

Literatuuronderzoek effectiviteit geluidssignalen



Instituut Fysieke Veiligheid
Kennisonwikkeling en onderwijs
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
www.ifv.nl
info@ifv.nl
026 355 24 00

Colofon

Instituut Fysieke Veiligheid (2019). *Literatuuronderzoek effectiviteit geluidssignalen*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.

Opdrachtgever:	Instituut Fysieke Veiligheid
Contactpersoon:	Mindel Leene
Titel:	Literatuuronderzoek effectiviteit geluidssignalen
Datum:	30 januari 2020
Status:	Definitief
Versie:	1.0
Auteurs:	Mindel Leene BA, Johanna Veeneklaas MSc
Projectleider:	Margo Karemaker MSc
Review:	dr. ir. Nils Rosmuller
Eindverantwoordelijk:	dr. ir. Nils Rosmuller

Samenvatting

De afgelopen jaren hebben zich verschillende ontwikkelingen voorgedaan die van invloed kunnen zijn op de hoorbaarheid van geluidssignalen van hulpverleningsvoertuigen. Het doel van dit literatuuronderzoek is het in kaart brengen van de factoren die van invloed zijn op de effectiviteit (en daarmee op de hoorbaarheid) van deze signalen, evenals het onderzoeken of bepaalde factoren ook verschillen in de effectiviteit van verschillende geluidssignalen tot gevolg hebben.

De hoofdvraag is: Welke factoren zijn van invloed op de effectiviteit van geluidssignalen van voorrangsvoertuigen en in welke mate zijn deze van invloed? Hierbij zijn de volgende deelvragen geformuleerd: a) Welke factoren beïnvloeden de effectiviteit van de geluidsbron? b) Welke factoren zijn van invloed op de verspreiding van het geluid? en c) Welke factoren zijn van invloed op het ontvangen van het geluidssignaal? Een geluidssignaal is effectief als het hoorbaar en lokaliseerbaar is voor de ontvanger van het signaal. Daarnaast is van belang dat de ontvanger het geluid als waarschuwingssignaal ervaart.

Het onderzoek richt zich op de meest gangbare typen geluidssignalen van voorrangsvoertuigen in Nederland en in het buitenland en focust op de hoorbaarheid voor automobilisten. De eisen die worden gesteld aan geluidssignalen worden besproken, evenals de eigenschappen die een geluidssignaal effectief maken. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de effectiviteit van de geluidsbron. Deze wordt allereerst bepaald door de luidspreker die het geluidssignaal produceert. In Nederland zijn vrijwel alle voorrangsvoertuigen voorzien van een elektrodynamische hoornluidspreker, meestal geplaatst ter hoogte van de grille. De luidspreker is zo uitgevoerd dat winddruk en druk bij het voortbewegen van het voorrangsvoertuig geen negatieve invloed hebben op de effectiviteit van het geluidssignaal.

In hoofdstuk 4 wordt de verspreiding van het geluid behandeld. De luidspreker die het signaal produceert, bepaalt in welke mate het geluid hoorbaar is. Aan de voorkant van het voorrangsvoertuig is het geluidssignaal het effectiefst. Het geluid dat uit de luidspreker komt, kan tegen obstakels aan botsen, waardoor het geluidsniveau en de lokaliseerbaarheid afnemen. Achtergrondgeluid kan er, net als de geluidsisolatie van de auto, voor zorgen dat het geluidssignaal minder goed te horen is. Door de gesloten omgeving van de auto van de ontvanger wordt het moeilijker de richting van het geluidssignaal te achterhalen, zodat slechter geanticipeerd kan worden op het voorrangsvoertuig.

In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de ontvanger van het geluid. De gehoordrempel is een persoonsafhankelijke variabele die bepaalt of geluid hoorbaar is. Het horen en lokaliseren van het geluidssignaal is moeilijker met een gehoorbeperking. Wanneer een ontvanger bezig is met een taak die de aandacht vereist, wordt het geluidssignaal minder snel opgemerkt. Wanneer het geluidssignaal opgemerkt is, moet het voldoende alarmerend zijn om een reactie teweeg te brengen. Het geluid is alarmerender bij een hogere herhalingsnelheid. Dit is ook het geval wanneer het geluid schriller is. Het beluisteren van muziek leidt tot een

verhoging van de waarnemingsdrempel. Tot slot wordt vaak de afstand tot het voorrangvoertuig overschat.

In hoofdstuk 6 komen de conclusie en de beschouwing aan bod. Er wordt geconcludeerd dat de effectiviteit van het geluidssignaal sterk wordt bepaald door twee componenten, dit zijn de hoorbaarheid en de lokaliseerbaarheid, waarop weer diverse factoren van invloed zijn. Er is een theoretisch optimum van het geluidssignaal dat vastgelegd is in wet- en regelgeving. Echter blijkt in de praktijk dat met name tijdens de verspreiding van het geluid diverse factoren de effectiviteit ervan beïnvloeden. De mate waarin de effectiviteit van het geluidssignaal (negatief) beïnvloed wordt is niet alleen situatieafhankelijk, ook kunnen factoren elkaar onderling beïnvloeden en spelen de kenmerken van de mens een belangrijke rol. Met name de geluidsdichtheid van moderne auto's en het luisteren naar muziek of naar de radio zijn van negatieve invloed op de effectiviteit van de geluidsignalen.

Inhoud

Samenvatting	3
Inleiding	7
Aanleiding.....	7
Doel en onderzoeksvragen	7
Afbakening	8
Leeswijzer	8
1 Onderzoeksmethode	9
2 Eisen aan geluidssignalen	10
2.1 De kenmerken van het geluidssignaal.....	11
2.2 Nederlands wetgeving	11
2.3 Beperkingen aan het geluidssignaal.....	12
3 De effectiviteit van de geluidsbron	13
3.1 De kenmerken van de luidspreker	13
3.2 De plaats van de luidspreker	14
3.3 Typen geluidssignalen	14
3.4 De effectiviteit van het geluidssignaal.....	15
3.5 Deelconclusie.....	15
4 De verspreiding van het geluid	16
4.1 De afstand tussen bron en ontvanger	16
4.2 Geluidsniveau rondom het voorrangvoertuig	18
4.3 Plaats op de weg	18
4.4 Obstakels	19
4.5 Plaats van de luidspreker	20
4.6 Achtergrondgeluid.....	20
4.7 Hoorbaarheid in de auto	20
4.8 Geluidichtheid moderne auto's	21
4.9 De autoradio	21
4.10 Het lokaliseren van het geluidssignaal	22
4.11 Verschillen tussen geluidssignalen bij de geluidsverspreiding	23
4.12 Deelconclusie.....	24
5 De ontvanger van het geluidssignaal	25
5.1 Psychoakoestiek	25
5.2 De gehoordrempel van de mens	26
5.3 Aandacht voor en opmerken van het geluidssignaal.....	26
5.4 Herkenbaarheid van het geluidssignaal.....	26
5.5 Invloed van muziek	27
5.6 Lokaliseren van geluid	27
5.7 Verschillen tussen geluidssignalen bij het ontvangen van het geluid.....	28

5.8	Deelconclusie.....	28
6	Conclusie en beschouwing	29
6.1	Conclusie	29
	Deelvraag 1: Welke factoren beïnvloeden de effectiviteit van de	29
	geluidsbron?	29
	Deelvraag 2: Welke factoren zijn van invloed op de verspreiding van het geluid?	29
	Deelvraag 3: Welke factoren zijn van invloed op het ontvangen van het geluidssignaal?	30
	Centrale vraagstelling: Welke factoren zijn van invloed op de	30
	effectiviteit van geluidssignalen van voorrangvoertuigen?	30
6.2	Beschouwing.....	31
	Literatuurlijst	32
	Bijlage 1 Definities	34

Inleiding

Aanleiding

Vanaf 2009 tot op heden maken voorrangsvoertuigen in Nederland gebruik van de tweetonige hoorn (ook wel de tweetoon). In 2004 is door TNO onderzoek gedaan naar de optimalisatie van de geluidssignalen die destijds in Nederland werden gebruikt, waarna op basis van de aanbevelingen uit dit onderzoek de huidige tweetonige hoorn is aangepast. In 2006 is er door TNO opnieuw een onderzoek gedaan aan de hand van experimenten om vast te stellen of de aanpassingen aan het geluidssignaal ook effectief zijn in de praktijk. Daarnaast is in 2010, eveneens door TNO, onderzoek gedaan naar de meetmethode voor de tweetonige hoorn (Alferdinck, Drullman, Griffioen, & Martens, 2004; Beintema, & Van Balken, 2006; Beintema, & Eisses, 2010).

De afgelopen jaren hebben zich verschillende ontwikkelingen voorgedaan die van invloed kunnen zijn op de hoorbaarheid van het geluidssignaal. Zo zijn moderne auto's steeds beter geïsoleerd en daarmee ook geluidsdichter, wat gevolgen heeft voor de hoorbaarheid van het geluidssignaal in de auto. Ook word er steeds vaker naar muziek geluisterd in de auto, waardoor geluidssignaal, minder goed te horen is (Angione, Novak, D'Angela, & Ule, 2016; Beintema et al., 2006). Het is de vraag welke factoren daarnaast van (negatieve) invloed zijn op de hoorbaarheid van het geluidssignaal. Ambulancezorg Nederland heeft het Kenniscentrum Voorrangsvoertuigen van het IFV verzocht onderzoek te doen naar factoren die van invloed zijn op de hoorbaarheid van het geluidssignaal, waarbij ook aandacht moet worden geschonken aan recente ontwikkelingen.

Doel en onderzoeksvragen

Het doel van dit literatuuronderzoek is het in kaart brengen van de factoren die van invloed zijn op de effectiviteit (en daarmee op de hoorbaarheid) van het geluidssignaal van voorrangsvoertuigen. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd:

Welke factoren zijn van invloed op de effectiviteit van geluidssignalen van voorrangsvoertuigen?

- a) Welke factoren beïnvloeden de effectiviteit van de geluidsbron?
- b) Welke factoren zijn van invloed op de verspreiding van het geluid?
- c) Welke factoren zijn van invloed op het ontvangen van het geluidssignaal?

Antwoorden op bovenstaande onderzoeksvragen geven inzicht in de factoren die het geluidssignaal beïnvloeden, vanaf het moment dat het geluid de luidspreker verlaat totdat het door de ontvanger gehoord wordt. Waar dit mogelijk is worden verschillende typen geluidssignalen in het onderzoek meegenomen en wordt onderzocht bij welke factoren mogelijke verschillen in effectiviteit optreden.

Afbakening

Dit verkennende literatuuronderzoek richt zich op de meest gangbare typen geluidsignalen van voorrangsvoertuigen in Nederland en in het buitenland; optische signalen worden buiten beschouwing gelaten. Er is verkennend literatuuronderzoek gedaan naar de meest gangbare typen geluidssignalen uit de (wetenschappelijke) literatuur in Nederland en in het buitenland.

In dit onderzoek wordt alleen aandacht besteed aan geluidssignalen die doorgaans gedurende de hele rit van het voorrangsvoertuig gebruikt worden. Geluidssignalen die als aanvulling op - of ter ondersteuning van - het gangbare geluidssignaal worden gebruikt en bijvoorbeeld kortdurend of tijdens specifieke verkeerssituaties worden ingezet, zijn niet meegenomen.

