelen. Belangrijke parameters zijn:

1.14.1. Het equivalent, A-gewogen geluidsdrukkniveau over een periode T ($L_{Aeq,T}$)

Het equivalent geluidsdrukkniveau van een geluid is het geluidsdrukkniveau van een stabiel geluid met dezelfde energie-inhoud als het gegeven geluid (Figuur 40), beide bepaald over een meetperiode T:

$$L_{Aeq,T} = (1/T) \int T p^2(t)/p_0^2 dt \quad (\text{vergelijking 24})$$

met $p(t)$ het geluidsdrukkniveau zonder tijdsweging.



Figuur 40 : Het equivalent geluidsdrukkniveau van een fluctuerend geluid over een tijdsinterval is het geluidsdrukkniveau van het stabiele geluid met dezelfde energie-inhoud als het gemeten geluid

Bron: Brüel & Kjaer « Bruit de l'Environnement », Brüel & Kjaer, 2000

¹¹ Men geeft aan het geluidsdrukkniveau L_p de index "A" mee om aan te tonen dat bij de berekening de frequentieweging "A" in rekening werd gebracht.

Het equivalent geluidsdrumniveau en afgeleide parameters worden veel gebruikt voor de beoordeling van geluiden met een licht tot sterk fluctuerend geluidsdrumniveau. Hij wordt relatief sterk bepaald door de meeste luidruchtige momenten van de meetperiode T, wat tegelijk een voor- en een nadeel is. De meest luidruchtige momenten zijn ook verantwoordelijk voor de eventuele hindergevoelens van het geluid, zodat de parameter een goede maat is om een bepaald geluid op zijn hinderlijkheid te gaan beoordelen. Het nadeel is meettechnisch: het optreden van luide stoorgeluiden¹², zelfs kortstondige, kan het resultaat beïnvloeden waardoor het niet meer bruikbaar is om het te beoordelen geluid te karakteriseren.

Stel dat men de equivalent geluidsdrumniveaus $L_{Aeq,T1}$ en $L_{Aeq,T2}$ heeft gemeten over twee periodes met respectievelijke duur T_1 en T_2 . Wat is het totale equivalente geluidsdrumniveau $L_{Aeq,T1+T2}$ over beide periodes samen? Men vindt dit niveau met de formule:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log((10^{L_{Aeq,T1}/10} + 10^{L_{Aeq,T2}/10})/T) \quad (\text{vergelijking 25})$$

met $T = T_1 + T_2$

Algemeen geldt voor n periodes met duur T_i en equivalent geluidsdrumniveau $L_{Aeq,Ti}$:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log((\sum 10^{L_{Aeq,Ti}/10})/T) \quad (\text{vergelijking 26})$$

met $T = \sum T_i$

Een belangrijke afgeleide parameter is het "dag-nacht-niveau" L_{dn} :

$$L_{dn} = 10 \log(15 \cdot 10^{L_d/10} + 9 \cdot 10^{L_n/10})/24 \quad (\text{vergelijking 27})$$

met L_d en L_n respectievelijk het dag- en nachtniveau. Het dagniveau is het equivalent geluidsdrumniveau L_{Aeq} , bepaald over de $T = 15$ uur van 7 uur 's ochtends tot 22 uur 's avonds¹³. Het nachtniveau is het equivalent geluidsdrumniveau L_{Aeq} , bepaald over de $T = 9$ uur van 22 uur tot 7 uur. Wegens de grotere gevoeligheid voor lawaai in de nachtperiode (zie fiche 2), wordt bij deze parameter een "strafcorrectie" van 10 dB(A) toegepast voor deze periode.

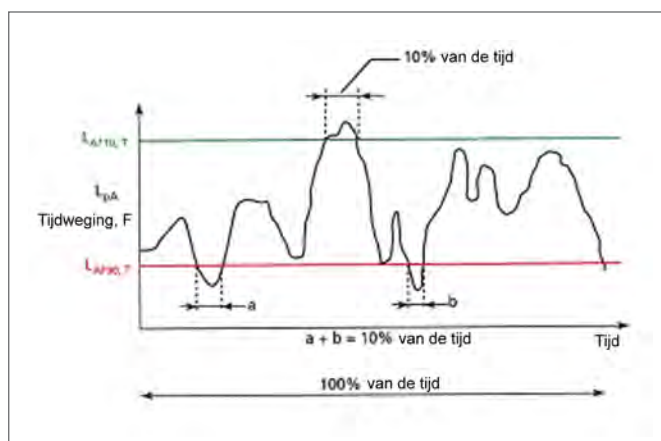
Een nog meer verfijnde variant is het L_{den} -niveau (het dag-avond-nacht-niveau)¹⁴, gedefinieerd als:

