

INHOUDSTAFEL

4.1.	Inleiding	3
4.2.	Bronnen van lawaai bij voertuigen	3
4.2.1.	Motor	4
4.2.2.	Luchtinlaat, uitlaat en uitlaatsysteem	6
4.2.3.	Versnellingsbak en transmissie	6
4.2.4.	Koelsysteem	6
4.2.5.	Koetswerk	6
4.2.6.	Banden (band - wegdekinteractie)	6
4.3.	Voortplanting van verkeerslawaai in vrij-veldcondities	12
4.3.1.	L_{Aeq} van de passage van één voertuig	12
4.3.2.	L_{Aeq} van een stroom voertuigen	13
4.3.3.	L_{Aeq} in de buurt van een verkeersweg	14
4.4.	Voortplanting van verkeerslawaai in andere dan de vrij-veldsituatie	16
4.4.1.	Straat met U-profiel	16
4.4.2.	Straten met een L-profiel en alle andere gevallen	17
4.5.	Referentie	19



4.1. Inleiding

In het **eerste deel** van deze fiche worden de relevante bronnen en mechanismen die lawaai veroorzaken of versterken op het niveau van het individuele voertuig besproken. Diverse onderdelen (motor, uitlaat, banden, ...) van een voertuig in het verkeer dragen in mindere of meerdere mate bij tot het globale vermogen aan lawaai dat door het voertuig wordt uitgestraald. Daarnaast zijn er een aantal **effecten** (b.v. het zgn. "hoorn"-effect tussen het loopvlak van de band en het wegdek, het plakken-en-loslaten van het rubber van de band aan het wegdek, het "pomp" effect...) die de lawaaiproductie in ongunstige zin kunnen beïnvloeden. De **rijomstandigheden** (snelheid, acceleratie of constante snelheid, gekozen versnelling,...) spelen eveneens een rol bij de lawaaiproductie van een voertuig.

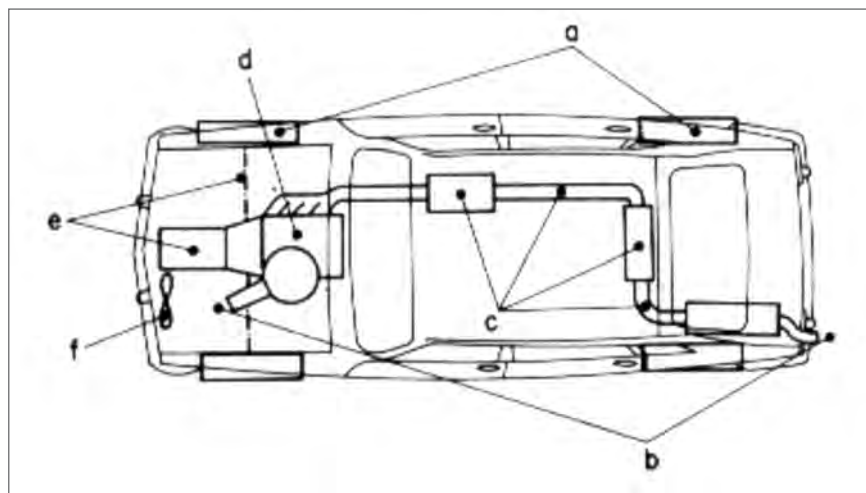
In het **tweede deel** wordt aangegeven hoe de door de individuele voertuigen uitgestraalde vermogens bijdragen tot het in de omgeving waargenomen verkeerslawaai. Er zal worden aangegeven hoe het equivalent geluidsdrukniveau van een stroom voertuigen op een verkeersweg kan worden berekend en dit voor een waarnemer langs de weg. Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee grote gevallen: de vrij-veldsituatie en de situatie waarin niet wordt voldaan aan de vrij-veldsituatie (reflectie van het geluid door gebouwen e.d.).

In het eerste geval wordt de propagatie van het verkeerslawaai niet beïnvloed door objecten langs de weg. Het zal blijken dat heel wat parameters de productie en voortplanting van lawaai van een verkeersstroom beïnvloeden: het rijregime (continu, pulserend, accelererend, vertragend), de samenstelling van het verkeer, de helling van de weg, de al in fiche 1 besproken weersomstandigheden enz.

In de paragraaf waarin de niet-vrij-veldsituatie wordt besproken, wordt aangegeven hoe het geluidsdrukniveau wordt beïnvloed voor een waarnemer die zich tussen de verkeersweg en de reflecterende objecten bevindt. Voor het berekenen van het geluidsdrukniveau waarbij zich een object (gebouw, scherm,...) bevindt tussen de waarnemer en de verkeersweg wordt verwezen naar fiches 10 en 11.

4.2. Bronnen van lawaai bij voertuigen

Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van de diverse onderdelen van een auto die een bijdrage kunnen leveren tot het door het voertuig geproduceerde lawaai: de banden (a), de luchtinlaat en de uitlaat (b), het uitlaatsysteem (c), het motorblok (d), versnellingsbak en de transmissie (e) en het koelingssysteem (ventilator) (f). De relatieve bijdrage van deze bronnen wordt in sterke mate beïnvloed door het type voertuig (auto, moto, vrachtwagen), de mechanische toestand van het voertuig (b.v. nieuwe of kapotte uitlaat) en door de rijomstandigheden. Tabel 1 geeft een aantal benaderende cijferwaarden voor de procentuele bijdragen van de vermelde bronnen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen auto's en vrachtauto's en tussen het rijden in de stad (lage snelheden, veelvuldig versnellen en vertragen) en het rijden op grotere wegen (hogere en meer constante snelheden).



Figuur 1: Potentiële lawaaibronnen bij een personenwagen: banden (a), in- en uitlaat (b), uitlaatsysteem (c), motor (d), versnellingsbak en transmissie (e) en ventilatiesysteem (f)

Geluidsbron	Auto's		Vrachtwagens	
	Stad	Grote weg	Stad	Grote weg
Luchtinlaat, uitlaat	15 tot 30	20 tot 70	15 tot 60	40 tot 80
Uitlaatsysteem	15 tot 30			
Motor	20 tot 30			
Versnellingsbak en transmissie	5 tot 30		30 tot 80	
Koelsysteem	-		10 tot 50	
Banden	5 tot 10	30 tot 80	5	20 tot 60
Koetswerk (aërodynamische geluiden)	-	-	-	-

Tabel 1: Procentuele bijdrage tot het totale uitgestraalde vermogen van diverse onderdelen van voertuigen

In het vervolg van deze paragraaf worden de diverse lawaaibronnen zoals opgesomd in Tabel 1 in detail besproken.

4.2.1. Motor

De explosies in de cilinders brengen diverse onderdelen van de motor aan het trillen, waardoor deze geluid uitstralen. In het bijzonder de behuizing van de krukas en het oliekarter stralen een groot deel van het motorgeluid af. Het geproduceerde geluidsvermogen van een motor is afhankelijk van zijn toerental (toeren per minuut), van zijn belasting en (in geringere mate) van zijn cilinderinhoud.

Bij **dieselmotoren** speelt de belasting weinig rol, behalve bij de types met indirecte injectie. Een lichte belasting van dit laatste type kan leiden tot een verminderd geluidsvermogen van 5 dB. Het geluidsdruk-niveau van dieselmotoren¹ loopt veel minder snel op bij stijgend toerental dan bij **benzinemotoren**². Bij deze laatste veroorzaakt een belasting van de motor ook al snel een verhoging van het geluidsdruk-niveau met 5 tot 6 dB(A). Drukgevoede dieselmotoren draaien sneller dan atmosferische diesels en nemen qua geluidsproductie een intermediaire plaats in tussen de "gewone" dieselmotoren en de benzinemotoren. Lamure stelt volgende uitdrukkingen voor het geluidsdruk-niveau van de drie vernoemde types verbrandingsmotoren:

$$L_{pA, \text{ dieselmotoren}} = 30 \log N + 17,5 \log C + X \quad (\text{vergelijking 1})$$

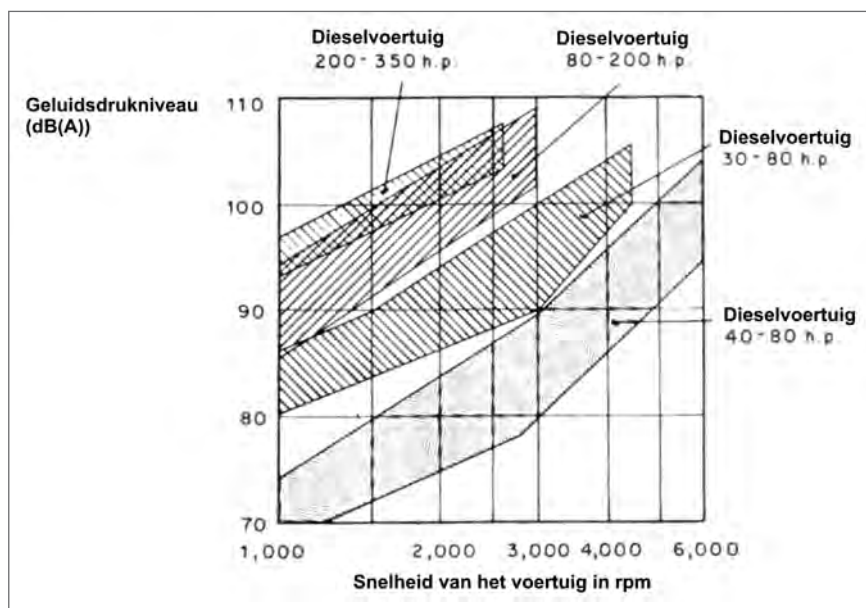
$$L_{pA, \text{ turbodieselmotoren}} = 40 \log N + 17,5 \log C + Y \quad (\text{vergelijking 2})$$

$$L_{pA, \text{ benzinemotoren}} = 50 \log N + 17,5 \log C + Z \quad (\text{vergelijking 3})$$

met N het toerental in toeren/minuut, C de cilinderinhoud en X, Y en Z constanten. Een grafische voorstelling wordt gegeven in Figuur 2.