Het onderzoek richt zich op de effectiviteit voor automobilisten van de geluidssignalen van voorrangsvoertuigen. Hiervoor zijn twee redenen: voorrangsvoertuigen krijgen veelvuldig met automobilisten te maken, en daarnaast kunnen automobilisten het geluidssignaal mogelijk minder goed waarnemen, omdat het moet doordringen tot in het voertuig waarin de automobilist zich bevindt. Wanneer er in dit onderzoek wordt gesproken over 'de ontvangers' worden hiermee automobilisten bedoeld (specifiek: bestuurders), met een normaal (ofwel gemiddeld) gehoor, tenzij anders vermeld.

Een geluidssignaal is in de context van dit rapport effectief wanneer het geluid hoorbaar en lokaliseerbaar is voor de ontvanger. Wil een geluidssignaal effectief zijn dan is het ook van belang dat de ontvanger het geluid als een waarschuwingssignaal ervaart.

In dit rapport komen de volgende vier typen geluidssignalen aan bod: de tweetoon (niet specifiek de Nederlandse tweetoon), de Wail, de Yelp en de Localizer. De Localizer is minder gangbaar dan de andere drie typen geluidssignalen, maar omdat dit signaal regelmatig genoemd werd in de literatuur, is het meegenomen in de literatuur.

Leeswijzer

In hoofdstuk 1 komt de onderzoeksmethode aan bod. Hoofdstuk 2 begint met een introductie van de eisen die worden gesteld aan geluidssignalen. Hierbij wordt ingegaan op eigenschappen die een geluidssignaal effectief maken en wet- en regelgeving. In hoofdstuk 3 tot en met 5 zijn de resultaten van dit onderzoek beschreven. In hoofdstuk 3 wordt de effectiviteit van de geluidsbron besproken; vervolgens wordt in hoofdstuk 4 de verspreiding van het geluid behandeld, en tot slot wordt in hoofdstuk 5 ingegaan op de ontvanger van het geluid. Hoofdstuk 6 bevat de conclusie en discussie van het onderzoek. In bijlage 1 is een overzicht van de gebruikte definities opgenomen.

1 Onderzoeksmethode

Door middel van een literatuuronderzoek is geïnventariseerd wat er uit nationaal en internationaal onderzoek bekend is over geluidssignalen en factoren die van invloed zijn op de effectiviteit hiervan. Ook is er in de literatuur gezocht naar recente en relevante ontwikkelingen in relatie tot geluidssignalen. Allereerst is uitgezocht of er in Nederland (wetenschappelijk) onderzoek naar de hoorbaarheid van geluidssignalen is gedaan, dat binnen de reikwijdte van dit onderzoek valt. Er bleek - naast de eerdergenoemde onderzoeken van TNO, die zich voornamelijk richten op Nederlandse tweetoon - geen Nederlands onderzoek te zijn gedaan naar geluidssignalen. Daarom is buitenlandse wetenschappelijke literatuur geraadpleegd.

Er is naar literatuur gezocht in de volgende wetenschappelijke databanken: ScienceDirect, Google Scholar, ResearchGate, Wiley, Pubmed, en de TRID database.

De volgende (combinaties van) zoektermen zijn gebruikt: (kenmerken) zwaailicht/optische- en geluidssignaal/sirene (lawaai/geluid), kenmerken geluid, effectief/hoorbaar/alarmerend geluid(signaal)/waarschuwing, geluidssignaal voorrangervoertuig/hulpdiensten, ambulance, tankautospuit/bluswagen/brandweervoertuig, politievoertuig/-wagen/-auto, waarschuwings(signaal)-/geluid, akoestische kenmerken/karakteristieken (verkeer) waarschuwingssignaal, lawaai/-geluidskenmerken, tweetoon/Yelp/Wail sirene.

Er is ook gezocht met bovenstaande zoektermen in het Engels: Light(s) and siren (noise/sound) characteristics, effective/audible/alerting sound/warning, emergency vehicle/service, ambulance vehicle, fire-truck/vehicle, police-vehicle(car), first/emergency responder, audible warning, warning signal/device, (car) warning device, acoustic characteristics, effective warning, (traffic) safety warning, characteristics (warning) sound/noise. Two-tone(s)/(hi-lo/hilo)/Yelp, Wail siren.

Een extra zoekslag is gemaakt door jargon voor verschillende typen geluidssignalen te gebruiken, om ook niet-wetenschappelijke literatuur te kunnen vinden. Deze zoekslag heeft echter geen bronnen opgeleverd-, die niet al gevonden waren met eerdergenoemde zoektermen.

Ten slotte zijn onderzoeken geraadpleegd die het IFV en zijn partners in het verleden hebben uitgevoerd en die verband houden met het thema van dit onderzoek. Er is gebruik gemaakt van de sneeuwbalmethode voor vervolgonderzoek in relevante publicaties.

In dit onderzoek is een beperkt aantal factoren meegenomen. De afweging om een variabele al dan niet mee te nemen is gebaseerd op basis van de beschikbare literatuur. Daarnaast is de afweging gemaakt of de variabele naar verwachting van invloed was op de effectiviteit van het geluidssignaal en eventuele verschillen tussen typen geluidssignalen zou kunnen veroorzaken.

2 Eisen aan geluidssignalen

Geluidssignalen - in combinatie met optische signalen - hebben als doel weggebruikers tijdig te waarschuwen zodat ze veilig kunnen reageren op het voorrangsvoertuig. Ze leveren een bijdrage aan het vlot en veilig door het verkeer kunnen bewegen van het voorrangsvoertuig.

Volgens Maddern, et al (2011) beïnvloeden verschillende fysieke factoren de hoorbaarheid en de lokaliseerbaarheid van geluidssignalen. De plaats van het voorrangsvoertuig op de weg en de geluidsdichtheid van auto's zijn bijvoorbeeld van invloed op de effectiviteit van het geluidssignaal. Daarnaast zijn er factoren vanuit de psychoakoestiek die bepalen hoe het geluidssignaal gehoord en geïnterpreteerd wordt door de mens. In figuur 2.1 is een beknopt overzicht weergegeven van de drie componenten die van invloed zijn op de hoorbaarheid van het geluidssignaal. De figuur representeert een situatie waarin een voorrangsvoertuig een auto van achteren nadert. De onderwerpen die aan de rechterkant van de figuur zijn weergegeven komen in dit rapport aan bod. Gebaseerd op geraadpleegde literatuur, wordt er in dit onderzoek een onderscheid gemaakt tussen drie componenten die de hoorbaarheid en effectiviteit van geluidssignalen bepalen: (1) *de geluidsbron*, (2) *de overdracht van het geluid* (hiermee wordt de weg bedoeld die het geluid aflegt om bij de weggebruiker te komen) en (3) de hoorbaarheid van het geluid voor *de ontvanger*, ofwel de automobilist (D'Angela, Angione, Novak, & Ule, 2013; Howard, Aaron, & Eleftherios, 2011; Maddern, Privopoulos, & Howard, 2011).



Figuur 2.1 Componenten met invloed op de effectiviteit van het geluidssignaal, samengesteld op basis van Maddern et al. (2011)

2.1 De kenmerken van het geluidssignaal

Hoorbaarheid en lokaliseerbaarheid zijn twee begrippen die in verband worden gebracht met de effectiviteit (of het gebrek hieraan) van het geluidssignaal. Deze twee begrippen zijn dan ook vaak onderwerp van onderzoeken naar geluidssignalen (Alferdinck et al., 2004). De kenmerken van een effectief geluidssignaal zijn weergegeven in het kader hieronder. Deze kenmerken gelden overigens niet alleen voor het Nederlandse geluidssignaal, maar ook voor de geluidssignalen die gebruikt worden in andere landen.

Het geluid van een geluidssignaal behoort een aantal specifieke kenmerken te hebben om effectief te zijn (Angione et al., 2017; D'Angela, 2013, p. 14):

- > Het geluid moet gemakkelijk te horen zijn ondanks achtergrondgeluid (ook wel ruis). Het geluid mag echter niet te luid zijn;
- > Het geluid moet gemakkelijk te horen zijn voor elke weggebruiker, met of zonder beperking aan het gehoor;
- > Het geluid moet herkenbaar zijn als waarschuwingssignaal;
- > De richting van het geluid moet gemakkelijk te bepalen (ofwel lokaliseerbaar) zijn.

Een geluidssignaal moet een aantal eigenschappen hebben om aan bovenstaande kenmerken te kunnen voldoen. Zo moet het een breed frequentiespectrum hebben en snel stijgen en dalen in geluidsniveau. Ook dient de snelheid waarmee de tonen zich herhalen (de herhalingsfrequentie) voldoende te hoog zijn. Daarnaast moet het geluidssignaal voldoende luid zijn om door te dringen tot in de voertuigen van de ontvangers. (Catchpole & Mckeown, 2007; De Lorenzo & Eilers, 1991; Howard et al., 2011). Het volume van het geluidssignaal is afhankelijk van onder andere de geluidsdruk, die weer van invloed is op de waargenomen geluidsterkte. De geluidsterkte van het geluid wordt uitgedrukt in decibel (dB). De geluidsterkte bepaalt samen met diverse fysieke en psychoakoestische factoren de effectiviteit van het geluidssignaal (Maddern et al., 2011). Een toelichting op de akoestische definities die worden gebruikt in dit rapport, is te vinden in bijlage 1.

2.2 Nederlands wetgeving

De basis voor de eisen waaraan de Nederlandse tweetoon moet voldoen is vastgelegd in wetgeving. In artikel 29 lid 1 van het RRV staat dat Nederlandse voorrangsvoertuigen optische en geluidssignalen voeren wanneer er sprake is van een dringende taak (Reglement verkeersregels en verkeertekens 1990). In Nederland wordt sinds 2009 de tweetonige hoorn gebruikt op alle voorrangsvoertuigen.

Om het geluidssignaal zo effectief mogelijk te laten zijn voor ontvangers, maar geen hinder of gevaar te veroorzaken, zijn er wettelijke eisen gesteld aan het Nederlandse geluidssignaal. Deze eisen zijn vastgelegd in de Regeling optische en geluidssignalen 2009. De technische specificaties uit de wet zijn weergegeven in het kader hieronder.

Technische specificaties tweetonige hoorn (Regeling optische en geluidssignalen 2009)

- > Geluidsterkte per toon: ten minste 110 dB(A) overdag en 100 dB(A) 's nachts. Maximaal 125 dB(A). Dit is de geluidsterkte buiten het voertuig;
- > On- en offset van 1-10 dB/ms;
- > Wisselfrequentie: eenparig en per toon tussen 0,5 en 5 Hz. De wisselfrequentie mag eventueel worden verhoogd door middel van een schakelaar - om de urgentie te verhogen - tot maximaal 5 Hz, dit bedraagt een verdubbeling van de basisfrequentie;
- > Toonhoogte: lage toon ongeveer 375 Hz. Hoge toon ongeveer 500 Hz.