$$L_{den} = 10 \log(12 \cdot 10^{L_d/10} + 3 \cdot 10^{(L_e+5)/10} + 9 \cdot 10^{(L_n+10)/10})/24 \quad (\text{vergelijking 28})$$

met L_e het avond-niveau, d.i. het equivalent geluidsdrumniveau bepaald over de drie uur van 19 uur tot 22 uur. Het dagniveau wordt in dit geval bepaald over de 12 uur durende periode van 7 uur tot 19 uur.

1.14.2. De statistische parameters L_{A99} , L_{A95} , L_{A50} , ...

De parameter $L_{AFN,T}$ wordt gedefinieerd als het geluidsdrumniveau dat gedurende N % van de meettijd T werd overschreden en gemeten werd met de snelle tijdsweging. N is een getal tussen 0 en 100. Voor de bondigheid wordt de index "F" meestal weggelaten. In Figuur 41 wordt het tijdsverloop van het momentaan geluidsdrumniveau L_{pA} (tijdsweging F) aangeduid met de zwarte kromme. L_{A90} is het niveau dat gedurende 90 % van de meettijd werd overschreden. De som van de twee korte periodes a en b is 10 % van de meettijd. Ook het L_{A90} -niveau is aangeduid.



Bron: Brüel & Kjaer « Bruit de l'Environnement », Brüel & Kjaer, 2000

Figuur 41 : De statistische parameters L_{A10} en L_{A90} van een fluctuerend geluid, gemeten over een bepaald tijdsinterval

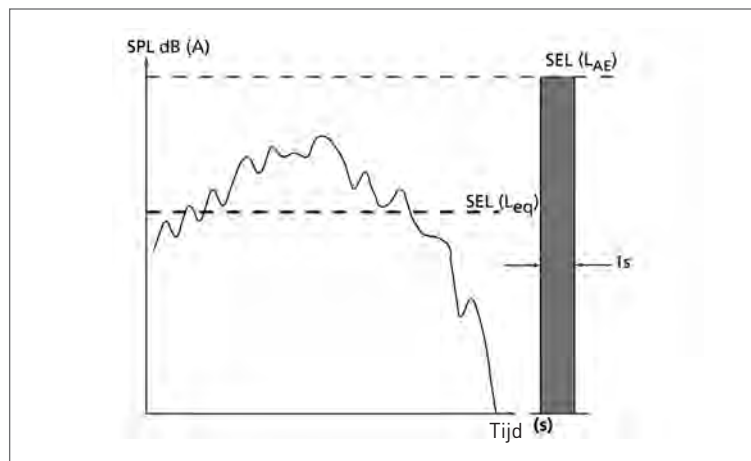
¹² Geluiden niet behorend tot het te beoordelen geluid, bijvoorbeeld het geluid van een overvliegende militaire jet bij het uitvoeren van wegverkeerslawaai
¹³ deze tijdstippen gelden voor België, maar kunnen verschillen van land tot land: in Nederland bijvoorbeeld laat men de nachtperiode beginnen om 23 uur i.p.v. om 22 uur

¹⁴ de "e" in L_{den} staat voor "evening"

Men merkt op dat:

- ◆ L_{A99} , L_{A95} en L_{A90} typisch zijn voor de stilste momenten van de meting. Op voorwaarde dat er niet onop- houdelijk een voorgrondbron in werking is, zijn zij typerend voor het achtergrondgeluid dat op een bepaalde plaats heerst.
- ◆ L_{A50} het niveau is dat even lang over- als onderschreden wordt tijdens de meting, d.i. dus het mediaan niveau. Het L_{A50} -niveau valt samen met de LAeq-parameter bij een stabiel geluid. Bij een fluctuerend geluid is de LAeq-parameter hoger dan het L_{A50} -niveau en hoe sterker het fluctuerend karakter, des te groter het verschil tussen de twee parameters. Hierdoor is de LAeq-parameter interessanter om fluctuerend geluid te beoordelen, omdat het extra hinderlijke aspect door de fluctuaties van het geluid worden weerspiegeld in een hogere beoordelingsparameter.
- ◆ L_{A10} , L_{A5} en L_{A1} typerend zijn voor de momenten van de meting met de hoogste geluidsdrukniveaus
- ◆ L_{A0} en L_{A100} respectievelijk het minimumgeluidsdrukniveau (L_{Amin}) en het maximumgeluidsdrukniveau (L_{Amax}) van de meting zijn.