¹ Gemeten in vrij-veldcondities en op een bepaalde afstand van de geluidsbron

² of motoren op LPG

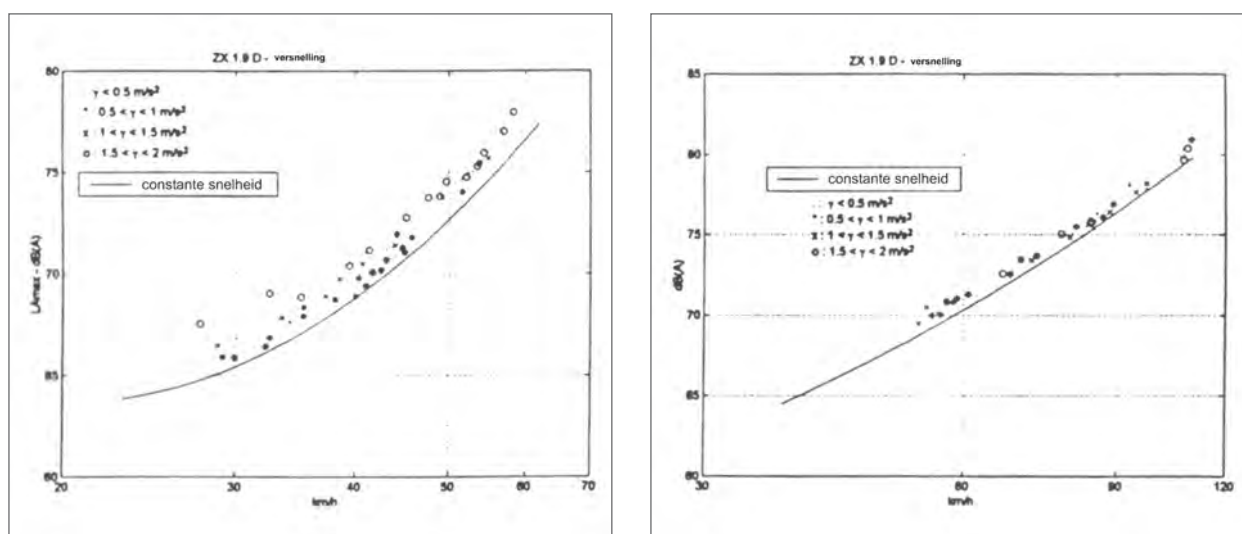


Figuur 2: Het geluidsdruk niveau van motoren in functie van het toerental voor diverse types motoren

Men merkt op dat voor elk van de drie types minder geluid wordt geproduceerd door een motor met een grotere cilinderinhoud dan één met een kleinere cilinderinhoud. Een motor met een grotere cilinderinhoud levert immers eenzelfde mechanisch vermogen bij een lager toerental.

Bij een voertuig dat **versnelt**, kan een supplementaire verhoging van het geluidsdruk niveau optreden in vergelijking met een voertuig dat tegen constante snelheid rijdt. Uit onderzoek door Lelongⁱⁱⁱ blijkt dit effect klein bij hoge snelheid van het voertuig (dus hoge "versnelling"³: 4 of 5) omdat bij hogere voertuigsnelheden het bandengeluid domineert. Een significante verhoging van de lawaaiproductie doet zich voor bij lage voertuigsnelheden (dus bij lage "versnellingen") en bij versnellingen van meer dan 1 m/s^2 . Onder deze omstandigheden werd met een voertuig met een atmosferische diesel⁴ verhogingen van het geluidsdruk niveau opgetekend tot 3 dB(A) en met een voertuig met drukgevoede diesel⁵ tot 5 dB(A) (Figuur 3). Bij een test met een bestelwagen⁶ liep de verhoging op tot 7 dB(A).

Uit studies^{iv} die de evolutie van de lawaaiproductie van nieuwe voertuigen in functie van de tijd tot voorwerp hadden, blijkt dat dieselmotoren in auto's de laatste decennia aanzienlijk stiller zijn geworden: een reductie van 5 tot 8 dB(A) in de periode van 1975 tot 1990 en een vermindering van 3,5 tot 6 dB(A) sinds het begin van de jaren '90. Hierbij dient echter opgemerkt dat er ook melding wordt gemaakt van een studie die een veel lagere reductie vooropstelt voor dit type motoren. Benzinemotoren zouden echter nauwelijks stiller of zelfs wat lawaaiër zijn geworden. Dit zou te maken hebben met de evolutie naar lichtere (aluminium), sneldraaiende motoren met een kleine cilinderinhoud met een hoog mechanisch vermogen.



Figuur 3 : Weerslag van de acceleratie op de geluidsemisatie van een auto in 2e versnelling (links) en in 4e versnelling (rechts)

³ "versnelling" in de betekenis van transmissieverhouding, niet te verwarren met de afgeleide naar de tijd van de snelheid. In de tekst wordt, om verwarring te vermijden, de eerstgenoemde betekenis van versnelling steeds aangegeven tussen "

⁴ Citroën ZX 1.9D

⁵ Ford Mondeo 1.9 TD "

⁶ Ford Transit, motortype niet vermeld

4.2.2. Luchtinlaat, uitlaat en uitlaatsysteem

Aan de vermindering van het lawaai veroorzaakt door de uitlaat werd vooral in de jaren '70-'80 aandacht besteed, met een significante reductie van bijvoorbeeld het lawaai geproduceerd door uitlaten van vrachtwagens tot gevolg (zie ook ⁱⁱⁱ). Het grootste probleem dat men hierbij ondervindt is het dempen van laag-frequent geluid omdat hiervoor dempers met een aanzienlijke omvang nodig zijn.

4.2.3. Versnellingsbak en transmissie

Hoewel volgens Lamure bij sommige auto's de versnellingsbak en transmissie verantwoordelijk zouden zijn voor een aanzienlijk deel van de lawaaiproduktie, zijn hierover weinig gegevens gekend. Dit lawaai kan ook gedeeltelijk worden veroorzaakt door trillingsoverdracht van het motorblok.

4.2.4. Koelsysteem

De sneldraaiende ventilator van het koelsysteem kan bij vrachtwagens tot 50% van het geproduceerde geluidsvermogen voor zijn rekening nemen. Deze situatie doet zich voornamelijk voor bij warm weer en traag tot stapvoets verkeer (filevorming, stadscentra, ...).

4.2.5. Koetswerk

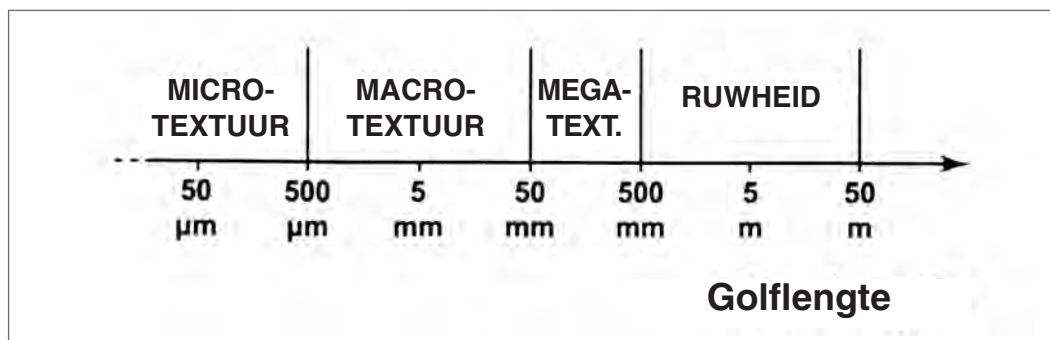
Aërodynamische geluiden afkomstig van luchturbulenties rond het koetswerk blijken pas belangrijk bij extreem hoge snelheden (200 tot 300 km/uur), wat blijkt uit studies van enkele tientallen jaren geleden^v. Aangezien de aërodynamische kwaliteiten van de autokoetswerken sindsdien door de fabrikanten daarenboven steeds werden verbeterd met het oog op het verminderen van de brandstofconsumptie, kan deze lawaai-bron in deze context verder zeker buiten beschouwing worden gelaten.

Vooral bij vrachtwagens met b.v. een kيبak kan het koetswerk lawaai afstralen doordat het voertuig aan het trillen wordt gebracht door oneffenheden in de weg. Dit fenomeen doet zich voor bij oneffenheden met afmetingen tussen de 0,5 m en 50 m (de zogenaamde oneffenheid, zie verder).

4.2.6. Banden (band - wegdekinteractie)

De tot nu toe besproken lawaai-bronnen zijn dominant bij **lagere snelheden**⁷. Bij **hogere snelheden** overheerst het geluid van de banden. Naast de karakteristieken van de banden van het voertuig zijn ook de **karakteristieken van het wegdek**, en dan vooral de **textuur** van het wegdek, bepalend voor dit bandengeluid.