2.3 Beperkingen aan het geluidssignaal

Om verschillende redenen is een geluidssignaal aan beperkingen onderhevig. Zo zijn de eisen die gesteld worden aan het signaal niet altijd met elkaar verenigbaar en sluiten elkaar in sommige gevallen zelfs uit. Een voorbeeld daarvan is de eis dat het geluidssignaal voor iedereen hoorbaar moet zijn, ook voor personen met gehoorschade. Dit blijkt in de praktijk onhaalbaar. Door Balastegui, et al. (2013) zijn experimenten uitgevoerd naar de hoorbaarheid van het geluidssignaal over een bepaalde afstand op de openbare weg. De experimenten zijn uitgevoerd op een ringweg in Barcelona met een snelheidslimiet van 80 km/h. Het geluidsniveau - van het geluidssignaal dat doordrong tot in de auto - is ter hoogte van het hoofd van de bestuurder gemeten. Hieruit bleek dat wanneer 95% van de populatie (met een normaal gehoor) het geluid van verschillende typen geluidsignalen kon waarnemen, de afstand tussen het voorrangvoertuig en het voertuig van de ontvanger minder dan twaalf meter was. Een afstand van minder dan twaalf meter is echter voor de ontvanger te kort om tijdig en veilig ruimte te kunnen maken voor het voorrangvoertuig (Balastegui, Romeu, Clot, & Martín, 2013).

Het geluid mag echter ook weer niet zo luid zijn dat het hinder voor medeweggebruikers veroorzaakt, een schrikreactie teweegbrengt of de pijngrens van ongeveer 120 decibel (dB) overschrijdt (Alferdinck et al., 2004). Daarnaast zijn er ook grenzen gesteld aan het geluidsniveau om de inzittenden van een voorrangvoertuig te beschermen tegen gehoorschade; zij worden immers regelmatig en gedurende langere tijd blootgesteld aan het geluidssignaal (D'Angela et al., 2013; Howard et al., 2011). Een geluidsniveau van meer dan 110 dB kan op termijn gehoorschade teweegbrengen (Catchpole et al., 2007). Ook kan een te hoog geluidsniveau de communicatie in het voorrangvoertuig verstoren of zorgen voor geluidsoverlast in de omgeving (Alferdinck et al., 2004). Het simpelweg verhogen van het geluidsniveau, om het geluidssignaal - over een grotere afstand - voor iedereen hoorbaar te maken, is om deze redenen niet mogelijk.

Een ander reden waarom het geluidssignaal zijn beperkingen heeft en hierom niet altijd effectief is, zijn de wisselende omstandigheden waaronder het doorgaans wordt gebruikt. Zo zijn de verkeersituatie, het omgevingslawaai en de kenmerken van het gehoor van de ontvanger verre van constant tijdens dit rit van een voorrangvoertuig. Bij elke spoedrit is er sprake van verschillen in akoestische waardes door tal van factoren. Het is niet mogelijk om het geluidssignaal zodanig aan te passen dat dit in elke situatie effectief is, zonder de grenzen van de wetgeving te overschrijden of andere eisen voor de hoorbaarheid of lokaliseerbaarheid uit sluiten.

Tot slot kunnen de hoorbaarheid en lokaliseerbaarheid van het huidige geluidssignaal in Nederland, binnen de huidige grenzen - bepaald door de wetgeving en kenmerken van de luidspreker - niet tegelijk geoptimaliseerd worden. Dit houdt in dat het verhogen van de hoorbaarheid binnen de bestaande eisen ten koste gaat van de lokaliseerbaarheid en vice versa (Beintema & van Balken, 2006, p. 30).

3 De effectiviteit van de geluidsbron

Met de resultaten uit dit hoofdstuk kan de volgende deelvraag worden beantwoord: a) welke factoren beïnvloeden de effectiviteit van de geluidsbron?

De effectiviteit van de geluidssignalen wordt op de eerste plaats bepaald door de geluidsbron. Dit is de luidspreker die het geluidssignaal produceert. Factoren die van invloed zijn op de effectiviteit van de verschillende typen geluidsbronnen komen in dit hoofdstuk aan bod.

3.1 De kenmerken van de luidspreker

Tegenwoordig zijn vrijwel alle voorrangsvoertuigen in Nederland voorzien van elektrodynamische hoornluidsprekers die het geluidssignaal produceren. Bij de Nederlandse tweetonige hoorn wisselen een hoge en een lage toon elkaar af. De twee tonen zijn opgebouwd uit een grondtoon met meerdere boventonen. Zoals in het vorige hoofdstuk weergegeven in het kader met wetstechnische specificatie, heeft de laagste toon een grondtoon van 375 Hz en de hoogste toon een grondtoon van 500 Hz. De huidige wisselfrequentie van elke toon is 1.67 Hz; dit betekent dat elke toon een duur van 0.6 seconden heeft. De herhalingsfrequentie - niet te verwarren met de wisselfrequentie - is 0.83 Hz. De herhalingsfrequentie is de duur van de gehele hoog-laag cyclus van de tonen; deze is twee keer zo langzaam als de wisselfrequentie (Beintema et al., 2010; TNO, 2010). De geluidsgolf van de huidige luidsprekers is een zogeheten blokgolf (Beintema et al., 2006, Beintema et al., 2004).

De verschillende luidsprekers die worden gebruikt op de Nederlands voorrangsvoertuigen bleken in 2006 geluidssignalen te produceren die niet in overeenstemming zijn met de huidige wetgeving. Ook kennen de luidsprekers - afhankelijk van de grootte - beperkingen bij het produceren van geluid met lage frequenties. Wel zijn hoornluidsprekers het meest effectief voor het maken van hoge geluidsniveaus (Beintema; Van Balken, 2006, p. 11). Het is niet bekend of er sinds 2006 aanpassingen zijn doorgevoerd, waardoor de beperkingen zijn weggenomen.

Voor geluidssignalen die in het buitenland worden gebruikt gelden andere eisen dan voor de Nederlandse tweetonige hoorn. De wetgeving verschilt per land of soms zelfs per regio, waardoor geluidssignalen uit verschillende landen andere kenmerken hebben. In de Verenigde Staten bijvoorbeeld, mag het geluidsniveau van het geluidssignaal hoger zijn dan in Nederland en kunnen de regels per staat verschillen. Het is van belang hiermee rekening te houden wanneer geluidssignalen uit binnen- en buitenland met elkaar worden vergeleken (Alferdinck et al., 2004; National Institute of Justice, 2000).

3.2 De plaats van de luidspreker

Tegenwoordig zijn vrijwel alle luidsprekers in Nederland ter hoogte van de grille in het voorrangsvoertuig geplaatst. De luidspreker is recht naar voren gericht. Ook worden luidsprekers soms onder de bumper of onder motorkap van het voertuig geplaatst. Ondanks het feit dat de luidsprekers min of meer op dezelfde plek zijn bevestigd, bevinden zij zich niet allemaal op dezelfde hoogte, omdat de grootte van de voertuigen verschilt. Wanneer de luidspreker ter hoogte van de grille is geplaatst, levert dit minder geluidsoverlast op voor de inzittenden van het voorrangsvoertuig, - dan wanneer de luidspreker zich op het dak of in de wielboog van het voertuig bevindt (Catchpole et al., 2007; Beintema et al., 2006). De plaats van de luidspreker op het voertuig is van invloed op de verspreiding van het geluid; dit komt aan bod in het volgende hoofdstuk.

Gemiddeld produceren kleinere luidsprekers circa 2 dB minder geluid, dan grote luidsprekers. Vanwege beperkte ruimte onder de motorkap worden de kleinere luidsprekers vaker gebruikt dan de grotere (Beintema.; Van Balken, 2006, p. 11).

3.3 Typen geluidsignalen

In tabel 3.1 is een overzicht weergegeven van verschillende geluidssignalen die in Nederland en in het buitenland gangbaar zijn. De tabel biedt geen compleet overzicht van alle geluidssignalen; het is een overzicht van de geluidssignalen die terug te vinden zijn in de literatuur en binnen de reikwijdte van dit onderzoek vallen. Dit zijn de tweetoon, de Wail, de Yelp en de Localizer. Er is te zien dat de kenmerken van de geluidssignalen vaak per land verschillen. Om deze reden kan het ene geluidssignaal niet zomaar met het andere vergeleken worden. Er is in het buitenland regelmatig onderzoek gedaan naar de Wail en de Yelp, de tweetoon is minder vaak onderzocht. Er is geen onderzoek bekend dat alle (gangbare) geluidssignalen voor verschillende landen vergelijkt (D'Angela, 2013).

Tabel 3.1 Kenmerken van gangbare geluidssignalen

Type geluidssignaal	Beschrijving	Kenmerken ¹	Herhalingsnelheid
Tweetoon	Tweetonig geluid	375-500 Hz (NL) 450-600 Hz (langzame tweetoon, (ES/UK). 670-1100Hz (UK)	0.83 Hz (NL) 55 herh./min
Wail	Continue stijgend en dalend geluid	500-1800 Hz (UK/VS) 600-1200 Hz (ES) 800-1700 Hz (AUS/UK) 725-1600 Hz (CAN)	11 herh./min (UK) 12 herh./min (VS) 4.92 sec. (AUS)
Localizer	Yelp met toevoeging van 'wit geluid'	500-1800 Hz (AUS/UK)	55 herh./min (AUS) 0.384s (UK)
Yelp	Continue en snel op en neergaand geluid	500-1800 Hz (UK/VS) 600-1200 Hz (ES) 800-1700 Hz (AUS/UK) 725-1600 Hz (CAN)	55 herh./min (UK) 180 herh./min (VS)

3.4 De effectiviteit van het geluidssignaal

De richting waarin het geluid zich verspreidt, is medebepalend voor de effectiviteit van het signaal. Deze richting wordt bepaald door de plek van de luidspreker op het voertuig, de hoek waaronder deze geplaatst is en de geluidsterkte die uit de luidspreker komt. De sterkte van het geluid kan beïnvloed worden door extra wind- of luchtdruk wanneer het voorrangsvoertuig zich voorwaarts beweegt, wat invloed kan hebben op de verspreiding van het geluid. De meeste luidsprekers zijn zo uitgevoerd dat druk op de luidspreker geen negatieve gevolgen heeft voor het geluidsniveau dat uit de luidspreker komt (Maddern et al., 2011).

3.5 Deelconclusie

De effectiviteit van de geluidsbron wordt in Nederland allereerst bepaald door de luidspreker die het geluidssignaal produceert. In Nederland zijn vrijwel alle voorrangsvoertuigen voorzien van een elektrodynamische hoorluidspreker. De luidspreker is op het merendeel van de voertuigen – zowel Nederlandse als buitenlandse - ter hoogte van de grille geplaatst. De luidspreker is zo uitgevoerd dat winddruk en druk bij het voortbewegen van het voorrangsvoertuig geen negatieve invloed hebben op de effectiviteit van het geluidssignaal.

¹ Het overzicht van de geluidssignalen in de tabel is geen compleet overzicht van alle typen geluidssignalen en de landen waar deze in gebruik zijn. Het is een overzicht van de geluidssignalen uit de literatuur die beschikbaar was en gebruikt is in dit onderzoek. Niet van alle typen geluidssignalen waren de exacte kenmerken te achterhalen.

4 De verspreiding van het geluid

Met de resultaten uit dit hoofdstuk kan de volgende deelvraag worden beantwoord: b) welke factoren zijn van invloed op de verspreiding van het geluid?

Om van de bron tot de ontvanger te komen verspreidt het geluid dat afkomstig is uit de luidspreker zich door de lucht. Het geluid moet doordringen tot in de auto van de ontvanger om hoorbaar te zijn. De factoren die van invloed zijn op de verspreiding van het geluid komen in dit hoofdstuk aanbod.