Het **A-gewogen geluidblootstellingsniveau** van een gebeurtenis met duur T (bijvoorbeeld de passage van een vrachtwagen) wordt gedefinieerd als het geluidsdrukniveau van een stabiel geluid dat 1 seconde duurt en dat dezelfde energie-inhoud heeft als de beschouwde gebeurtenis. Het geluidblootstellingsniveau wordt aangeduid met L_{AE} of met zijn Engelstalige afkorting SEL¹⁵. In Figuur 42 wordt het LAE-niveau van een gebeurtenis aangegeven.

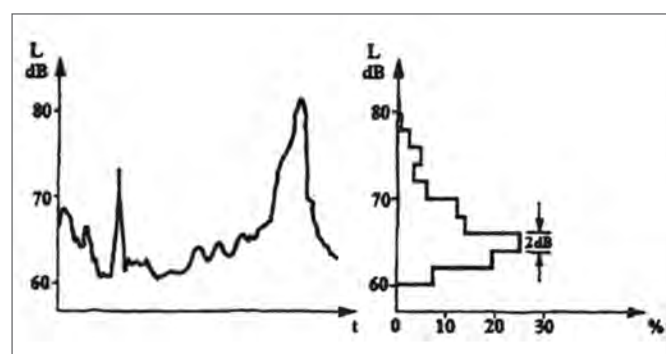


Bron: Brüel & Kjaer « Bruit de l'Environnement », Brüel & Kjaer, 2000

Figuur 42 : Het geluidblootstellingsniveau van een gebeurtenis met duur T is het geluidsdrukniveau van een stabiel geluid met dezelfde energie-inhoud als de beschouwde gebeurtenis

Er bestaan in de milieukoestiek tal van parameters (minstens een vijftigtal!) die deels van de bovenstaande zijn afgeleid, maar die verder weinig relevant zijn in het kader van onderhavig werk.

Een **differentiële distributie** (histogram, waarschijnlijkheidsverdeling) is een diagram waarbij de percentages van de meettijd worden aangegeven in functie van het geluidsdrukniveau (Figuur 43).

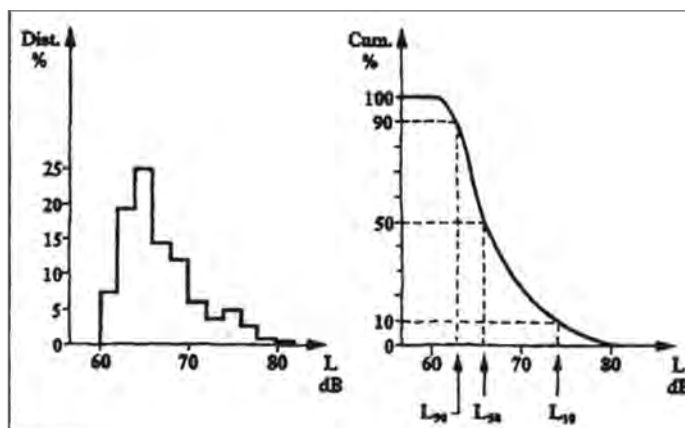


Figuur 43 : Om een differentiële distributie te bekomen deelt men het relevante deel van de dB(A)-schaal op in intervallen met gelijke breedte en men bepaalt voor elke klasse hoeveel procent van de meettijd het geluidsdrukniveau in de bewuste klasse viel

¹⁵ sound exposure level

In de praktijk wordt de dB(A)-schaal verdeeld in klassen met een constante breedte (in het voorbeeld 2 dB(A)). De ordinaatwaarde per klasse is het percentage van de meettijd dat het geluidsniveau tijdens de meting in de bewuste klasse viel. Het voordeel van de differentiële distributie dat zij in één oogopslag aangeeft hoe de geluidsniveaus tijdens de meting verdeeld waren.

De **cumulatieve verdeling** (Figuur 44) is een andere voorstelling van dezelfde informatie die men terugvindt in de differentiële verdeling. Dit diagram geeft voor ieder geluidsniveau aan wat het percentage van de meettijd is dat het werd overschreden gedurende de meting. Door van een gewenste waarde N op de ordinaat de corresponderende absciswaarde te bepalen verkrijgt men de corresponderende L_{AN} -parameter.