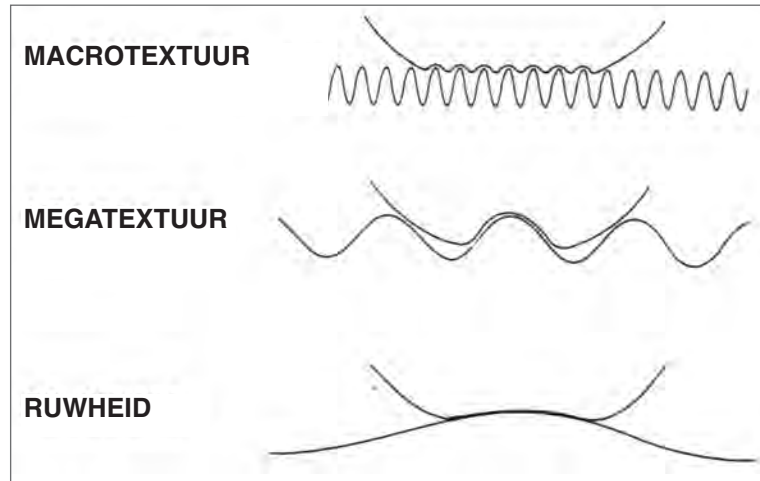
Onder de **textuur** van het wegdek wordt verstaan de oneffenheden ervan, waarvan de horizontale afmetingen kunnen gaan van fracties van mm tot 0,5 m. In het algemeen worden oneffenheden ingedeeld in vier categorieën naargelang hun horizontale afmetingen, ook "golflengte" genoemd (Figuur 4).



Figuur 4: De diverse klassen van textuur van een wegdek in functie van hun golflengte

⁷ bij auto's tot ca. 50 km/uur en bij vrachtwagens tot ca. 80 km/uur

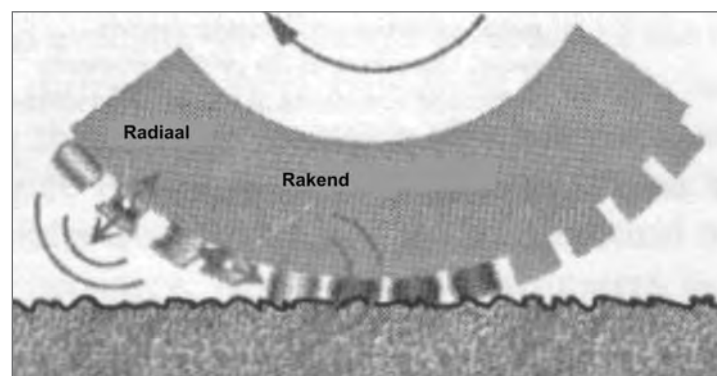
Zeer kleine oneffenheden, kleiner dan 0,5 mm, behoren tot de **microtextuur** en oneffenheden tussen 0,5 en 50 mm worden aangeduid met **macrotextuur**. **Megatextuur** omvatten dan weer oneffenheden van het wegoppervlak met afmetingen tussen de 5 cm (ongeveer de afmeting van de afdruk van de band op het wegdek) en 50 cm. Met de term **oneffenheid** duidt men de oneffenheden met golflengten tussen de 50 cm en de 50 m aan. De relatie tussen de grootte van de band en de verschillende klassen van textuur wordt schematisch weergegeven in Figuur 5. In het kader van de bespreking van het bandenlawaai van voertuigen is vooral mega- en macrotextuur van belang.



Figuur 5: De relatie tussen de grootte van een autoband en de verschillende vormen van textuur

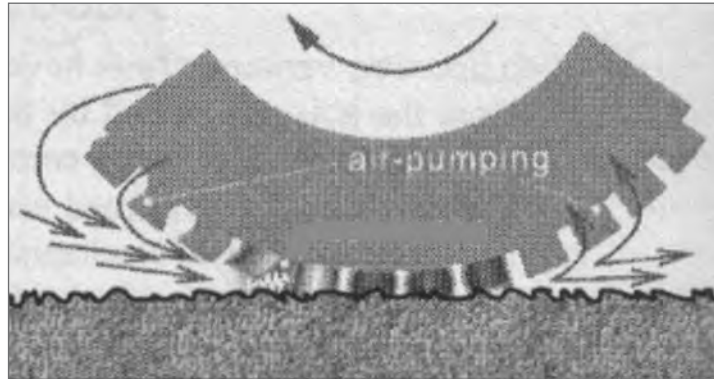
De mechanismen waardoor het bandengeluid ontstaat, de effecten die het versterken en de relevante parameters zijn vrij goed gekend. De mechanismen zijn de volgende:

1. de voornaamste bijdrage van het bandengeluid vindt zijn oorsprong in het **trillen van de band**. Een band wordt vooral aan het trillen gebracht door megatextuur van het wegdek. Hoe meer megatextuur, des te meer trillingen en daaruit voortvloeiend lawaai. Bij het rollen van de band over deze oneffenheden ondervindt het loopvlak als het ware een reeks stoten, alsof er iemand in hoog tempo met een hamer op de band slaat. De trillingen doen zich voor in het loopvlak van de band, maar planten zich ook voort naar de zijwanden, waardoor ook in belangrijke mate geluid wordt afgestraald door het onderste kwart van de band. Het betreft vooral geluid met frequentie lager dan 1000 Hz, maar recent onderzoek toont aan dat de bijdragen bij hogere frequenties dikwijls belangrijker zijn dan tot voor kort werd aangenomen^{vi}.
2. het proces van **plakken aan en slippen** over het wegdek van het rubber van het loopvlak. Dit mechanisme veroorzaakt tangentiële krachten op het loopvlak van de band en brengt de blokjes van het bandenprofiel aan het trillen (Figuur 6) en dit zowel in tangentiële als normale richting, waardoor het karakteristieke hoogfrequente "krijsen" van de banden ontstaat. Het fenomeen kan ook bij lage snelheden heel sterk worden waargenomen wanneer men met de auto over een gladde, gepolijste betonvloer rijdt zoals men die o.a. aantreft in sommige ondergrondse parkeergarages. Het fenomeen doet zich dan vooral voor wanneer er wordt versneld, geremd of een bocht wordt genomen.



Figuur 6: Het "plakken aan en slippen over" het wegdek van het rubber patroon van de band veroorzaakt tangentiële en radiale trillingen, met het karakteristieke "krijsen" van de band tot gevolg

3. verwant aan het plakken-en-slippen is het **plakken-en-loslaten**^{vii} dat zich manifesteert bij een verhoogde adhesie tussen band en wegdek, bijvoorbeeld wanneer met winterbanden met zacht rubber in de zomer wordt gereden op een vlakke weg. Een verhoogde tangentiële excitatie van het patroon op het loopvlak is het gevolg.
4. het **pompen van lucht** ("air pumping"): door het lopen van een band over een oppervlak wordt voortdurend lucht samengedrukt in de caviteiten van de band en het wegdek en onmiddellijk weer vrijgelaten (Figuur 7).

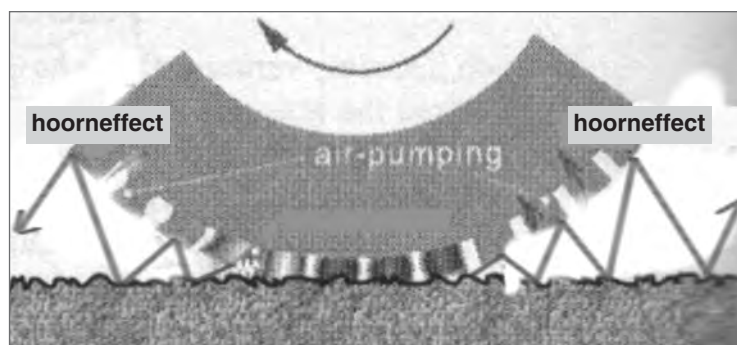


Figuur 7: In het patroon van het loopvlak van de band wordt lucht samengedrukt die vervolgens weer ontsnapt. Dit noemt men het "pompen van lucht".

De ontsnappende lucht veroorzaakt lawaai met frequenties die zich typisch boven de 1000 Hz situeren. Het geluid kan versterkt worden door resonanties van het geluid in de holtes van het patroon van de band. Het pompen van lucht levert doorgaans een grote bijdrage aan het totale geluid veroorzaakt door de banden. Het effect is maximaal bij zeer effen types wegdekken, omdat in dit geval het insluiten van lucht zeer efficiënt gebeurt. Bij oppervlakken met een sterke macrottextuur⁸ of bij poreuze oppervlakken is het effect echter minimaal: in plaats van samengedrukt te worden heeft de lucht in dit geval de mogelijkheid om verticaal te ontsnappen door de poriën van het wegdek. Bij wegdekken met een uitgesproken macrottextuur gebeurt de evacuatie van de lucht eerder horizontaal. Banden worden tegenwoordig ook ontworpen om de opsluiting van lucht in tijdelijk afgesloten ruimtes tussen loopvlak en wegdek zoveel mogelijk te vermijden en aldus het pompen van lucht te voorkomen^{viii}.

Door de mechanismen plakken-en-slippen, plakken-en-loslaten en het pompen van lucht ontstaat typisch geluid met frequenties tussen de 1000 en 1500 Hz.