4.1 De afstand tussen bron en ontvanger

De afstand van het voorrangvoertuig tot het voertuig die binnen bereik van het geluidssignaal is, is van invloed op het geluidsniveau dat de ontvanger bereikt. Op grotere afstand neemt de hoorbaarheid van het geluidssignaal af, hoe hoog de geluidsterkte ook is (Alferdinck et al., 2004). Afhankelijk van het type geluidssignaal treden er verschillen op in de afstand waarop het geluid nog hoorbaar is.

Een Brits onderzoek van Catchpole et al. (2007) vergelijkt drie geluidssignalen: de Wail, de Yelp en de Localizer. In tabel 4.1 zijn de specificaties weergegeven van deze drie geluidssignalen. Voor het vaststellen van de geluidsterkte op een bepaalde afstand, zijn metingen uitgevoerd in en buiten de auto van de ontvanger. Hierbij is de auto van de ontvanger voor de geluidsbron gepositioneerd.

Tabel 4.1. Kenmerken onderzochte geluidssignalen

Type	Beschrijving	Kenmerken	Herhalingsnelheid
Yelp	Continue op en neergaand geluid	500–1800 Hz	55 herhalingen/min
Wail	Continue stijgend en dalend geluid	500-1800 Hz	11/12 herhalingen/min
Localizable (Localizer)	Yelp met toevoeging van 'wit geluid'	3000-7000 Hz	55 herhalingen/min

Volgens het onderzoek van Catchpole et al. (2007) lieten metingen buiten het voertuig - van de ontvanger - geen verschillen zien in het geluidsniveau van de drie geluidssignalen. Wel was er sprake van een verschil in geluidsniveau wanneer metingen werden verricht in het voertuig van de ontvanger. Het geluidsniveau in het voertuig van de ontvanger op vijf meter afstand van de bron was: 71 dB voor de Yelp, 72 dB voor de Wail en 69 dB voor de Localizer. Gemeten op een afstand van tien meter waren de resultaten als volgt: 68 dB voor

de Yelp, 69 dB voor de Wail en 64 voor de Localizer. De Localizer scoort duidelijk minder goed dan de andere twee signalen als het gaat om het geluidsniveau op deze afstanden. Wel is dit type beter detecteerbaar dan de Yelp en de Wail door de hogere frequentie, die geassocieerd wordt met een alarmerender geluid. De Localizer was namelijk al van een afstand van 30 meter te detecteren (op een stadsweg, met omgevingsgeluid), in tegenstelling tot de Yelp en de Wail.

In een onderzoek van Balastegui, et al. (2013) wordt de afstand gemeten waarop de tweetoon, de Yelp en de Wail nog detecteerbaar zijn. Omdat de geluidssignalen in verschillende landen vaak net iets van elkaar verschillen, is voor de volledigheid een overzicht weergegeven van de kenmerken van deze signalen in tabel 4.2.

Tabel 4.2 Kenmerken onderzochte geluidssignalen

Type	Kenmerken	Herhalingsnelheid
Tweetoon (standaard)	450-600 Hz,	33-68 herhalingen/min
Yelp	600-1200 Hz,	180 herhalingen/min
Wail	600-1200 Hz,	12 herhalingen/min

Het onderzoek van Balastegui et al. (2013) is uitgevoerd door gebruik te maken van tien - destijds - veelvoorkomende typen auto's waarbij het geluidsniveau in de auto is gemeten. Het bouwjaar van de auto's varieerde van 1997 tot en met 2009. De geluidssignalen die onderzocht zijn, werden ten tijde van het onderzoek gebruikt door de politie in Barcelona. De gehoordrempels van een gemiddelde veertigjarige en zestigjarige zijn gebruikt voor het meten van de hoorbare afstand van het geluidssignaal. De gehoordrempel is de laagste geluidssterkte die een persoon nog kan waarnemen, vaak uitgedrukt in decibel. Deze drempel is van belang bij het bepalen of het geluidssignaal nog kan worden gehoord bij een bepaald geluidsniveau op een bepaalde afstand. De gehoordrempel kan per persoon verschillen en is onder andere afhankelijk van leeftijd, geslacht en eventuele gehoorbeperkingen of beschadigingen. (D'Angela, 2013; Balastegui et al., 2013).

Uit het onderzoek van Balastegui et al. (2013), bleek dat er geen tot weinig verschil is tussen de maximale afstand waarop de Wail en de Yelp gehoord konden worden. De tweetoon was aanzienlijk eerder hoorbaar dan de Wail en Yelp. In sommige gevallen was de maximale afstand waarop de tweetoon nog hoorbaar was, bijna twee keer zo groot. Wel was er ten opzichte van de veertigjarige sprake van bijna een halvering van de afstand waarop het geluidssignaal gedetecteerd kon worden door de zestigjarige. Deze uitkomst was te verwachten, aangezien de gehoordrempel hoger komt te liggen naarmate de leeftijd toeneemt. De rol die het menselijk gehoor speelt bij de effectiviteit van geluidssignalen komt in het volgende hoofdstuk aan bod.

Er moet opgemerkt worden dat de resultaten van het onderzoek van Balastegui et al. (2013) uitsluitend gebaseerd zijn op de geluidssterkte die is gecorrigeerd voor de gehoordrempel van de mens; andere factoren met invloed op het geluidsniveau zijn niet meegenomen. Zo zijn de testen waarop de onderzoeksresultaten zijn gebaseerd uitgevoerd in een gesloten meetomgeving. Belangrijke factoren, zoals het achtergrondgeluid of het effect van obstakels

op het geluid, zijn niet meegenomen. Daarnaast zijn de resultaten niet gecorrigeerd voor de gehoordrempel van een groter deel van de bevolking, bijvoorbeeld ontvangers van zeventig jaar en ouder (Balastegui et al., 2013).

Een ander onderzoek door Balastegui, et al (2013) is uitgevoerd op een ringweg van Barcelona, waarbij wel rekening is gehouden met eerdergenoemde factoren zoals het geluidsniveau op de openbare weg en de invloed van obstakels. Een gehoordrempel die 95% van de populatie van zestig jarigen omvat is aangehouden. De resultaten van dit onderzoek geven een representatiever beeld van omstandigheden die doorgaans de verspreiding van het geluid beïnvloeden. De Wail is in dit onderzoek vergeleken met de tweetoon. De tweetoon was te detecteren vanaf ongeveer 13 meter, de Wail pas vanaf ongeveer 7 meter. Dit komt overeen met de gemiddelde afstand waarop een geluidssignaal detecteerbaar is in het voertuig van de ontvanger, namelijk circa 12 meter (Balastegui et al., 2013; De Lorenzo et al., 1991; Howard et al., 2011).

4.2 Geluidsniveau rondom het voorrangvoertuig

Het geluidssignaal blijkt niet aan alle zijden van het voorrangvoertuig even effectief te zijn, vanwege de plaats van de luidspreker. De luidspreker is voorin het voorrangvoertuig geplaatst en naar voren gericht. Alleen direct vanaf de as van de luidspreker naar voren (in het verlengde van het voertuig richting de voorkant) is het geluidssignaal maximaal effectief. Aan de voorkant van het voorrangvoertuig is het geluidssignaal het meest nodig, om andere voertuigen te waarschuwen. Aan de andere zijden van het voertuig is de geluidsterkte lager. Naarmate er verder naar de zijkant richting de achterkant van het voorrangvoertuig wordt gemeten, neemt de effectiviteit van het geluid verder af. Daarmee neemt ook het effectieve bereik van het geluid af. Dit kan tot gevolg hebben dat het geluid met wel 11 of 12 dB afneemt, gemeten loodrecht vanaf de as van de luidspreker. De subjectieve 'hoorbaarheid' van het geluidssignaal, neemt in dit geval met meer dan de helft af. Met andere woorden: 'het geluid wordt half zo luid waargenomen' (Angione et al., 2017; D'Angela 2013; Howard, et al., 2011; Maddern, et al., 2011).

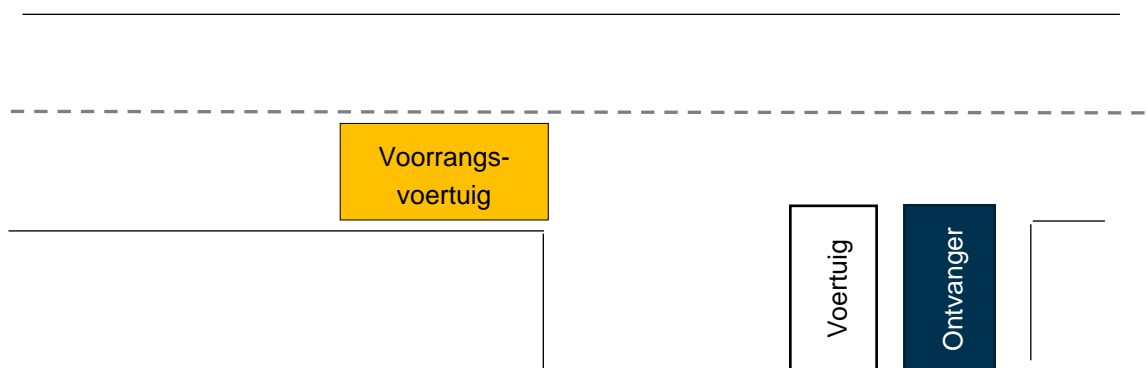
4.3 Plaats op de weg

De plaats op de weg van het voorrangvoertuig, ten opzichte van de positie van de ontvanger, is van invloed op de hoorbaarheid en de lokaliseerbaarheid van het geluidssignaal. Dit komt niet alleen omdat de geluidsterkte niet aan alle zijden van het voorrangvoertuig even hoog is; volgens sommige auteurs straalt het geluid bij hogere frequenties namelijk minder af naar de zijkanten van het voorrangvoertuig. Wanneer de luidspreker van het voorrangvoertuig niet recht op de ontvanger is gericht, worden hogere frequenties minder luid waargenomen dan lagere frequenties (Angione, Novak, D'Angela, & Ule, 2016). Uit experimenten van TNO blijkt echter dat deze bewering niet geldt voor het huidige Nederlandse geluidssignaal en verschillende variaties hierop (Beintema en Van Balken, 2006). De hoorbaarheid van het geluidssignaal wordt wel negatief beïnvloed wanneer het voorrangvoertuig zich in een andere rijbaan bevindt dan de ontvanger, vanwege de eerdergenoemde beperkingen aan het geluidsniveau rondom het voorrangvoertuig. Ook bij een kruising is er sprake van verminderde hoorbaarheid, wanneer beide voertuigen de kruising naderen (Beintema et al., 2006).

4.4 Obstakels

Een andere variabele die het geluidssignaal beïnvloedt is de aanwezigheid van een obstakel tussen het voorrangsvoertuig en de ontvanger. Dit obstakel kan bijvoorbeeld een voertuig of wegmeubilair zijn. Hoe het geluid zich gedraagt als het een obstakel tegenkomt is afhankelijk van de afstand tussen de bron en het obstakel en de aard van het obstakel, zoals grootte en type oppervlak. Ook speelt de golflengte van het geluidsniveau in verhouding tot het obstakel een rol. Wanneer geluid een obstakel tegenkomt, kan het meerdere dingen doen: het geluid kan over het obstakel heen buigen, gereflecteerd worden of geabsorbeerd worden. Afhankelijk van de aard van het obstakel gaat er hierom meer of minder geluid verloren, voordat het de ontvanger bereikt. Laagfrequente geluiden zijn effectiever in het 'buigen' over obstakels (Angione, Novak, D'Angela, & Ule, 2016; D'Angela, Angione, Novak, & Ule, 2013; Beintema et al., 2006).