Figuur 44 : De cumulatieve distributie geeft het percentage van de meettijd aan dat een gegeven geluidsniveau werd overschreden

1.15. Voorspellen van geluidsniveaus

Indien het vermogen van een bepaalde geluidsbron gekend is en alle factoren die het geluid beïnvloeden bij zijn propagatie van bron naar ontvanger, kunnen de parameters (bijvoorbeeld L_{den}) worden berekend in het immisiepunt. Bij wegverkeer wordt dit geluidsvermogen o.a. bepaald door (zie fiche 4):

- ◆ de voertuigintensiteit
- ◆ de verdeling van de aard van de voertuigen (personenauto's, vrachtwagens, motoren,...)
- ◆ de snelheid van de voertuigen
- ◆ de aard van het wegdek
- ◆ de geometrie van de weg (helling, bochten, kruispunten, ...)
- ◆ ...

Het geluid dat ontstaat door het verkeer breidt zich uit en wordt versterkt en verzwakt door de diverse factoren zoals reeds besproken supra. In een reële situatie is dit door de veelheid aan bronnen en de ingewikkelde geometrie van de omgeving een complex proces. Een berekening kan dan ook nooit "exact" verlopen: er moeten steeds benaderingen en veronderstellingen worden ingevoerd. Heel wat landen ontwikkelden hun eigen gestandaardiseerde rekenmethode, specifiek voor het berekenen van het geluidsniveau van verkeerslawaaai. Voorbeelden zijn:

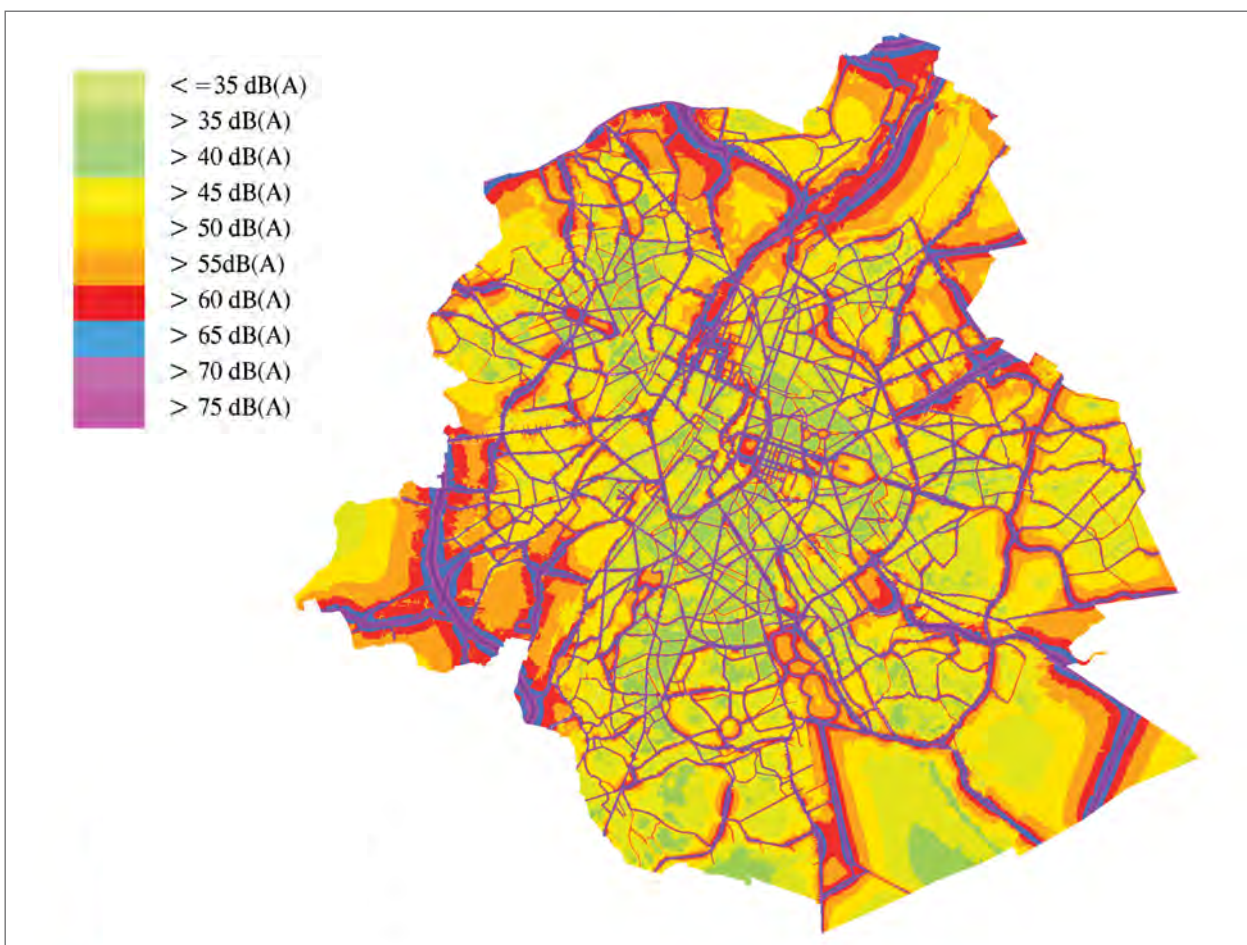
- ◆ SRM (Standaard Rekenmethode) I en II (Nederland)
- ◆ CRTN (Calculation of Road Traffic Noise, 1988) (Verenigd Koninkrijk)
- ◆ NMPB (Besluit van 5 mei 1995) (Frankrijk)
- ◆ StL-86 (Zwitserland)
- ◆ RVS 3.114 (Oostenrijk)
- ◆ TEMANORD 1996:525 (Scandinavische landen)