5. Het lawaai dat door deze vier ontstaansmechanismen wordt veroorzaakt kan nog worden versterkt door het zogenaamde **hoorneffect**. Tussen het loopvlak van de band en het wegdek bevindt zich een wigvormige ruimte. Geluid dat in de contactzone band-wegdek ontstaat, kan verschillende keren gereflecteerd worden tussen loopvlak en wegdek en aldus worden versterkt zoals stemgeluid wordt versterkt door de hoorn van een megafoon (Figuur 8). Omdat het loopvlak van de band een lage absorptiecoëfficiënt heeft, is het hoorneffect belangrijk als ook het wegdekoppervlak weinig akoestisch absorberend is. Wanneer men het wegdek echter geluidsabsorberend maakt in het relevante frequentiegebied door de toepassing van fluisterasfalt, kan men het hoorneffect grotendeels neutraliseren.

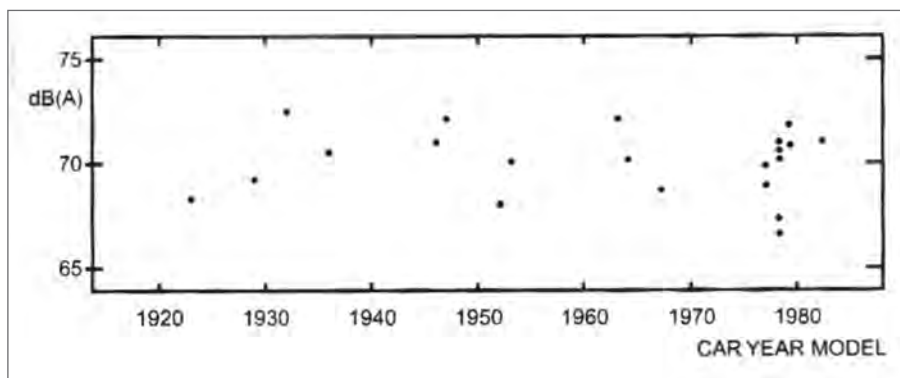


Figuur 8: Het geluid dat ontstaat in de buurt van het loopvlak van de band kan worden versterkt door meervoudige reflecties tussen het loopvlak van de band en het wegdek

⁸ onoffenheden van het wegdek met afmetingen tussen 50 mm en 0,5 m

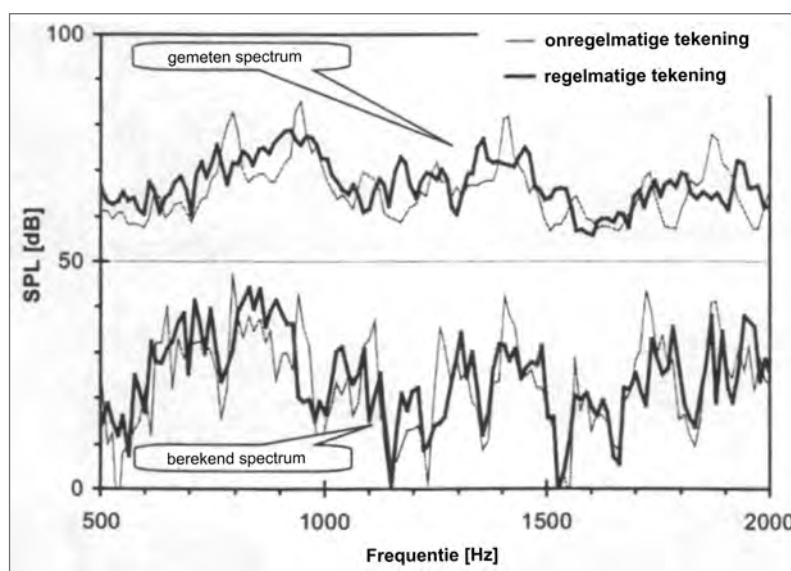
Bij een band-wegdekinteractie spelen zowel de karakteristieken van de band als van het wegdek een rol. De bepalende parameters voor de **band** zijn de volgende:

1. de **stijfheid** van de band: hoe stijver de band, des te hoger de lawaaiproductie door trillingen. Een voldoende stijfheid van de band is echter noodzakelijk voor andere kwaliteiten van een type band: een goede wegligging, een goede bestuurbaarheid, laag brandstofgebruik e.d.. De bandenfabrikanten moeten dus steeds een compromis zoeken. Hierdoor zijn de bandenmodellen in de praktijk sinds de jaren '20 (!) nauwelijks stiller geworden (Figuur 9^x)



Figuur 9: Bandentypes ontworpen sinds 1920 zijn nauwelijks stiller geworden

2. de geometrie van de band en in het bijzonder zijn breedte blijkt een belangrijke factor. Phillips^x toonde aan dat per cm dat de breedte van een band toeneemt, het geproduceerde geluidsdrumniveau⁹ 0,3 dB(A) toeneemt. Gelet op zijn vaststelling dat er op nieuwe automodellen steeds bredere banden worden gemonteerd (gemiddelde toename van 2,08 cm/10 jaar volgens dezelfde auteur) is dit een niet onbelangrijk gegeven. Een ander aspect van de band is het patroon dat **onregelmatig** moet zijn. Slecht ontworpen banden met een regelmatig patroon geven aanleiding tot tonale componenten in het spectrum van het bandenlawaai (Figuur 10), waardoor het lawaai voor de personen die eraan bloot worden gesteld hinderlijker kan zijn (zie fiche 2).



Figuur 10: Het spectrum van een band met een regelmatig (dikke lijn) en een onregelmatig patroon (lichte lijn). Men bemerkt bij de band met het regelmatige spectrum tonale componenten in het spectrum (bij 800, 1000, 1400 en 1900 Hz) die het lawaai hinderlijker maken dan het geluid van een band met een willekeurig patroon.

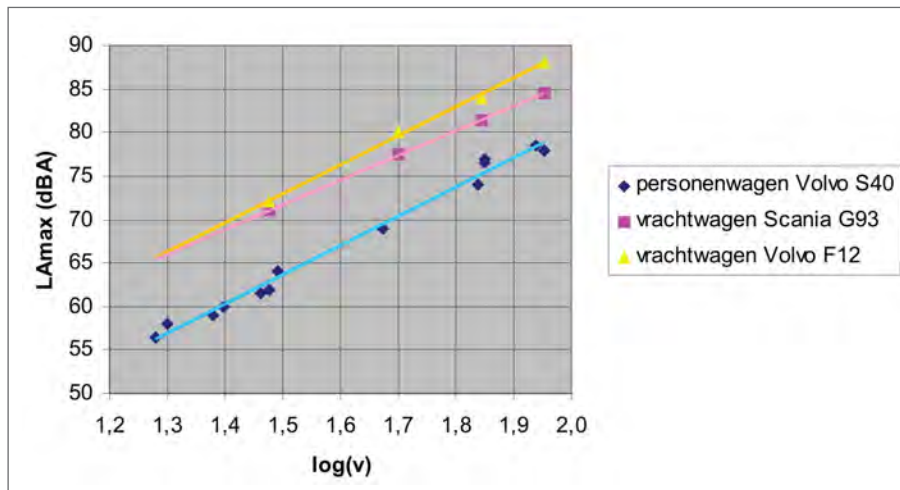
3. de **bandendruk** en de **belasting van de band** beïnvloeden de stijfheid van de band en dus ook het geproduceerde geluidsdrumniveau^{iv}. Een nog belangrijker parameter is echter de **rotatiesnelheid** van de band, die onmiddellijk samenhangt met **voertuigsnelheid** v.

⁹ gemeten als L_{Amax} op 7,5 m van het midden van de rijstrook volgens de zogenaamde "Statistical Pass-by" (SPB)-methode (zie ISO 11819 (1997))

Het geluidsdrukniveau, voortgebracht door de banden van een bepaald voertuig, is recht evenredig met de logaritme van de voertuigsnelheid:

$$L_{pA, \text{banden}} = a + b \cdot \log(v) \quad (\text{vergelijking 4})$$

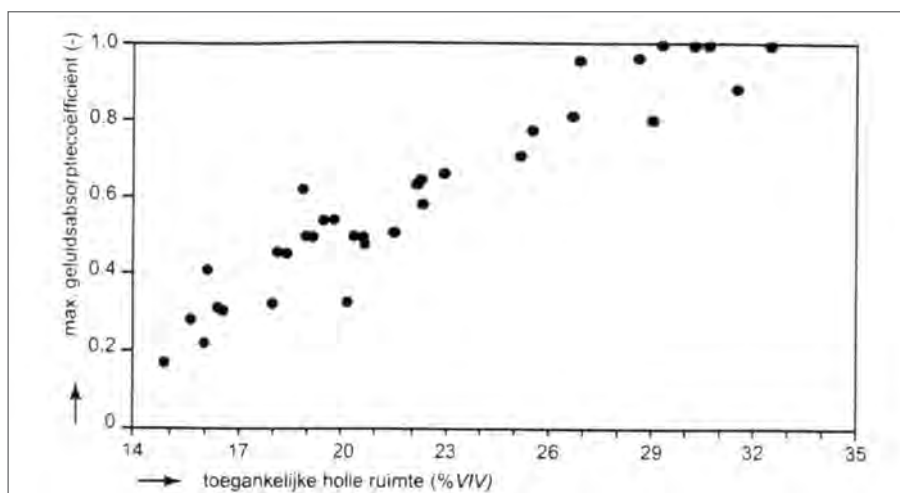
waarbij de constanten a en b afhankelijk zijn van het voertuig en zijn banden én van het type wegdek. In Figuur 11 worden de resultaten gegeven van metingen van het maximumgeluidsdrukniveau L_{Amax} gemeten op 7,5 m van het midden van de rijbaan bij de passage van een voertuig met de motor uitgeschakeld. Op die manier wordt enkel het bandengeluid gemeten. Er werd gemeten bij verschillende snelheden en de proef werd uitgevoerd met één type personenwagen^{xi} en twee types vrachtwagen op **dicht asfalt beton (DAB, zie fiche 7)**. Men merkt een lineair verband op tussen L_{Amax} en $\log(v)$. De helling van de rechte b en de offset a zijn voor de drie voertuigen verschillend.