De aanwezigheid van een ander voertuig tussen de bron en de ontvanger kan het geluidsniveau zodanig reduceren dat de hoorbaarheid flink in het geding komt. Deze situatie die zich vaak voordoet op kruispunten, is schematisch weergegeven in figuur 4.3. De aanwezigheid van een voertuig tussen het voorrangsvoertuig en de ontvanger heeft tot gevolg dat het geluidssignaal minder effectief is, omdat het geluid verspreid aankomt bij de ontvanger. Er is sprake van een gemiddelde afname van 10 dB in geluidsniveau (D'Angela et al., 2013; Beintema et al., 2006).



Figuur 4.3 Voertuig als obstakel bij een kruispunt

In Canada is onderzoek gedaan naar de effectiviteit van de Wail en de Yelp, met een ander voertuig als obstakel. Er is onderzocht welk geluidssignaal beter werd waargenomen door proefpersonen. De Yelp werd door de proefpersonen in 73,4% van de gevallen beter gehoord dan de Wail. Daarentegen presteerde de Wail beter bij de testen op het moment dat een voorrangsvoertuig langs het testvoertuig kwam rijden. Deze situatie doet zich voor als het voorrangsvoertuig op een andere rijbaan naast de ontvanger rijdt of aan het inhalen is. De Wail werd bij dit experiment in 76,6% van de gevallen beter gehoord dan de Yelp (D'Angela et al., 2013).

4.5 Plaats van de luidspreker

De plaats van de luidspreker in Nederlandse (en veel buitenlandse) voorrangsvoertuigen heeft invloed op de kans dat het geluid tegen een obstakel aan botst, voordat het de ontvanger bereikt. Deze kans is relatief groot door de geringe hoogte waarop de luidspreker zich bevindt. Het geluid kan afgeschermd worden door andere voertuigen of objecten rondom het voorrangsvoertuig. In dit geval wordt het geluid meer gereflecteerd en verspreid, waardoor het minder goed aankomt bij de ontvanger. Dit is over het algemeen van negatieve invloed op de hoorbaarheid en ook vaak op de lokaliseerbaarheid van het geluid. Het plaatsen van de luidspreker op het dak kan de kans dat geluid tegen een obstakel aanbots verkleinen. Deze plek, is echter nadelig voor de inzittenden van het voorrangsvoertuig vanwege een te hoge geluidsbelasting. Ook kan het de communicatie in het voorrangsvoertuig verstoren (Howard et al., 2011; Alferdinck et al., 2004; Beintema et al., 2006).

4.6 Achtergrondgeluid

Er is regelmatig sprake van achtergrondgeluid (ook wel ruis) in de auto van de ontvanger wat gevolgen kan hebben voor de hoorbaarheid van geluidssignalen. Achtergrondgeluid kan veroorzaakt worden door geluid van buiten de auto, bijvoorbeeld omgevingsgeluid dat wordt veroorzaakt door ander verkeer. Daarnaast zorgen ook geluidsbronnen in de auto zelf voor achtergrondgeluid, bijvoorbeeld: de autoradio, airconditioning, de motor van de auto of de banden van de auto op het wegdek (Howard et al., 2011). De drempel voor de hoorbaarheid van het geluidssignaal komt hoger te liggen wanneer er sprake is van achtergrondgeluid. Wanneer geluid onder de drempelwaarde blijft, is het niet of nauwelijks hoorbaar voor de ontvanger. Om minimaal hoorbaar te zijn moet het geluidssignaal met 6 tot 10 dB boven het achtergrondgeluid uitkomen. Het geluid van moet zelfs 15 dB tot 20 dB hoger zijn (over het gehele geluidsspectrum) dan het maximale achtergrondgeluidsniveau, om hoorbaar te zijn én daarnaast een snelle reactie van de ontvanger teweeg te brengen (D'Angela, 2013; Howard, et al, 2011; Catchpole, et al., 2007). Daarnaast is het van belang rekening te houden met de geluidsintensiteit die daadwerkelijk gehoord wordt door de ontvanger in de auto; deze is niet evenredig aan de geluidsterkte in dB. Hoe het geluid door de ontvanger gehoord wordt is namelijk afhankelijk van psychoakoestische factoren (zie het volgende hoofdstuk).

4.7 Hoorbaarheid in de auto

Er gaat 20 tot 25 dB verloren – sommige auteurs beweren zelfs tot wel 30 dB - wanneer het geluidssignaal van het voorrangsvoertuig de auto binnendringt. Dit is van negatieve invloed op de hoorbaarheid. Bij hogere frequenties wordt het geluid meer verzwakt, wanneer het de auto binnendringt. Er is gemiddeld genomen 72 dB nodig (in de auto) om het geluidssignaal te kunnen horen (Beintema et al., 2006; Howard et al., 2011). Dit is het geluidsniveau waarbij het relatief stil is in de auto; achtergrondgeluid is dan beperkt aanwezig. Wanneer er wordt uitgegaan van een geluidverlies van ongeveer 30 dB in de auto, betekent dit dat buiten de auto minimaal 100 dB vereist is (Howard et al., 2011, p. 46). Als bovenstaande geluidsniveaus niet bereikt worden, zal het geluid van het geluidssignaal niet boven het achtergrondgeluid uitkomen en niet of maar zeer beperkt hoorbaar zijn voor de ontvanger.

De beschrijving hierboven is een indicatie voor het vereiste geluidsniveau van het geluidssignaal. Voor het geluid van de tweetoon geldt dat het moeilijk te voorspellen is wanneer het geluidssignaal boven het achtergrondgeluid uitkomt. Dit komt omdat de geluidsterkte (inclusief de geluidsdruk) niet constant is, door het wisselen van toon en door diverse invloeden vanuit de omgeving die de hoeveelheid achtergrondgeluid bepalen (Beintema et al., 2006).

4.8 Geluiddichtheid moderne auto's

De geluidsdichtheid van moderne auto's is een van de redenen waarom het tegenwoordig moeilijker is om ontvangers in de auto te waarschuwen met het geluidssignaal (Angione et al., 2016; Beintema et al., 2006). In auto's die minder geïsoleerd zijn (vaak oudere auto's) blijkt het goed mogelijk de richting van het geluidssignaal te bepalen (Beintema en Van Balken, 2006), terwijl nieuwe auto's zo ontworpen zijn dat omgevingslawaai van buiten de auto gereduceerd wordt; uiteraard geldt dit dan ook voor het geluidssignaal van een voorrangvoertuig. De mate van geluidsverlies in de auto, is afhankelijk van de structuur van het voertuig, het interieur en de mate waarin geluid in de auto wordt gedempt (Catchpole & Mckeown, 2007).

De lage frequenties van het geluidssignaal dringen beter door in moderne auto's dan hoge frequenties (boven de 8 kHz), waar vaak sprake is van geluidsverlies door een goede isolatie. Juist hoge frequenties bevorderen echter het lokaliseren van het geluidssignaal. Het lokaliseren van het geluid komt aan bod in paragraaf 4.1.10 (D'Angela et al., 2013; Howard et al., 2011; Maddern et al., 2011).

Het reduceren van geluid in moderne auto's kan twee kanten op werken. Enerzijds is het geluidssignaal over het algemeen beter hoorbaar wanneer achtergrondgeluid in de auto gereduceerd wordt. Anderzijds kan geluidsdichtheid door isolatie er ook voor zorgen dat het geluidssignaal (en ander geluid) dat van buiten de auto komt, wordt verzwakt wanneer het doordringt tot in de auto. Het feit dat auto's van binnen stiller zijn geworden, compenseert de betere isolatie van de voertuigen voor een klein deel (Catchpole & Mckeown, 2007; Alferdinck et al., 2004).

4.9 De autoradio

Zoals eerder genoemd zijn er vaak geluidsbronnen aanwezig in de auto. Dit kan bijvoorbeeld de autoradio zijn. Met name muziek luisteren zorgt voor een verminderde hoorbaarheid van het geluidssignaal. Dit is van grotere negatieve invloed op de hoorbaarheid van het geluidssignaal dan de geluidsisolatie van moderne voertuigen (Alferdinck et al., 2004). Wanneer de autoradio aan is, is er een geluidsniveau van ongeveer 83 dB nodig in de auto en ongeveer 106 dB buiten de auto, wil het geluidssignaal hoorbaar zijn (Howard et al., 2011). Dit geluidsniveau ligt dicht aan tegen het maximale geluidsniveau dat door de wetgever is vastgesteld.

Door Howard et al. (2011) zijn praktijktesten gedaan met een spelende autoradio als achtergrondgeluid. Hierbij is de Australische Wail getest (met 800-1700 Hz en een

herhalingsfrequentie van 4.92 seconden). Uit de resultaten van deze testen bleek dat het geluidssignaal maar net boven de grenswaarde van het achtergrondgeluid uitkwam wanneer de radio aan stond. Met andere woorden: het geluidssignaal was maar net hoorbaar. Het geluid van de autoradio, met een gemiddeld achtergrondgeluidsniveau en de ramen gesloten, leverde 78 dB op. Ter vergelijking: wanneer de radio niet aan was en de condities hetzelfde zijn als bij voorgaande situatie, was er sprake van 58 dB aan achtergrondgeluid. Geen radiogeluid en de autoramen open, zorgde voor 66 dB (Howard et al., 2011, p. 49). Een geluidssignaal is pas goed hoorbaar als het voorrangvoertuig het voertuig van de ontvanger tot op 8-12 meter (of dichterbij) heeft genaderd. Deze afstand geeft de ontvanger echter niet genoeg tijd om veilig en tijdig te anticiperen op het voorrangvoertuig (Howard et al., 2011; Balastegui et al., 2013; De Lorenzo & Eilers, 1991).

Balastegui, et al. (2013) hebben onderzoek gedaan naar de detecteerbare afstand van het geluidssignaal met de autoradio aan. Er zijn metingen gedaan voor de Wail en de tweetoon. Er is onderscheid gemaakt tussen verschillende geluidsvolumes van de autoradio: comfortabel en luid. Het aantal decibel voor beide radiovolumes is niet gespecificeerd. Het totale niveau van het achtergrondgeluid in de auto - met de radio op comfortabel niveau - was 77 dB. Een achtergrondgeluidsvolume van 83 dB werd gemeten bij een luid radiovolume. De Wail werd bij een comfortabel radiogeluid gedetecteerd op een afstand van 9 meter. De tweetoon werd op een afstand van 7 meter gedetecteerd. Bij een luid radiogeluid werden deze afstanden aanzienlijk kleiner, zowel voor de Wail als de tweetoon slechts drie meter. Voor het onderzoek is uitgegaan van een gehoordrempel van 95% van de zestigjarigen. Het is goed mogelijk dat mensen ouder dan 60 jaar of mensen met een gehoorbeperking, het geluidssignaal pas op een nog kortere afstand waarnemen (Balastegui, et al., 2013).

