



Rapport nr. 2025-R-24-NL

Detecteerbaarheid van stille voertuigen

Evaluatie van de geluidskenmerken van elektrische of hybride voertuigen en van de daarmee samenhangende risico's voor Belgische burgers, met een focus op blinde en slechtziende personen

Rapportnummer	2025 - R - 24 - NL
Wettelijk depot	D/2025/0779/64
Opdrachtgever	Federale Overheidsdienst Mobiliteit en Vervoer
Publicatiedatum	1/08/2026
Auteur(s)	Simon Laurant, Mark Tant, David Ideler
Review	Stephan van Den Broucke (Université Catholique de Louvain)
Verantwoordelijke uitgever	Karin Genoe

Inzichten of standpunten in dit rapport zijn niet noodzakelijk deze van de opdrachtgever.

Overname van informatie uit dit rapport is toegestaan mits expliciete bronvermelding:
Laurant, S., Tant, M. & Ideler, D. (2026). Detecteerbaarheid van stille voertuigen – Evaluatie van de geluidskenmerken van elektrische of hybride voertuigen en van de daarmee samenhangende risico's voor Belgische burgers, met een focus op blinde en slechtziende personen, Brussel: Vias institute

Ce rapport est également disponible en français.

This report includes a summary in English.

Het Vias institute bedankt alle personen die aan deze studie hebben deelgenomen en iedereen die heeft bijgedragen aan de organisatie ervan. Wij danken eveneens de organisaties 'La lumière', 'Eqla', 'Licht en Liefde', 'Symfoon' en 'Markgrave' voor hun medewerking.

Inhoud

Tabellen- en figurenlijst	5
Samenvatting	6
Summary	8
1 Inleiding	10
2 Literatuurstudie	12
2.1 Geluid	12
2.1.1 Parameters	12
2.1.2 Perceptie	13
2.1.3 Geluidsmetingen	13
2.2 Rol van geluid in de verkeersveiligheid	14
2.2.1 Belang en gebruik van geluid	14
2.2.2 Geluid voor blinde en slechthorende personen	16
2.3 Stille voertuigen	19
2.3.1 Definitie	19
2.3.2 De afwezigheid van geluid bij elektrische/hybride voertuigen	19
2.3.3 Detectie en lokalisatie van stille voertuigen	20
2.3.4 Ongevallenstatistieken met stille voertuigen	23
2.4 Oplossingen	24
2.4.1 AVAS	24
2.4.2 Akoestische oplossingen en gehoorverlies	26
3 Kwalitatief onderzoek	28
3.1 Inleiding	28
3.2 Methode	28
3.3 Resultaten	29
3.3.1 Verplaatsingsgewoonten	29
3.3.2 Verplaatsingen te voet	30
3.3.3 Gebruik van geluid	34
3.3.4 De QRTV's	36
3.3.5 De oplossingen	38
3.4 Bespreking van de resultaten	41
4 Kwantitatieve studie	44
4.1 Doelstellingen	44
4.2 Deel 1: Objectieve geluidsmetingen	45
4.2.1 Methode	45
4.2.2 Resultaten	46
4.3 Deel 2: detectie van voertuigen	49
4.3.1 Methode	49
4.3.2 Resultaten	53
4.4 Bespreking van de resultaten	67
4.4.1 Detecteerbaarheid	67

4.4.2	Veiligheidsafstanden	69
4.4.3	Auditieve capaciteiten en geluidsfrequenties	70
4.4.4	Subjectieve veiligheid	70
4.5	Beperkingen	71
5	Conclusies	72
6	Aanbevelingen	74
6.1	AVAS	74
6.2	Sensibilisering	75
6.2.1	Sensibilisering van bestuurders	75
6.2.2	Sensibilisering rond kwetsbare weggebruikers	75
6.3	Snelheid in stedelijke zones	75
6.4	Rateltickers	76
6.5	Reductie van het globale geluidsniveau	76
6.6	Andere technologische oplossingen	76
6.6.1	Noodremassistentie	76
6.6.2	V2P-systemen	77
6.6.3	Beperkingen van technologische oplossingen	77
7	Referenties	78
8	Bijlage	83