Figuur 11: Het maximale geluidsdrukniveau van drie types voertuigen die passeren op 7,5 m met uitgeschakelde motor en bij diverse voertuigsnelheden. Men bemerkt een duidelijk lineair verband tussen L_{Amax} en de logaritme van de snelheid.

De parameters van het **wegdek** die de lawaaierigheid ervan bepalen zijn de volgende:

1. de **textuur** van het wegdek. Zoals reeds gesteld is megatextuur in belangrijke mate verantwoordelijk voor het aan het trillen brengen van de band en dient dus vermeden. Macrottextuur gaat echter het pompen van lucht tegen en is dan weer gunstig vanuit akoestisch oogpunt.
2. het **percentage holle ruimtes** in het wegdek, de **porositeit** van het wegdek, is een factor die in lineaire relatie staat tot de absorptiecoëfficiënt (Figuur 12). Een sterke akoestische absorptie vermindert het supra besproken hoorneffect en het pompen van lucht. Anderzijds dient opgemerkt dat een te groot percentage aan holle ruimtes in een wegdek de stabiliteit en dus ook de duurzaamheid ervan negatief beïnvloedt.



Figuur 12: Een hoger percentage aan toegankelijke holle ruimte zorgt voor een hogere absorptiecoëfficiënt en dus een verlaging van het hoorneffect.

3. een andere factor van het wegdek die de lawaaiproductie kan beïnvloeden is water op het wegdek. Het betreft het karakteristieke, hoogfrequente siggeluid dat men waarneemt bij nat weer. De aanwezigheid van een waterfilm op het wegdek kan een significante verhoging van het geproduceerde geluid veroorzaken en dit ten gevolge van de druppeltjes die gevormd worden en met grote snelheid weggeslingerd. Uit onderzoek blijkt dat de verhoging van het geluidsdrumniveau zich voornamelijk situeert boven de 1000 Hz^{xii} en dat de dikte van de waterfilm weinig rol speelt, behalve wanneer hij volledig wordt geëvacueerd door middel van een drainerend wegdek. De lawaaitoename blijkt hoger bij lage snelheden dan bij hoge.^{xiii}
4. de **stijfheid** van het wegoppervlak zou in tweede orde een rol spelen: hoe hoger de stijfheid van het oppervlak, des te lawaaiëriger het is. Echt spectaculaire winst zou kunnen worden geboekt wanneer de elasticiteit van het wegdekoppervlak van dezelfde grootteorde is als de elasticiteit van het bandenrubber. Sinds geruime tijd zijn onderzoeksprogramma's hierover aan de gang, voornamelijk in Zweden, Noorwegen en Japan^{xiv}. Hoewel geluidsmetingen voor zogenaamde "poroelastische"¹⁰ oppervlakken de reële mogelijkheden op het gebied van vermindering van het verkeerslawaaï al hebben bewezen, zijn er nog een aantal problemen die moeten overwonnen worden (waaronder duurzaamheid, brandveiligheid, stroefheid, ...) vóór dit type wegdek in de praktijk kan worden toegepast.

Voor een verdere, omstandige bespreking van de diverse types wegdekken en hun eigenschappen wordt verwezen naar fiche 7.

Wanneer een groot aantal voertuigen wordt bemonsterd die zich op één type wegdek bij één welbepaalde snelheid voortbewegen wordt een zekere spreiding in de SPB-niveaus¹¹ gemeten door de verschillen in de diverse lawaaibronnen aan het voertuig die hierboven werden besproken. Men kan echter een gemiddelde waarde berekenen en wanneer men deze procedure herhaalt vindt men een lineair verband tussen de logaritme van de voertuigsnelheid en het gemiddelde L_{Amax} gemeten volgens de SPB-methode. In de Nederlandse Standaard Rekenmethode^{xv} stelt men dan ook volgend verband voorop tussen het SPB-niveau en $\log(v)$ en dit op dicht asfaltbeton (DAB) dat men als referentiewegdek neemt:

$$L_{Amax, \text{ gemiddeld op DAB}} = a + b \cdot \log(v/v_0) \quad (\text{vergelijking 5})$$

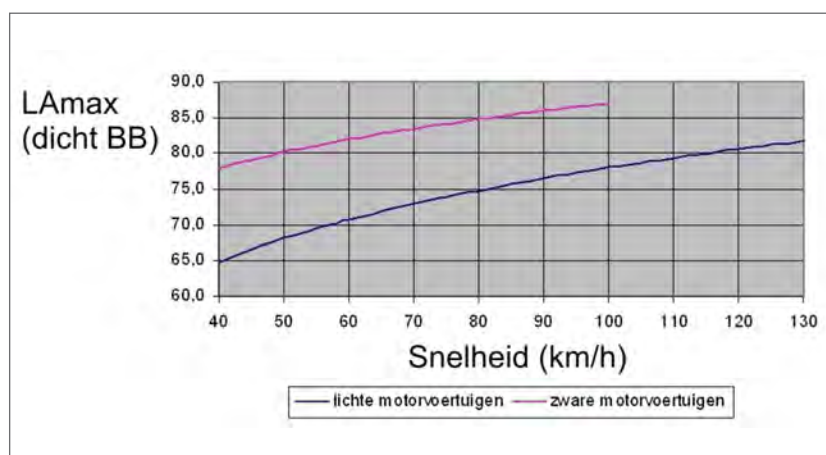
De constanten a en b zijn voor lichte voertuigen:

$$a = 74,8 ; b = 33,0 \text{ en } v_0 = 80 \text{ km/uur een referentiesnelheid}$$

en voor zware voertuigen :

$$a = 83,5 ; b = 22,8 \text{ en } v_0 = 70 \text{ km/uur een referentiesnelheid}$$

Dit verband tussen L_{Amax} en de snelheid v wordt grafisch weergegeven in Figuur 13.



Figuur 13: Het totale voertuiggeluid voor auto's en voor vrachtwagens in functie van de voertuigsnelheid volgens de Nederlandse rekenmethode SRM.

¹⁰ poreus + elastisch

¹¹ internationaal genormeerde meetmethode om de akoestische kwaliteiten van een gegeven wegdek te onderzoeken. Men meet hiertoe op 7,5 m van de as van het rijvak het maximumgeluidsdrumniveau van toevallig passerende voertuigen. Men bemonstert aldus minstens 100 auto's en minstens 80 vrachtwagens (waarvan minstens 30 tweeassige en minstens 30 meerassige). De akoestische kwaliteit van het beschouwde wegdek wordt aangegeven met de zgn. SPB-index, die wordt berekend aan de hand van de gemiddelde maximale geluidsdrumniveaus. Zie verder International Standard ISO 11819.

4.3. Voortplanting van verkeerslawaai in vrij-veldcondities

In deze paragraaf wordt eerst aangetoond hoe het equivalent geluidsdrukkniveau kan worden berekend bij een waarnemer die zich op afstand d bevindt van een weg waarop één voertuig passeert of waarop een stroom voertuigen rijdt, in functie van het uitgestraalde akoestische vermogen van de voertuigen. Vervolgens wordt een praktisch bruikbare formule opgesteld waarmee het equivalent geluidsdrukkniveau kan worden voorspeld op een gegeven afstand van een verkeersweg en dit voor het geval zonder een significante bijdrage van gereflecteerd verkeerslawaai in het waarnemingspunt (vrij-veldsituatie). De in de vorige paragrafen besproken factoren die het ontstaan en de voortplanting van verkeerslawaai beïnvloeden, worden in rekening gebracht. In de volgende paragraaf wordt het geval belicht waarbij de reflecties van het verkeerslawaai niet kunnen verwaarloosd worden (geen vrij-veldsituatie). De gegeven formules bieden het voordeel dat het geluidsdrukkniveau kan worden voorspeld met een relatief eenvoudige berekening die kan worden uitgevoerd op een zakrekenmachine. Het reële equivalente geluidsdrukkniveau kan er wel maar **in eerste orde mee worden benaderd**, en dit door de veelheid en complexiteit van de beïnvloedende factoren. Een meer nauwkeurige benadering kan worden bekomen door een meer gesofisticeerde rekenmethode toe te passen (zoals de Nederlandse SRM II of de andere rekenmethodes zoals opgesomd in fiche 1). Hiervoor is gespecialiseerde software voor de PC op de markt.