4.10 Het lokaliseren van het geluidssignaal




Wanneer iemand een geluidssignaal hoort, is het van belang dat hij of zij weet uit welke richting het geluid afkomstig is. Wanneer het correct gelokaliseerd is, kan de ontvanger reageren op het naderende voorrangvoertuig. Voor de mens is het niet eenvoudig het geluidssignaal (correct) te lokaliseren. Aspecten die hierop van invloed zijn vanuit de psychoakoestiek komen in het volgende hoofdstuk aan bod. Het lokaliseren van het geluidssignaal wordt naast psychoakoestische factoren ook beïnvloed door fysieke factoren, die hier besproken worden. Zo speelt de gesloten omgeving van de auto van de ontvanger een rol; wanneer het geluidssignaal eenmaal doorgedrongen is tot in de auto van de ontvanger, blijkt het moeilijker te lokaliseren dan buiten de auto. Het geluid verspreidt zich namelijk binnen de gesloten omgeving van de auto, waardoor de oorspronkelijke richting moeilijker te achterhalen is (D'Angela et al., 2013; Howard et al., 2011). Een complicerende factor is de aanwezigheid van achtergrondgeluid in de auto. Hierdoor kunnen bijvoorbeeld voor-achter, of links-rechts verwisselingen optreden bij de ontvanger (Angione et al., 2017; D'Angela et al., 2013).

4.11 Verschillen tussen geluidssignalen bij de geluidsverspreiding

In tabel 4.3 is een overzicht weergegeven van de verschillend geluidssignalen die in dit onderzoek centraal staan en hun prestaties - bij de verspreiding van het geluid - in bepaalde situaties. Wanneer er n.v.t in de cel staat, zijn de geluidssignalen voor deze situatie niet met elkaar te vergelijken of is er geen onderzoek gedaan naar dit aspect.

Tabel 4.3 Overzicht geluidssignalen per situatie

Situatie ²	Yelp	Wail	Localizer	Tweetoon
<i>Afstand tussen bron en ontvanger</i>				
Afstand geluidsbereik in meters, gemeten in voertuig ontvanger.	Ca. 15 m	Ca. 15 m	Ca. 30 m	Ca. 30 m
Geluidsniveau op 0-30 meter (van voren gemeten, buiten het voertuig, in de open lucht).	110-83 dB	110-83 dB	110-83 dB	n.v.t.
<i>Plaats op de weg</i>				
Hoorbaarheid bij inhaal-test met een ander voertuig dat inhaalt.		76,6% beter dan Yelp	n.v.t.	n.v.t.
<i>Obstakels</i>				
Hoorbaarheid bij een voertuig (obstakel) tussen bron en ontvanger	73,4% beter dan de Wail		n.v.t.	n.v.t.
<i>Hoorbaarheid in de auto</i>				
Detecteerbare afstand in meters, gemeten in het voertuig van de ontvanger.	n.v.t.	Ca. 7 m	n.v.t.	Ca. 13 m
Geluidsniveau gemeten in het voertuig van de ontvanger.	71-68 dB	72-69 dB	69-64 dB	n.v.t.
<i>De autoradio</i>				
Hoorbaarheid bij radiogeluid in de auto van de ontvanger.	n.v.t.	9 m	n.v.t.	7 m

	Beste prestatie (ten opzichte van andere onderzochte geluidssignalen)
	Minder goede prestatie
	Nog minder goede prestatie

² De resultaten weergegeven in tabel 4.3 zijn afkomstig uit verschillende onderzoeken. Het onderling vergelijken van de situaties weergegeven in de tabel is daarom niet mogelijk. Het vergelijken van de verschillende typen geluidssignalen voor één situatie is wel mogelijk, omdat het eenzelfde onderzoek betreft.

4.12 Deelconclusie

Het type luidspreker dat het geluidsniveau produceert, bepaalt in welke mate het geluid hoorbaar is rondom het voorrangvoertuig. Ook afstand speelt hierbij een rol. Het geluidssignaal is het effectiefst aan de voorkant van het voorrangvoertuig; dit is ook de plaats waar de effectiviteit het hoogst moet zijn om andere weggebruikers te waarschuwen. Vanwege de plaats van de luidspreker op het voorrangvoertuig, kan het geluid tegen obstakels aan botsen. Over het algemeen is dit van negatieve invloed op het geluidsniveau en de lokaliseerbaarheid van het geluid. Daarnaast kan achtergrondgeluid - van buiten of in de auto - ervoor zorgen dat het geluidssignaal minder goed te horen is, omdat het niet boven het achtergrondgeluid uitkomt. Ook kan de geluidsisolatie van de auto geluid van buitenaf - waaronder het geluidssignaal - reduceren. Dit is met name het geval bij moderne auto's. Tot slot is het van belang dat het geluidssignaal correct gelokaliseerd wordt, zodat de ontvanger kan anticiperen op het voorrangvoertuig. Door de gesloten omgeving van de auto van de ontvanger, wordt het moeilijker de oorspronkelijke richting van het geluidssignaal te achterhalen.

5 De ontvanger van het geluidssignaal

Met de resultaten uit dit hoofdstuk kan de volgende deelvraag worden beantwoord: c) welke factoren zijn van invloed op het ontvangen van het geluidssignaal?

Het geluidssignaal van een voorrangsvoertuig is pas effectief als het door de ontvanger gehoord en als zodanig geïnterpreteerd wordt en het geluid daarnaast correct te lokaliseren is. Dit is niet alleen afhankelijk van de fysieke factoren die in de vorige hoofdstukken aan bod zijn gekomen. Ook de psychoakoestische component speelt hierbij een rol. Psychoakoestiek gaat over de waarneming en interpretatie van het geluid door de ontvanger en komt in dit hoofdstuk aan bod.

5.1 Psychoakoestiek

Het waarnemen en interpreteren van geluidssignalen is een complex proces. De omstandigheden waaronder geluidssignalen doorgaans worden waargenomen, brengen een aantal moeilijkheden met zich mee voor de menselijke cognitie en het gehoor. Allereerst is de geluidsterkte niet gelijk aan het volume van het geluid zoals dat waargenomen wordt door de mens.

Geluidsterkte en waargenomen 'luidheid'

Om een verandering in geluidsniveau waar te nemen, is een minimale verandering van 3 dB nodig. Hoe luid mensen een geluid horen wanneer de geluidsterkte toeneemt, is niet gelijk aan de toename van het geluidsniveau in dB. Zo wordt een toename van 5 dB waargenomen als een toename die niet veel invloed heeft op het volume, maar wordt een toename van 10 dB als erg luid ervaren (D'Angela, 2013).

Een mens kan geluid van 20 Hz tot 20 kHz waarnemen. Het geluid van de Nederlandse tweetoon - en andere geluidssignalen - omvat maar een klein deel van dit bereik. Niet alle frequenties van het geluid worden even goed worden waargenomen. Het menselijk oor kan hoge en lage frequenties minder goed waarnemen dan een gemiddelde frequentie van rond de 1000 Hz (D'Angela, 2013).

5.2 De gehoordrempel van de mens

De hoorbaarheid van het geluidssignaal is naast fysieke factoren die de hoorbaarheid bepalen, ook afhankelijk van de gehoordrempel van de mens. Deze drempel is persoonsafhankelijk. Over het algemeen wordt de gehoordrempel van de mens hoger naarmate de leeftijd toeneemt en als er sprake is van een gehoorbeschadiging. Een hogere gehoordrempel betekent dat het geluidsniveau hoger moet zijn om te worden waargenomen. Bij ouderen is ongeveer 8 dB extra nodig om het geluidssignaal te kunnen horen (Slawinski, & MacNeil, 2002).

5.3 Aandacht voor en opmerken van het geluidssignaal

Mensen die bezig zijn met een taak die aandacht vereist (bijvoorbeeld autorijden) detecteren geluid minder snel dan wanneer ze niet bezig zijn. Er is bij een taak die de aandacht vereist ongeveer 10 dB extra nodig om geluid te horen (Howard, et al, 2011). Een algemeen principe is dat, hoe meer aandacht de taak vereist, hoe groter het onderscheid moet zijn tussen het achtergrondgeluid en het geluidssignaal (Proctor & Van Zandt, 2018).

5.4 Herkenbaarheid van het geluidssignaal

Een geluidssignaal moet herkenbaar zijn als waarschuwingssignaal. De term 'percieved urgency' wordt gebruikt om de urgentie aan te duiden van het geluid, zoals het door de ontvanger wordt waargenomen. In andere woorden is dit het subjectief waarnemingsvermogen. De mate waarin een geluid alarmerend is, is een van de factoren die van invloed zijn op de reactietijd van de ontvanger nadat het geluid is waargenomen. De reactietijd en de daadwerkelijke reactie zijn afhankelijk van perceptie van het geluidssignaal door de ontvanger (Lenné, Triggs, Mulvihill, Regan, & Corben, 2008; Maddern et al., 2011).

De percieved urgency wordt het meest beïnvloed door de snelheid waarmee de bron van het geluid zich herhaalt. Een geluid dat zich snel herhaalt, wordt waargenomen als 'alarmerender' dan een geluid dat zich langzaam herhaalt. Canadees onderzoek heeft laten zien dat de Wail die zich langzamer (4.11 s) herhaalt dan de Yelp (0.35 s), als minder urgent wordt waargenomen. Naast de herhalingsnelheid, is de schrilheid van het geluid ook van invloed. De Yelp heeft een schriller geluid (een complexere blok golf) dan de Wail, wat ervoor kan zorgen dat de waargenomen urgentie wordt verhoogd (D'Angela et al., 2013; Howard et al., 2011). Doordat de geluidseigenschappen van de Localizer minder gangbaar zijn dan die van andere typen geluidssignalen, is de Localizer minder goed te herkennen als waarschuwingssignaal. Dit heeft met name te maken met de perceptie van het geluid door de ontvanger; de Localizer wordt minder snel herkend als waarschuwingssignaal (Catchpole et al., 2007, p. 1294).

5.5 Invloed van muziek

In het vorige hoofdstuk is ingegaan op het gebruik van de autoradio en het effect hiervan op de hoorbaarheid van het geluidssignaal. Muziek vertoont overeenkomsten met de kenmerken van het geluidssignaal en kan de emotionele gemoedstoestand van de ontvanger beïnvloeden. Dit werkt drempelverhogend, waardoor het geluidssignaal nog luider moet zijn om te worden waargenomen. Muziek beluisteren in de auto geeft een gemiddelde verhoging van de waarnemingsdrempel van 6 tot 7 dB. “Zelfs wanneer het totale niveau van het achtergrondgeluid in de auto (met of zonder muziek) gelijk blijft, is met muziek aan een 6-7 dB luider geluidssignaal nodig om het geluid te kunnen waarnemen (Alferdinck et al., 2004, p. 22)”. Volgens sommige auteurs kan de waarnemingsdrempel van ouderen zelfs oplopen tot 15 dB bij het beluisteren van muziek (Alferdinck et al., 2004).

5.6 Lokaliseren van geluid

Om indien nodig uit te kunnen wijken, is het essentieel dat de ontvanger die het geluidssignaal hoort, kan begrijpen wat zijn positie is ten opzichte van het voorrangvoertuig (Beintema et al., 2006). Een ontvanger moet aan de hand van het geluidssignaal kunnen bepalen waar het voorrangvoertuig zich bevindt. Het lokaliseren van een geluidssignaal is niet eenvoudig, aangezien zowel het voertuig van de ontvanger als het voorrangvoertuig zich door het verkeer bewegen. Mensen hebben over het algemeen moeite met het correct herkennen van de richting van een geluid dat in beweging is. Wanneer het geluid van voren komt is dit het gemakkelijkst te lokaliseren, gevolgd door geluid van achteren. Daarentegen is het lokaliseren van geluid een stuk moeilijker wanneer de geluidsbron zich van de voorkant van de ontvanger, naar de zijkant beweegt (Boslem, Moore, & Charisis, 2011). Deze situatie doet zich bijvoorbeeld voor wanneer er van rijbaan gewisseld wordt, waardoor de voertuigen zich niet meer in dezelfde rijbaan bevinden.