Er bestaat ook een algemene¹⁶ internationale norm voor het voorspellen van geluidsdrukniveaus: de ISO 9613 deel 1 (1993) en 2 (1996). Deel 1 behandelt de absorptie van geluid door lucht wanneer het zich voortplant buitenshuis. Deze norm werd omgezet in een Belgische norm (NBN ISO 9613-1:1996). Deel 2 stelt een algemene rekenmethode voor. Dit deel werd nog niet omgezet in een Belgische norm. Een standaard rekenmethode is in België evenmin voorhanden.

Het gebruik van dergelijke rekenmethodes en het berekenen van geluidsdrukniveau heeft een aantal specifieke voor- en nadelen. Een berekening is aangewezen in de volgende gevallen:

- ◆ Wanneer er in het immissiepunt een achtergrondgeluid heerst met een geluidsdrukniveau van dezelfde grootte-orde (of hoger) dan het geluidsdrukniveau van de te meten bron (cfr. paragraaf in verband met aftrekken van geluidsdrukniveaus)
- ◆ Voor de voorspelling van geluidsdrukniveaus van toekomstige bronnen (bijvoorbeeld van een geplande autosnelweg)
- ◆ Met een rekenmodel kan men ook verschillende alternatieve scenario's doorrekenen (bijvoorbeeld de berekening herhalen met geluidsschermen op verschillende plaatsen en met verschillende hoogten)
- ◆ Men kan het immissieniveau bepalen op plaatsen die moeilijk bereikbaar zijn om er metingen uit te voeren
- ◆ De modellen lenen zich uitstekend om **geluidskaarten**¹⁷ te produceren.

De nauwkeurigheid van de berekening van het geluidsdrukniveau is echter afhankelijk van de nauwkeurigheid van de ingebrachte gegevens (de bronvermogens, geometrie en positie van de bron en obstakels enz.) en van de geldigheid van de gemaakte veronderstellingen en vereenvoudigingen. De meeste geciteerde modellen maken gebruik van eenvoudige, empirische regels. Deze berekeningen kunnen in principe met de hand worden gedaan, maar in het geval men te maken heeft met een situatie met veel bronnen, een ingewikkelde topografie of veel hindernissen is het interessant om gebruik te maken van specifieke software. Er zijn heel wat softwarepakketten op de markt die de berekeningen kunnen uitvoeren volgens één of meer geciteerde standaardmethodes en die onmiddellijk een geluidskaat produceren bovenop een gedigitaliseerde kaart van de beschouwde site. Een voorbeeld van een dergelijke geluidskaat wordt gegeven in Figuur 45.



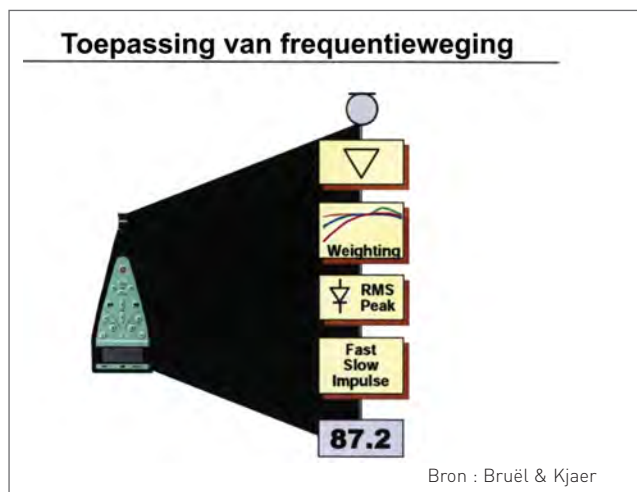
Figuur 45 : Voorbeeld van van een dergelijke geluidskaat