Tot nu toe werd de lawaaiproductie van (delen van) individuele voertuigen besproken in termen van het A-gewogen geluidsvermogniveau L_{PA} , of het A-gewogen maximum geluidsdrukkniveau L_{Amax} , gemeten bij passage op 7,5 m volgens de betreffende ISO-norm¹². Deze twee grootheden staan op een eenvoudige manier met elkaar in relatie wanneer men een auto op deze afstand als een puntbron beschouwt¹³ en de bodem rond de auto als perfect reflecterend:

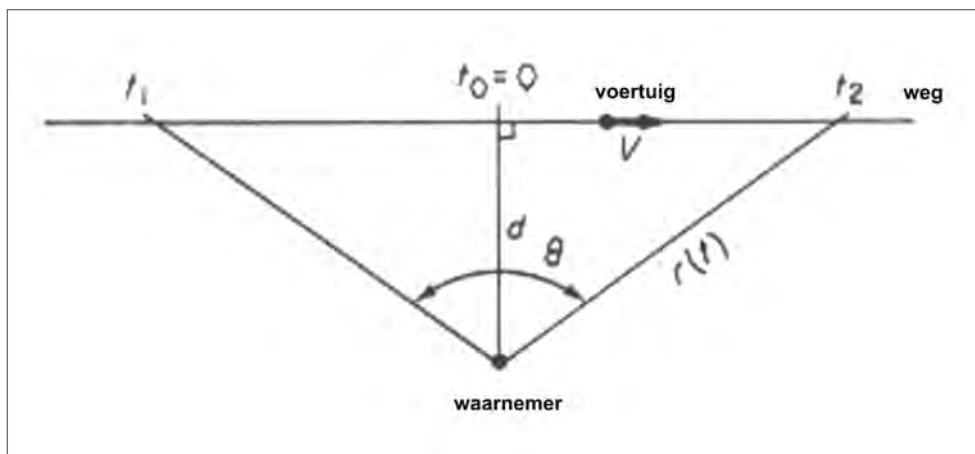
$$L_{Amax(lop\ 7,5\ m)} = L_{PA} - 10 \log (2\pi (7,5)^2) = L_{PA} - 25,5 \quad (\text{vergelijking 6})$$

In de praktijk wenst men het akoestisch sfeer te kunnen beoordelen aan de hand van één van de in fiche 1 besproken beoordelingsparameters (meestal L_{Aeq} of een ervan afgeleide parameter) die men wenst te kennen in meerdere immissiepunten in de omgeving van een verkeersweg.

Hoe kan men het equivalent geluidsdrukkniveau in een immissiepunt in de omgeving van een verkeersweg berekenen wanneer het geluid zich onder vrij-veldcondities kan voortplanten, d.w.z. zonder dat de voortplanting beïnvloed wordt door reflecterende obstakels?

4.3.1. L_{Aeq} van de passage van één voertuig

Beschouw een voertuig dat zich met een constante snelheid v ¹⁴ beweegt langs een recht stuk weg (Figuur 14).



Figuur 14: Schematische voorstelling van een waarnemer op afstand d van een recht stuk weg waarlangs een voertuig met constante snelheid v passeert

¹² ISO 11819

¹³ er werd aangetoond middels intensiteitsanalyse dat een voertuig op deze afstand in goede benadering kan worden beschouwd als een puntbron die zich op de lengteas van het voertuig bevindt op ca. 4 cm boven het wegdek (zie referentie v)

¹⁴ uitgedrukt in m/s

Er wordt verondersteld dat het geluidsvermogen (met corresponderend vermogenniveau L_{PA}) constant is en dat het vermogen uniform in alle richtingen wordt uitgestraald. Een waarnemer bevindt zich op afstand d van de weg en start de meting van het L_{Aeq} op tijdstip t_1 (voertuig bevindt zich in punt x) en beëindigt ze op tijdstip t_2 (voertuig bevindt zich in punt y). De waarnemer ziet het stuk weg x - y onder een hoek α ¹⁵ en de afstand tussen de waarnemer en de weg is d ¹⁶. Men kan aantonen^{xvi} dat het equivalent geluidsdruk-niveau L_{Aeq} , gemeten over het interval t_2-t_1 , gegeven wordt door¹⁷:

$$L_{Aeq, t_2-t_1} = L_{PA} - 10 \log(t_2 - t_1) - 10 \log(d \cdot v) + 10 \log(\alpha/2\pi) \quad (\text{vergelijking 7})$$

Hieruit kan worden opgemaakt dat:

- ◆ het L_{Aeq} toeneemt met $10 \log(\alpha)$ waarbij α dus de hoek waaronder de waarnemer het stuk weg ziet
- ◆ het L_{Aeq} afneemt met $10 \log(d)$; een afstandsverdubbeling tussen waarnemer en weg zorgt voor een afname van 3 dB(A)
- ◆ indien het akoestisch vermogen van het voertuig onafhankelijk is van de snelheid (wat meestal niet het geval is) neemt het L_{Aeq} af met toenemende snelheid volgens $10 \log(v)$. Dit komt omdat de waarnemer bij toenemende snelheid minder lang wordt blootgesteld aan het lawaai van de bron. In de praktijk neemt L_{PA} toe met stijgende snelheid volgens $\approx 30 \log(v)$ ¹⁸, zodat het L_{Aeq} toeneemt met de snelheid volgens $20 \log(v)$

4.3.2. L_{Aeq} van een stroom voertuigen

Indien Q het debiet¹⁹ van een stroom identieke voertuigen (allemaal met akoestisch vermogen L_{PA}) is die zich op een recht stuk weg voortbeweegt met snelheid v , dan kan worden aangetoondⁱ dat het equivalent geluidsdruk-niveau L_{Aeq} bij een waarnemer gegeven wordt door:

$$L_{Aeq} = L_{PA} + 10 \log(Q) - 10 \log(v \cdot d) + 10 \log(\alpha/2\pi) \quad (\text{vergelijking 8})$$

met d en α opnieuw respectievelijk de afstand van de waarnemer tot de weg en de hoek waaronder de waarnemer het stuk weg ziet en v de snelheid van de voertuigen in m/s.

Merk op dat het L_{Aeq} bij een stabiele verkeersstroom onafhankelijk is van de meettijd en toeneemt met het debiet van de verkeersstroom met $10 \log(Q)$. Een verdubbeling van het aantal voertuigen zorgt voor een stijging van 3 dB(A) en een vertienvoudiging van het voertuigdebiet voor een toename van 10 dB(A).

Wanneer men Q uitdrukt in voertuigen/uur, de snelheid in km/uur en α gelijkstelt aan π , kan deze betrekking ook geschreven worden als:

$$L_{Aeq} = L_{PA} + 10 \log(Q) - 10 \log(v \cdot d) - 33 \quad (\text{vergelijking 9})$$

Indien men zoals in de praktijk niet te maken heeft met identieke voertuigen, blijven vergelijkingen 8 en 9 geldig, op voorwaarde het geluidsvermogen van het individuele voertuig L_{PA} vervangen wordt door het "logaritmisch gemiddelde" voertuigvermogen, $\langle L_{PA} \rangle$, berekend volgens:

$$\langle L_{PA} \rangle = 10 \log\left(\frac{1}{n} \sum P_{Ai}\right) / P_0 \quad (\text{vergelijking 10})$$

met P_{Ai} het A-gewogen geluidsvermogen van het i -de voertuig, n het aantal voertuigen van de steekproef en P_0 het referentiegeluidsvermogenniveau (zie vergelijking 13 in fiche 1).

¹⁵ uitgedrukt in radialen

¹⁶ uitgedrukt in m

¹⁷ enkel geldig in vrij-veld-condities

¹⁸ voor lichte voertuigen, zie vergelijking 5

¹⁹ uitgedrukt in voertuigen/s

4.3.3. L_{Aeq} in de buurt van een verkeersweg

De geluidsenergie die wordt **geproduceerd** door een verkeersweg wordt voornamelijk bepaald door:

- ◆ het voertuigdebiet
- ◆ de snelheid van de voertuigen
- ◆ het rijregime van de voertuigstroom (continue snelheid, versnellend, vertragend, pulserend)
- ◆ het wegdek (vooral macro- en megatextuur en aan- of afwezigheid van oneffenheid)
- ◆ het percentage zware voertuigen
- ◆ de helling van de weg, uitgedrukt als het stijgingspercentage

Er dient gesteld dat het geluidsdrukkniveau voortgebracht door een verkeersweg niet enkel afhankelijk is van deze factoren afzonderlijk, maar ook dikwijls van een **combinatie** van twee of meerdere factoren (bijvoorbeeld het percentage zware voertuigen en de helling van de weg).

De **propagatie** van het lawaai naar de omgeving wordt vooral bepaald door:

- ◆ weersomstandigheden (vooral windrichting en -snelheid)
- ◆ afscherpende objecten (geluidsschermen, huizenrijen, taluds, overkapping,...)
- ◆ vegetatie en luchtabsorptie
- ◆ de hoogte van het wegdek ten opzichte van het maaiveld

Niet alle voertuigen op een verkeersweg hebben dezelfde **snelheid**. De snelheidslimiet en de mate van verzadiging van de verkeersweg bepalen de spreiding van de snelheden. De lawaaiproductie van een verkeersweg wordt gedomineerd door de snelste voertuigen. Lamurei stelt als snelheid van de verkeersstroom de snelheid voor die door 15 % van de voertuigen wordt overschreden.