Mensen met verminderd gehoor - met name ouderen - kunnen een geluidssignaal minder goed horen en lokaliseren. Vooral als het geluid van achteren komt is het minder goed te lokaliseren door mensen met gehoorverlies. Hierdoor treden voor-achter verwisselingen op; de richting van het geluid wordt dan verkeerd ingeschat. Voor-achter verwisselingen komen vooral voor wanneer hogere frequenties niet goed gehoord worden, niet alleen omdat juist deze frequenties bij gehoorverlies minder goed worden waargenomen, maar bijvoorbeeld ook omdat deze in moderne voertuigen worden afgezwakt. Specifiek hoge tonen zijn echter belangrijk bij het bepalen of het geluid van voren of van achteren komt (Beintema; Van Balken, 2006; Ben Jemaa et al., 2018; Edworthy & Hellier, 2006; Catchpole & Mckeown, 2007). Ook wordt vaak de afstand van het voorrangvoertuig tot de ontvanger overschat door de ontvanger. Dit heeft tot gevolg dat de ontvanger denkt dat het voorrangvoertuig tot twee keer zo ver weg is, dan daadwerkelijk het geval is. (Beintema et al., 2006; Catchpole & Mckeown, 2007).

5.7 Verschillen tussen geluidssignalen bij het ontvangen van het geluid

In tabel 5.1 is een overzicht weergegeven van de verschillend geluidssignalen en de prestaties - bij het ontvangen van het geluid - in bepaalde situaties. Wanneer er n.v.t in de cel staat, zijn de geluidssignalen voor deze situatie niet met elkaar te vergelijken of is er geen onderzoek gedaan naar dit aspect.

Tabel 5.1 Overzicht geluidssignalen per situatie

Situatie	Yelp	Wail	Localizer	Tweetoon
<i>Herkenbaarheid van het geluidssignaal</i>				
Percieved urgency; de mate van urgentie die het geluid oproept	55, herh./min,	11/12 herh./min	n.v.t.	55 herh./min
Mate van herkenbaarheid (perceptie als zijnde waarschuwingssignaal)	n.v.t.	n.v.t.	Slecht herkenbaar	n.v.t.

Beste prestatie (ten opzichte van andere onderzochte geluidssignalen)
 Minder goede prestatie

5.8 Deelconclusie

Het waarnemen en interpreteren van een geluidssignaal is een complex proces voor de mens als ontvanger. De effectiviteit van de geluidsbron en de verspreiding spelen hierbij een belangrijke rol. De gehoordrempel is een – persoonsafhankelijke - variabele die bepaalt of geluid met een zekere geluidsterkte en frequentie hoorbaar is voor de ontvanger. Het horen en lokaliseren van het geluidssignaal is moeilijker met een gehoorbeperking. Wanneer een ontvanger bezig is met een andere taak die de aandacht vereist, wordt het geluidssignaal minder snel opgemerkt. Wanneer het geluidssignaal opgemerkt is, moet voldoende alarmerend zijn om een reactie van de ontvanger teweeg te brengen. Als de herhalingsnelheid van het geluid hoger ligt, is het meer alarmerend. Dit is ook het geval wanneer het geluid schriller is. Het beluisteren van muziek geeft gemiddeld een verhoging van de waarnemingsdrempel van 6 tot 7 dB, bij ouderen kan dit nog hoger zijn. Tot slot wordt vaak de afstand tot het voorrangvoertuig overschat, terwijl het voorrangvoertuig in werkelijkheid al dichterbij het voertuig van de ontvanger is.

6 Conclusie en beschouwing

6.1 Conclusie

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de centrale vraagstelling van dit onderzoek aan de hand van de gestelde deelvragen.

Deelvraag 1: Welke factoren beïnvloeden de effectiviteit van de geluidsbron?

De effectiviteit van de geluidsbron wordt beïnvloed door de kenmerken evenals de beperkingen van de luidspreker die het geluidssignaal produceert. De effectiviteit van de geluidsbron wordt ook beïnvloed door de plaats van de luidspreker op het voorrangvoertuig. De luidspreker is vaak ter hoogte van de grille op het voorrangvoertuig geplaatst. Dit heeft als voordeel dat geluidsoverlast voor de inzittenden van het voorrangvoertuig beperkt wordt. Ook is de richting waarin de luidspreker is geplaatst - net als de hoek waaronder deze is geplaatst - bepalend voor de effectiviteit van de geluidsbron. Wind of (lucht)druk als gevolg van het voortbewegen van het voertuig zijn niet van negatieve invloed op het geluidsniveau dat uit de luidspreker komt.

Deelvraag 2: Welke factoren zijn van invloed op de verspreiding van het geluid?

Verschillende fysieke factoren zijn van invloed op de verspreiding van het geluid en de hoorbaarheid hiervan. Logischerwijs neemt bij een grotere afstand de hoorbaarheid van het geluidssignaal af. Er treden echter wel verschillen op per type geluidssignaal voor de afstand waarop het geluid nog hoorbaar is, als gevolg van verschillen in geluidskarakteristieken. De plaats van de luidspreker op het voertuig is van invloed op de verspreiding van het geluid. De geluidsterkte is niet aan elke zijde van het voertuig gelijk. Het geluidssignaal is het meest effectief aan de voorzijde van het voorrangvoertuig, richting de zij- of achterkant van het voertuig neemt het de geluidsterkte af, waardoor het effectieve bereik kleiner wordt. Ook speelt de plaats op de weg van het voorrangvoertuig, ten opzichte van andere voertuigen een rol bij de verspreiding van het geluid en de hoorbaarheid van het signaal voor de ontvanger. Wanneer het voorrangvoertuig zich niet in dezelfde baan bevindt als de ontvanger of bij een kruising is het geluidssignaal minder goed hoorbaar, dan wanneer beide voertuigen zich in dezelfde rijbaan bevinden. Daarnaast zijn obstakels van invloed op de verspreiding van het geluid. Obstakels kunnen - afhankelijk van hun aard - de verspreiding van het geluid in meer of mindere mate belemmeren, waardoor het geluid gereduceerd aankomt bij de ontvanger. De kans dat het geluid bij het verlaten van de luidspreker tegen een obstakel aanbotst is aanzienlijk, vanwege de geringe hoogte van de luidspreker op het voertuig.

Ook achtergrondgeluid kan gevolgen hebben voor de hoorbaarheid van het geluidssignaal. Dit kan zowel achtergrondgeluid in de omgeving van het voorrangvoertuig zijn, als geluid in de auto van de ontvanger. Achtergrondgeluid kan op allerlei verschillende manieren veroorzaakt worden en afhankelijk van het geluidsniveau drempelverhogend werken. Met name het gebruik van de radio of het luisteren naar muziek kan de hoorbaarheid negatief

beïnvloeden. Om effectief te zijn moet het geluidssignaal boven het achtergrondgeluid uit komen en moet het geluidsniveau nog zodanig zijn dat het hoorbaar is voor de ontvanger. Wanneer het geluid van het geluidssignaal zich verspreidt en de auto van de ontvanger binnendringt wordt de hoorbaarheid het geluidssignaal aanzienlijk gereduceerd; het geluidsniveau neemt dan in behoorlijke mate af. Daarnaast verspreidt het geluid zich binnen de gesloten omgeving van de auto wat ervoor zorgt dat de oorspronkelijk richting van de geluidsbron moeilijker te achterhalen is. Dit is van negatieve invloed op de lokaliseerbaarheid en daarmee ook op de effectiviteit van het geluidssignaal.

Deelvraag 3: Welke factoren zijn van invloed op het ontvangen van het geluidssignaal?

Kenmerken van de mens, als ontvanger van het geluidssignaal, spelen een belangrijke rol bij de mate waarin een geluidssignaal effectief is en erop geanticipeerd wordt. De gehoordrempel van de mens is een van de factoren die van invloed is op de hoorbaarheid van het geluidssignaal voor de mens. Deze drempel is niet alleen afhankelijk van kenmerken van de mens, maar kan ook hoger worden naarmate er sprake is van achtergrondgeluid of andere drempelverhogende invloeden. Wanneer het geluidssignaal hoorbaar is voor de mens, moet het daarnaast ook opgemerkt worden en correct geïnterpreteerd worden als waarschuwingssignaal. Het geluid moet voldoende alarmerend zijn. Wanneer de herhalingsnelheid hoger ligt, wordt het als meer alarmerend ervaren. Wanneer men bezig is met een taak, bijvoorbeeld autorijden, dient het onderscheid tussen het geluidssignaal en achtergrondgeluid nog groter te zijn, wil het geluidssignaal opgemerkt worden. De mate waarin het geluidssignaal alarmerend is, is van invloed op de interpretatie als waarschuwingssignaal. De invloed van muziek als achtergrondgeluid, is met name drempelverhogend bij het waarnemen van het geluidssignaal omdat de geluidskennmerken van muziek, overeenkomsten vertonen met die van het geluidssignaal. De waarnemingsdrempel van de ontvanger kan met 6 tot 7 dB worden verhoogd, wanneer er naar muziek wordt geluisterd. Bij ouderen kan dit nog verder oplopen. Ook worden er vaak problemen ondervonden met het (correct) lokaliseren van het geluidssignaal. De richting van de geluidsbron en de afstand tot de geluidsbron worden vaak verkeerd ingeschat vanwege beperkingen van het menselijk gehoor en omdat een bewegende geluidsbron moeilijk te lokaliseren is.

Centrale vraagstelling: Welke factoren zijn van invloed op de effectiviteit van geluidssignalen van voorrangsvoertuigen?

Diverse factoren zijn van invloed op de effectiviteit van geluidssignalen. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen de fysieke factoren en psychoakoestische factoren die een rol spelen bij de effectiviteit van het geluidssignaal. Met name fysieke factoren spelen een rol bij de effectiviteit van de geluidsbron en de verspreiding van het geluid. Kenmerken van de mens en geluidskennmerken van het geluidssignaal, spelen een belangrijke rol bij het ontvangen van het geluidssignaal.

De effectiviteit van het geluidssignaal wordt sterk bepaald door twee componenten, dit zijn de hoorbaarheid en de lokaliseerbaarheid. Hoorbaarheid is met name afhankelijk van de geluidsterkte en andere geluidskennmerken zoals de herhalingsnelheid, toonhoogte en frequentie, die bepalen op welke wijze het geluid bij de ontvanger terecht komt en hoe het geïnterpreteerd wordt. De mate van lokaliseerbaarheid van het geluidssignaal hangt met name af van de hoogte van de frequentie van het geluid. Daarnaast spelen ook menskenmerken - met name de beperkingen van het menselijk gehoor, het bewegen

van de geluidsbron en ontvanger, net als de gesloten omgeving van de auto waarin het geluid wordt gereflecteerd, een rol bij de lokalisatie.

Er is een theoretisch optimum van het geluidssignaal dat vastgelegd is in wet- en regelgeving. Echter blijkt in de praktijk dat met name tijdens de verspreiding van het geluid, diverse factoren de effectiviteit van ervan beïnvloeden. De mate waarin het geluidssignaal (negatief) beïnvloed wordt, is niet alleen situatieafhankelijk, ook kunnen factoren elkaar onderling beïnvloeden en spelen de kenmerken van de mens een belangrijk rol. In veel situaties is geen sprake van een optimale hoorbaarheid en lokaliseerbaarheid van het geluidssignaal, omdat diverse factoren het geluid beïnvloeden van de bron tot de ontvanger. Met name de geluidsdichtheid van moderne auto's en het luisteren naar muziek of naar de radio, is van negatieve invloed op de effectiviteit van de geluidssignalen.