¹⁶ niet enkel voor toepassing op wegverkeer

¹⁷ kaart met iso-dB(A)-lijnen

1.16. Meten van geluidsdrukniveaus

In plaats van berekend het, kan het geluidsdrukniveau op de immissieplaats ook worden gemeten, wat meer zekerheid biedt omtrent de correctheid van de bekomen waarde voor het geluidsdrukniveau. Dit op voorwaarde dat de metingen en de verwerking van de meetgegevens met accurate apparatuur en volgens de regels van de kunst werden uitgevoerd. Geluid wordt gemeten met een sonometer die volgende basisonderdelen bevat (Figuur 46): de microfoon, de voorversterker, de frequentieweging, tijdsweging en een uitlezing.



Figuur 46 : De schematische opbouw van een sonometer: onder: de microfoon, de voorversterker, de frequentieweging, de tijdsweging en de uitlezing.

De geluidsgolven vallen op een membraan dat zich in de microfoon bevindt (achter een beschermend roostertje) en brengen dit aan het trillen (analoog aan de trilling van het trommelvlies bij het menselijk gehoor). Het membraan is de helft van een condensator waarvan de capaciteit wisselt door de trillingen en een wisselstroompje genereert waarvan de grootte evenredig is met de grootte van de geluidsdruk van de invallende geluidsgolf. Dit minuscule stroompje wordt versterkt door de voorversterker en gaat vervolgens door een elektrische filter waardoor de gewenste frequentieweging wordt in rekening gebracht. Het signaal wordt vervolgens gekwadeerd en geïntegreerd met de ingestelde tijdsconstante (F, S,...), waarna het signaal analoog of digitaal wordt uitgelezen.

Door het inschakelen van een frequentiefilter (octaaf-, tertsband of een andere) kan men het geluidsdrukniveau verkrijgen van de betreffende band. Wenst men het geluidsdrukniveau van een andere band te kennen, dan moet men een andere filter inschakelen. Dit noemt men **seriële** frequentieanalyse. Moderne sonometers echter leiden het signaal door een reeks parallel opgestelde, aaneensluitende filters zodat tegelijkertijd de geluidsdrukniveaus in de spectrale banden kan worden afgelezen. Dit is **parallele** frequentieanalyse.

Sonometers moeten voor gebruik worden geijkt met een daartoe bestemde ijkbron die bij één (of enkele) frequenties (meestal 1000 Hz) een zuivere toon voortbrengt met een welbepaald nominaal geluidsdrukniveau (bijvoorbeeld 94 dB).

De nauwkeurigheid van een sonometer is een bepalende factor voor de prijs ervan. Er bestaan Belgische en Europese normen^{viii} die de sonometers indelen in klassen naargelang hun nauwkeurigheid.

In de praktijk is het meer dan aangewezen om de resultaten van een berekening (bijvoorbeeld een geluidskaart) in een aantal punten te controleren door in een aantal geselecteerde punten metingen op het terrein te gaan uitvoeren.

1.17. Referenties

Brüel&Kjaer, 'Bruit de l'environnement' (2000)

- i NBN ISO 226 (1992)
- ii ISO 532A
- iii ISO 532B
- iv Zwicker E., Fastl. H., "Psychoacoustics Facts and Models", 2^{de} uitgave, Springer, Berlijn (1999)
- v F.J. Meister en W. Ruhrberg, "Der Einfluss von Grünanlagen auf die Ausbreitung von Geräuschen", Lärmbekämpfung (1959) 3, p. 5-11 en F.J. Meister en W. Ruhrberg, "Die Dämmung von Verkehrsgeräuschen durch Grünanlagen", VDI-Zeitschrift (1959) 101, p. 527-535
- vi "Conception et réalisation des écrans acoustiques, 2 catalogue de solutions de base", Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, Secrétariat d'Etat Chargé des Transports, Direction des Routes, april 1985
- vii idem als ii en iii
- viii Voor niet-integrerende sonometers: NBN EN 60651:1996, gewijzigd door NBN EN 60651/A1:2001. Voor integrerende, middelende sonometers: NBN EN 60804:2001