Het rijregime van de verkeersstroom kan eveneens een rol spelen. Men kan vier rijregimes onderscheiden: continu, versnellend, vertragend en pulserend (= afwisselend versnellend en vertragend). Het blijkt dat een versnellend en pulserend rijregime aanleiding geeft tot hogere geluidsdrukkniveaus dan een continu of vertragend rijregime. De verhoging is uitgesproken bij lagere snelheden en wordt kleiner bij hogere snelheden (zie ook 4.2.1). Metingen van het equivalent geluidsdrukkniveau op punten langs een verkeersweg op verschillende afstanden van een plaats waar het verkeer tot stilstand werd gebracht^{xvii}, leverde voor versnellende auto's, lichte vrachtwagens en zware vrachtwagens respectievelijk verhogingen op van 2,5; 3,5 en 2 dB(A) en dit bij een snelheid van 49 km/uur. Bij een snelheid van 97 km/uur trad geen verhoging meer op.

Om de invloed van het percentage **zware voertuigen** in de verkeersstroom in rekening te brengen introduceert Lamure de factor E, d.i. de verhouding tussen het uitgestraalde geluidsvermogen van een zwaar voertuig en een licht voertuig. Deze verhouding is afhankelijk van de snelheid en van de **helling van de weg**. Enkele waarden worden getabuleerd in tabel 2.

Type verkeersader	$r \leq 2\%$	$r = 3\%$	$r = 4\%$	$r = 5\%$	$r \geq 6\%$
Snelweg ($v \approx 120$ km/uur)	4	5	5	6	6
Snelweg in stad ($v \approx 90$ km/uur)	7	9	10	11	12
Weg in stad ($v \approx 60$ km/uur)	10	13	16	18	20

Tabel 2.: De verhouding E geluidsvermogen zwaar voertuig/ geluidsvermogen licht voertuig voor enkele types wegen en voor enkele hellingsgraden r.

Hieruit blijkt dus dat op een vlakke snelweg één zwaar voertuig evenveel lawaai produceert als vier auto's, terwijl bij traag verkeer op een sterk hellende weg een vrachtwagen evenveel lawaai voortbrengt als twintig auto's.

De helling van de weg heeft dus veel invloed op de lawaaiproductie van zware voertuigen, maar heel wat minder op de geluidsproductie van personenwagens. Het oprijden van een helling veroorzaakt extra motorlawaai. Het motorlawaai wordt bij personenwagens al bij vrij lage snelheden overstemd door het bandengeluid. Niettemin wordt bij een aantal rekenmodellen toch een correctie voor de helling van de weg in rekening gebracht. Bij de Nederlandse SRM I een correctie van 1, 2 en 3 dB(A) in rekening gebracht voor respectievelijk stijgingspercentages tussen 3 en 5 %, tussen 5 en 8 % en meer dan 8 %. Bij het Franse rekenmodel (zie referentie ^{xvi}) worden correcties voorgesteld die eerder overdreven lijken (tot 7,5 dB(A) bij personenwagens).

Luchtabsorptie is vrij beperkt en is op kortere afstanden absoluut te verwaarlozen, maar kan desgewenst in rekening gebracht worden met de cijferwaarden gegeven in paragraaf 1.13.3. Bij berekeningen van geluidsdrukniveaus wordt doorgaans uitgegaan van een stabiele atmosfeer (wind- en temperatuureffecten te verwaarlozen). In voorkomend geval kan rekening worden gehouden met een bijkomende attenuatie door vegetatie (zie paragraaf 1.13.4) en/of door schermen (zie fiche 11).

Grondeffecten tenslotte kunnen een niet te verwaarlozen attenuatie van de geluidsgolven veroorzaken. Om hiermee benaderend rekening te houden wordt de afhankelijkheid van de afstand $10 \log(d)$, wat overeenkomt met een afname van het geluidsdrukniveau met 3 dB(A) per afstandsverdubbeling, nogal eens vervangen door een afhankelijkheid $13 \log(d)$. Dit komt overeen met een vermindering van 4 dB(A) per afstandsverdubbeling. De bijkomende afname van 1 dB(A) per afstandsverdubbeling is een soort "forfaitaire" bijdrage voor het grondeffect.

Voor de invloed van **afschermende objecten** wordt verwezen naar fiche 11.

Het lawaai van verkeerswegen waarvan het wegdek lager ligt dan het maaiveld, wordt deels afgeschermd door de taludwanden, wat uiteraard een gunstig effect is. Het kwantitatief aspect hiervan wordt eveneens besproken in fiche 11. Wanneer het wegdek hoger ligt dan het maaiveld, wordt de afschermende werking van eventueel aanwezige afschermende elementen verminderd en is er ook minder of geen grondabsorptie. In dit geval kan het lawaai zich efficiënter naar de omgeving voortplanten wat dan weer een ongunstige situatie is. De hoogte van het wegdek t.o.v. het maaiveld dient in gesofisticeerde rekenprogramma's ter voorspelling van het geluidsdrukniveau in de omgeving van een verkeersweg zeker in rekening te worden gebracht.

Combinatie van vergelijkingen 5 en 6 leert dat het gemiddelde akoestisch vermogen van auto's kan geschreven worden als:

$$\langle L_{PA, \text{auto's}} \rangle = 37,5 + 33 \log(v) \quad (\text{vergelijking 11})$$

Gelet op vergelijkingen 9 en 11 én op bovenstaande bespreking, kan het L_{Aeq} voor een waarnemingspunt op afstand d van een verkeersweg geschreven worden als volgt²⁰:

$$L_{Aeq} = 10 \log(Q_{lv} + E \cdot Q_{zv}) + 23 \log(v) - 10 \log(d) + 4,5 + C_{\text{wegdek}} + C_{\text{meteo}} + C_{\text{luchtabsorptie}} + C_{\text{grond}} + C_{\text{helling weg}} + C_{\text{afschermende objecten}} + C_{\text{vegetatie}} + C_{\text{rijregime}} \quad (\text{vergelijking 12})$$

met:

Q_{lv} en Q_{zv} respectievelijke de debieten van de lichte en zware voertuigen,

C_{wegdek} een correctiefactor om rekening te houden met de akoestische kwaliteiten van het wegdek (zie fiche 7),

C_{meteo} een correctiefactor om rekening te houden met de weersomstandigheden,

$C_{\text{luchtabsorptie}}$ een correctiefactor om rekening te houden met de absorptie van het geluid door de lucht,

C_{grond} een correctiefactor om rekening te houden met grondeffecten,

$C_{\text{helling weg}}$ een correctiefactor om rekening te houden met helling van het wegdek,

$C_{\text{afschermende objecten}}$ een correctiefactor om rekening te houden met de akoestische kwaliteiten van het wegdek (zie fiche 12),

$C_{\text{vegetatie}}$ een correctiefactor om rekening te houden de absorptie door de vegetatie tussen waarnemer en weg,

$C_{\text{rijregime}}$ een correctiefactor om rekening te houden met het rijregime van de verkeersstroom.

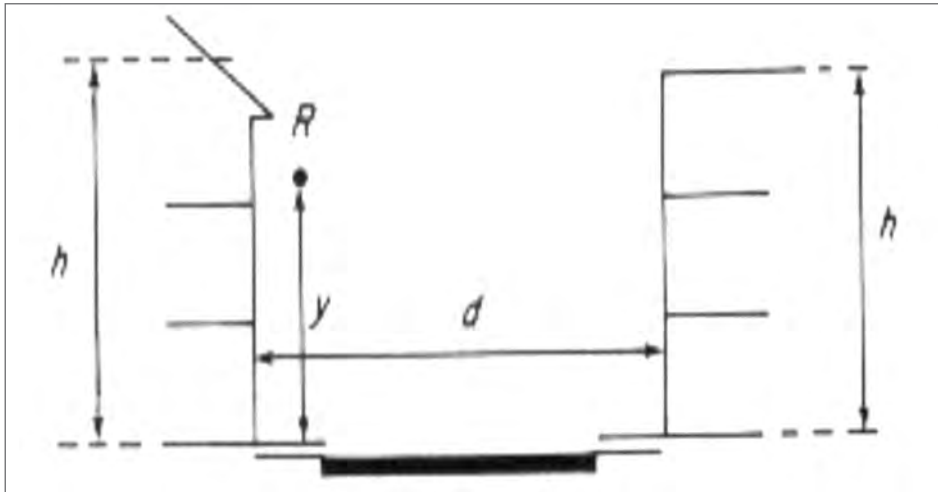
²⁰ op voorwaarde dat de vrij-veldcondities gelden en dat d veel groter is dan de breedte van de weg

4.4. Voortplanting van verkeerslawaaï in andere dan de vrij-veldsituatie

Ingeval men het geluidsdrukkniveau wenst te voorspellen langs een straat die aan één of beide zijden afgeboord is met akoestisch reflecterende elementen (gebouwen, muren, ...) kan men de formules uit paragraaf 4.3. niet gebruiken, omdat de voorwaarden voor een vrij-veldsituatie niet zijn vervuld: de waarnemer neemt niet alleen het geluid waar dat rechtevreeks afkomstig is van de verkeersweg, maar ook geluid dat één of meerdere keren gereflecteerd werd op de voorgevels van de gebouwen. Bij aanwezigheid van reflecterende elementen langs de verkeersweg dient men een aangepaste formule te gebruiken om het L_{Aeq} te berekenen, zoals wordt gegeven in referentie^{viii}. Men onderscheidt twee gevallen: de straat met het zogenaamde U-profiel enerzijds en de straat met het L-profiel en alle andere gevallen anderzijds.

4.4.1. Straat met U-profiel

Beschouw de dwarsdoorsnede van een straat in Figuur 15. De straat is aan beide zijden bebouwd met een aaneengesloten rij gebouwen (zie praktijksituatie in Figuur 16).