6.2 Beschouwing

De resultaten zijn afkomstig uit voornamelijk niet-Nederlands onderzoek, dat vaak gericht was op slechts enkele kenmerken van geluidssignalen in bepaalde situaties of op een beperkt aantal typen geluidssignalen. Geluidssignalen uit niet-Nederlands onderzoek hebben vaak andere geluidskenmerken, ondanks dat ze vaak dezelfde naam hebben. Daarom was het vergelijken van geluidssignalen uit verschillende onderzoeken vaak moeilijk of soms helemaal niet mogelijk.

Doordat er voor deze studie slechts een beperkt aantal factoren is meegenomen, kent zij blinde vlekken. Voorbeelden van dergelijke blinde vlekken zijn: het dopplereffect, de invloed van weersomstandigheden en de invloed van verkeersdrukke. Vervolgonderzoek kan zich richten op het verkrijgen van inzicht in deze elementen en op de samenhang tussen verschillende factoren.

Dit onderzoek richt zich alleen op geluidssignalen, terwijl voorrangsvoertuigen in Nederland volgens de Nederlandse wetgeving gebruik maken van zowel optische als geluidssignalen wanneer zij een dringende taak te vervullen hebben. Mogelijk is het zo dat wanneer het geluidssignaal in mindere mate effectief is, optische signalen deze verminderde effectiviteit (deels) kunnen compenseren. Verder onderzoek zou duidelijkheid kunnen verschaffen over de samenhang tussen beide signalen.

Waar dit mogelijk was is een vergelijking gemaakt tussen de prestaties van verschillende typen geluidssignalen. Deze vergelijking is echter niet compleet en kan ook niet als zodanig gezien worden om het 'beste' geluidssignaal aan te wijzen. Daarnaast is er niet een geluidssignaal dat beter presteert dan andere geluidssignalen. Er treden per situatie verschillen op als gevolg van de invloed van fysieke en psychoakoestische factoren. De (effectiviteit van) de Nederlandse tweetoon is nog niet vergeleken met andere geluidssignalen in wetenschappelijk onderzoek.

Literatuurlijst

- Alferdinck, J.W.A.M., Drullman, R., Griffioen, H.J., Martens, M.H. TNO (2004). *Voorrangssignalen opnieuw belicht*.
- Angione, F., Novak, C., Imeson, C., Lehman, A., Merwin, B., Pagliarella, T. Ule, H. (2016). Study of a low frequency emergency siren in comparison to traditional siren technology. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 29(1). <https://doi.org/10.1121/2.0000601>
- Angione, F., Novak, C., D'Angela, P., & Ule, H. (2017). Acoustic localization of an electronic emergency siren. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 29(1). <https://doi.org/10.1121/2.0000507>
- Balastegui, A., Romeu, J., Clot, A., & Martín, S. R. (2013). New siren tones optimised for increased detectability distances of emergency vehicles. *Applied Acoustics*, 74(6), 803–811. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.12.007>
- Beintema, J.A.; Van Balken, J. S. (2006). *TNO-rapport Optimalisatie Geluidssignalen Voorrangsvoertuigen*. Retrieved from www.tno.nl
- Beintema, J.A., & Eisses, A.R. (2010). *Meetmethode tweetonige hoornsignaal op voorrangsvoertuigen*.
- Ben Jemaa, A., Irato, G., Zanela, A., Brescia, A., Turki, M., & Jaïdane, M. (2018). Congruent auditory display and confusion in sound localization: Case of elderly drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 59, 524–534. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.06.020>
- Boslem, S., Moore, D., & Charisis, V. (2011). *Investigating the Improvement of the Localisation Propensity and Impact of the Emergency Vehicle Sirens*: SAE International, p. 9. Geraadpleegd op 3 september.
- Catchpole, K., & Mckeown, D. (2007). A framework for the design of ambulance sirens. *Ergonomics*, 50(8), 1287–1301. <https://doi.org/10.1080/00140130701318780>
- D'Angione, F., Novak, C., D'Angela, P., & Ule, H. (2016). Acoustic localization of an electronic emergency siren. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 29(1). <https://doi.org/10.1121/2.0000507>
- D'Angela, P. (2013). *Emergency Vehicle Siren Noise Effectiveness*. Retrieved from <https://scholar.uwindsor.ca/etd/4967>
- D'Angela, P. J., Angione, F., Novak, C., & Ule, H. (2013). The effect of the shadowing phenomenon on emergency vehicle siren noise. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 19. <https://doi.org/10.1121/1.4800425>
- De Lorenzo, R. A., & Eilers, M. A. (1991). Lights and siren: A review of emergency vehicle warning systems. *Annals of Emergency Medicine*, 20(12), 1331–1335. [https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(05\)81076-5](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(05)81076-5)
- Edworthy, J., & Hellier, E. (2006). Alarms and human behaviour: Implications for medical alarms. *British Journal of Anaesthesia*, 97(1), 12–17. <https://doi.org/10.1093/bja/ael114>
- Howard, C. Q., Aaron, J. M., & Eleferios, P. P. (2011). Acoustic characteristics for effective ambulance sirens. *Acoustics Australia*, 39(2), 43–53.
- Lenné, M. G., Triggs, T. J., Mulvihill, C. M., Regan, M. A., & Corben, B. F. (2008). Detection of emergency vehicles: Driver responses to advance warning in a driving simulator. *Human Factors*, 50(1), 135–144. <https://doi.org/10.1518/001872008X250557>
- Maddern, A. J., Privopoulos, E. P., & Howard, C. Q. (2011). *Emergency Vehicle Auditory Warning Signals: Physical and Psychoacoustic Considerations*.
- National Institute of Justice (2000). *Guide to Test Methods, Performances Requirements, and Installation Practices for Electronic Siren Used on Law Enforcement Vehicles*. Geraadpleegd op 15 oktober 2019.
- Proctor, R. W., & Van Zandt, T. (2018). *Human factors in simple and complex systems*. CRC press.

- Reglement verkeersregels en verkeerstekens 1990 (1990, 26 juli) retrieved from
<https://wetten.overheid.nl/BWBR0004825/2019-07-01>
- Regeling optische en geluidssignalen 2009 (2009, 1 maart) retrieved from
<https://wetten.overheid.nl/BWBR0025357/2017-09-01>
- Slawinski, E. B., & MacNeil, J. F. (2002). Age, music, and driving performance: Detection of external warning sounds in vehicles. *Psychomusicology: A Journal of Research in Music Cognition*, 18(1-2), 123-131. <http://dx.doi.org/10.1037/h0094047>
- TNO (2010). [begeleidend schrijven] demo tweetoonsignalen; voorbeelden geluidssignalen voorrangvoertuigen.

Bijlage 1 Definities

Tenzij anders vermeld, zijn de definities in deze lijst afkomstig uit *Het Nederlands Leerboek Audiologie* van de Nederlandse Vereniging voor Audiologie (2000-2019).

- > **Achtergrondgeluid (ruis):** geluid dat naast het primaire - gewenste - geluid aanwezig is in het voertuig van de ontvanger.
- > **Decibel (dB):** de eenheid voor de geluidssterkte ten opzichte van een referentieniveau.
- > **Detecteerbaar:** een (minimum) geluidssterkte die nog hoorbaar is voor de mens. vaak gecorrigeerd voor de gehoordrempel wat resulteert in dB(A).
- > **Frequentie:** verspreiding van akoestische energie. Het aantal trillingen per seconde. De eenheid voor frequentie is Hertz (Hz);
- > **Frequentiespectrum:** gebied van frequenties (frequentiebereik) van het signaal.
- > **Gehoordrempel:** de minimaal vereiste intensiteit voor het horen van de tonen. Vaak wordt gebruik gemaakt van een gehoordrempel die het gehoor van de gemiddelde populatie representeert - die vervolgens wordt gecorrigeerd voor de geluidssterkte - om vast te kunnen stellen of het geluid nog hoorbaar is voor de mens, dit resulteert in dB(A);
- > **Geluid:** geluid kent twee componenten. Allereerst het fysieke component dat gaat over de verspreiding van de akoestische energie, dit is een natuurkundig principe. Daarnaast is er het psychoakoestische component dat gaat over interpretatie van het geluid door de mens (D'Angela, 2013).
- > **Geluidssterke(geluidsniveau):** dit is de sterkte of intensiteit van het geluid; de mate van variatie in luchtdruk als gevolg van geluidstrillingen, uitgedrukt in decibel. Hele hoge en lage frequenties worden onderdrukt (dB(A)). Er wordt soms ook wel gesproken over geluidsterkte met de meer algemene term geluidsniveau uitgedrukt in dB.
- > **Grondtoon:** basisfrequentie van een set harmonisch geluid.
- > **Herhalingsfrequentie:** aantal keren per seconde dat een signaal zich herhaalt. Niet te verwarren met de wisselfrequentie.
- > **Hertz (Hz):** de eenheid van frequentie.
- > **Hoorbaar (geluid):** geluid dat door de mens kan worden waargenomen.
- > **Links-rechts verwisseling:** wordt gerelateerd aan de lokaliseerbaarheid en hoorbaarheid van het geluid. Dit is waarneming (door de mens) dat het geluid in werkelijkheid uit een andere richting komt, dan wordt gedacht.
- > **Lokaliseren (van geluidsbron):** het vermogen om de plaats van de geluidsbron in de ruimte of omgeving te bepalen. Met andere woorden het bepalen van de richting waaruit het geluid afkomstig is.
- > **Luidheid:** subjectieve waardering van de sterkte van een toon.
- > **Omgevingsgeluid:** geluid afkomstig uit de omgeving buiten het voertuig van de ontvanger.
- > **On- en offset:** verandering in geluidsterkte bij het in- en uitschakelen van de sirene (Alferdinck et al., 2004). Voor de Nederlandse tweetoon ligt deze tussen de 1 en 10 dB/ms (Regeling optische en geluidssignalen 2009).
- > **Ontvanger (automobilist):** dit is de automobilist die zich binnen het bereik van het geluidssignaal bevindt.
- > **Percieved urgency:** de waarneming (van de mens) van de mate van alarmerendheid of urgentie van het geluid. Dit is afhankelijk van bepaalde kenmerken van het geluid, zoals de snelheid waarmee het geluid zich herhaalt.

- > **Psychoakoestiek:** de relatie tussen de subjectieve waarneming van geluid en de objectieve (natuurkundige) kenmerken van het geluid.
- > **Toonhoogte:** een geluid met een bepaalde frequentie uitgedrukt in Hz.
- > **Tweetonige hoorn (tweetoon):** het huidige geluidssignaal van Nederlandse voorrangsvoertuigen vastgelegd in de Regeling optische en geluidsignalen 2009.
- > **Spectrum (van geluid):** de energie distributie van geluid over de frequenties die er in voorkomen.
- > **Voor-achter verwisseling:** wordt gerelateerd aan de lokaliseerbaarheid en hoorbaarheid van het geluid. Dit is waarneming (door de mens) dat het geluid in werkelijkheid uit een andere richting komt, dan wordt gedacht.
- > **Wisselfrequentie:** het bereik van het geluid (in Hz) voor het wisselen tussen de hoge en de lage toon.