Figuur 15: Schematische voorstelling van een straat met een zogenaamd "U-profiel"



Figuur 16: Voorbeeld van een straat met een "U-profiel"

De parameters d en h , op figuur 15, stellen respectievelijk de afstand tussen de gevels aan beide zijden van de straat en de hoogte van de laagste gevel voor. Bij smalle straten met hoge, aaneengesloten gebouwen erlangs, zodanig dat $h/d \geq 0,2$, spreekt men van straten met een U-profiel. Wanneer de breedte tussen de gevels kleiner is dan vijf maal de hoogte van de laagste gevel, wordt het lawaai van het verkeer in de straat veelvuldig weerkaatst tussen de tegenoverliggende gevels. Dit noemt men het "galmeffect", dat ook zeer typisch is voor gesloten ruimtes, vooral dan grote ruimtes met weinig akoestische absorptie zoals kerken, fabriekshallen, ...enz. Het geluidrukniveau ligt bij aanwezigheid van het galmeffect hoger dan in een vrij-vrij-veldsituatie. Het equivalent geluidsdrukniveau L_{Aeq} bij de gevels van de gebouwen kan dan worden benaderd met de uitdrukking (zie referentie^{xvii}):

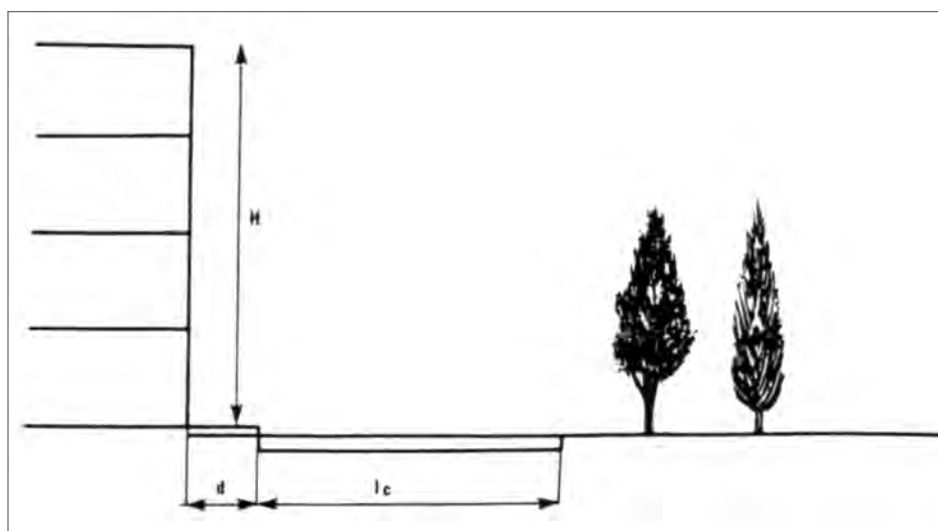
$$L_{Aeq} = 55 + 10 \log(Q_{lv} + E \cdot Q_{zv}) - 10 \log(d) + C_h + C_v \quad (\text{vergelijking 13})$$

Hierbij zijn:

- ◆ Q_{lv} en Q_{zv} de debieten aan lichte en zware voertuigen in voertuigen/uur en E de verhouding geluidsvermogen zwaar voertuig/geluidsvermogen licht voertuig, zoals al eerder gedefinieerd. E is afhankelijk van de helling van de straat, zoals gegeven in de onderste rij van tabel 2.
- ◆ C_h een correctieterm om de hoogte h van het meetpunt (t.o.v. het straatniveau) in rekening te brengen: Op minder dan 4m boven het straatniveau is deze term nul. Wanneer het waarnemingspunt hoger ligt dan 4m, neemt het geluidsdrukniveau licht af met stijgende hoogte en bedraagt de correctieterm: $C_h = -2(h - 4)/d$ (vergelijking 14)
- ◆ C_v een correctieterm om rekening te houden met de snelheid v van de verkeersstroom: wanneer de gemiddelde snelheid van de verkeersstroom lager dan of gelijk is dan 60 km/uur is deze term 0. Wanneer de snelheid groter is dan 60 km/uur, wordt als correctie 1 dB(A) per 10 km/uur boven de 60 km/uur in rekening gebracht.

4.4.2. Straten met een L-profiel en alle andere gevallen

Een straat met een L-profiel is aan één zijde bebouwd met aaneengesloten gebouwen en aan de andere zijde akoestisch open (zie schematische voorstelling in Figuur 17 en concrete situatie in Figuur 18).



Figuur 17: Schematische voorstelling van een straat met een zogenaamd "L-profiel"



Figuur 18: Voorbeeld van een straat met "L-profiel"

Het equivalent geluidsdruk niveau in een punt op 2 m voor de gevels kan volgens referentie^{xvii} in een dergelijk geval worden benaderd met:

$$L_{Aeq} = 20 + 10 \log(Q_{lv} + E \cdot Q_{zv}) + 20 \log(v) - 12 \log(d + l_c/3) + 10 \log(\alpha/\pi) \quad (\text{vergelijking 15})$$

waarbij:

- ◆ d de afstand tussen de rand van de weg en de waarnemer (die zich ofwel op 2m van de gevels bevindt, ofwel zich bevindt op een afstand d van de weg aan de zijde waar zich geen bebouwing bevindt)
- ◆ l_c de breedte van de weg in m
- ◆ α de hoek waaronder de waarnemer de weg ziet, uitgedrukt in radialen

Vergelijking 15 kan ook gebruikt worden in de andere situaties die niet overeenstemmen met een vrij-veld-situatie, een straat met U- of L-profiel, zoals een laan waar zich gebouwen bevinden met aanzienlijke vrije ruimtes ertussen.

4.5. Referenties

- i C. Lamure, "Chapter 12 Road Traffic Noise: Generation, Propagation and Control", pp. 297-342 in "Noise Pollution", uitgegeven door A. Lara Sáenz en R. W. B. Stevens, gepubliceerd door J. Wiley & Sons Ltd (1986)
- ii idem
- iii J. Lelong, R. Michelet, "Effect of acceleration on vehicle noise emission", Forum Acusticum, Berlijn (1999)
- iv overzichtsartikel: U. Sandberg, "Noise Emissions of Road Vehicles, Effects of Regulations, Final Report 01-1" by the I-INCE Working Party on Noise Emissions of Road Vehicles (WP-NERV), International Institute of Noise Control Engineering (juli 2001), gepubliceerd in Noise/news International, Vol. 9, nr. 3 (September 2001)
- v F. Anfosso-Lédée, « Rappels sur la génération, la propagation et l'absorption du bruit de roulement », Journées d'étude « Bruit du Traffic Routier », Nantes (22-23 november 2001)
- vi T. Beckenbauer, A. Kuijpers, "Prediction of pass-by levels depending on road surface parameters by means of a hybrid model", Proceedings of INTERNOISE 2001 (Vol. 5), Den Haag, [27-30 augustus 2001]
- vii A. Kuijpers, G. Van Blokland, "Tyre/road noise models in the last two decades: a critical evaluation", Proceedings of INTERNOISE 2001 (Vol. 5), Den Haag, [27-30 augustus 2001]
- viii J. Ejsmont, "Tire/Road noise simulation for optimisation of the tread pattern", Proceedings of INTERNOISE 2000 (Vol. 1), Nice, [27-30 augustus 2000]
- ix U. Sandberg, "Six decades of vehicle noise abatement – But what happened to the tyres?", Proceedings of the Institute of Acoustics, Sweden (1983)
- x S.M. Phillips, P.G. Abbott, "Factors affecting Statistical Pass-by measurements", Proceedings of INTERNOISE 2001 (Vol. 4), Den Haag, [27-30 augustus 2001]
- xi meetresultaten personenwagen uit: U. Sandberg, J.A. Ejsmont, G. Ronowski, M. Dong, "Ecodriving – Effects on Vehicle noise Emission", Publication 2001:53E, Swedish National Road Administration, Borlaenge, Sweden (2001) en meetresultaten vrachtwagens uit: U. Sandberg, "Noise Emission from Heavy Trucks Meeting the 84 and 80 dB(A) Limits", Proc. Of INTER-NOISE 92, Toronto, Ontario, Canada, pp. 829-834 (1992)
- xii Bergmann M. "Geräushestehung beim rollen auf benetzten oberflächen", Technische Universität Berlin (1979)
- xiii W. Liedl, E. Köhler, R. Eberspächer, "Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Reifenrollgeräuschen bei Trockenheit und Nässe – Teil 1, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift (1983); W. Liedl, E. Köhler, R. Eberspächer, "Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Reifenrollgeräuschen bei Trockenheit und Nässe – Teil 2, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift (1984); W. Liedl, E. Köhler, Tyre rolling noise in dry and wet conditions on pavement surfaces of different skid resistance", American Society for Testing and Materials, special technical publication 793 (1983)
- xiv [nog aan te vullen]
- xv brochure Vereniging tot Bevordering van Werken in Asfalt (VBW-Asfalt), Postbus 68, 3620 AB Breukelen, Nederland, (november 1999) (te vervangen door verwijzing naar echte SRM?)
- xvi zie bijvoorbeeld: "Guide du Bruit des Transports Terrestres – Prevision des niveaux sonores", Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie en Ministère des Transports (november 1980)
- xvii Bowlby W. e.a., "Predicting Stop-and-Go Traffic Noise Levels", National Cooperative Highway Research Program Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington (1989)