Tabellen- en figurenlijst

Tabel 1 Motortype en activatie van AVAS volgens snelheid	50
Tabel 2 Demografische statistieken per experimentele groep	54
Tabel 3 Standaardafwijking van de detectieafstanden per voertuig en per snelheid	60
Figuur 1 Geluidsintensiteit van verschillende dagelijkse situaties (FOD Volksgezondheid)	12
Figuur 2 Weergave van de wegingscurve voor het bekomen van de waarde dB(A)	13
Figuur 3 Schema van de door de UNECE voorgeschreven meetmethode (VN-Reglement nr. 138)	14
Figuur 4 Categorieën van visuele beperkingen – W.H.O.	16
Figuur 5 Aantal personenwagens in België volgens brandstotype – Statbel	19
Figuur 6 Detectieafstand in verhouding tot de vereiste stopafstand (Cai, 2024b)	23
Figuur 7 Prevalentie van gehoorbeperkingen in functie van de leeftijd	27
Figuur 8 Impact van natuurlijk gehoorverlies	27
Figuur 9 Schema van de opnameprocedure	45
Figuur 10 Foto van de opnameprocedure	46
Figuur 11 Geregistreerde geluidsvolumes bij verschillende snelheden	47
Figuur 12 Geregistreerd geluidsvolume bij verschillende manoeuvres	47
Figuur 13 Frequentiespectrum – 10 km/u	48
Figuur 14 Frequentiespectrum – 30 km/u	49
Figuur 15 Frequentiespectrum – 50 km/u	49
Figuur 16 Verdeling van de tijd tussen het begin van de geluidsopname en de detectie	53
Figuur 17 Resultaten van de gehoortest volgens frequentie	54
Figuur 18 Proportie gemiste passages volgens voertuigtype en snelheid	56
Figuur 19 Drievoudige interactie (voertuigtype, snelheid, geluidsniveau) op de proportie gemiste passages	57
Figuur 20 Verdeling van de resterende tijd vóór aankomst van het voertuig op het moment van detectie	58
Figuur 21 Detectieafstanden in functie van snelheid en voertuigtype	59
Figuur 22 Gemiddelde detectieafstanden in functie van de snelheid	61
Figuur 23 Gemiddelde detectieafstanden per geluidsniveau – vergelijking tussen blinden/slechtzienden en controlegroep	62
Figuur 24 Gemiddelde detectieafstanden per voertuigtype – vergelijking tussen blinden/slechtzienden en controlegroep	62
Figuur 25 Proporties veilige en gevaarlijke detecties in functie van de snelheid	63
Figuur 26 Proporties veilige en gevaarlijke detecties in functie van snelheid en omgevingsgeluid	64
Figuur 27 Aantallen en proporties 'Ja'- versus 'Nee'-antwoorden in functie van de positie van het voertuig op het moment van detectie	66
Figuur 28 Frequentiespectrum, elektrisch voertuig – 20 km/u	68
Figuur 29 Frequentiespectrum, hybride voertuig – 20 km/u	68

Samenvatting

De aanwezigheid van stille voertuigen (elektrische en hybride voertuigen) op de Belgische wegen neemt steeds sneller toe. Dit roept vragen op met betrekking tot de veiligheid van kwetsbare weggebruikers. Het lagere geluidsniveau van deze voertuigen kan, afhankelijk van de situatie, onvoldoende zijn om voetgangers of fietsers toe te laten ze vanop voldoende afstand te detecteren om hun veiligheid te waarborgen. Dit rapport heeft tot doel de huidige situatie met betrekking tot de geluidsemissies van stille voertuigen te beschrijven, in vergelijking met die van voertuigen met verbrandingsmotor, en na te gaan welke implicaties dit kan hebben voor de verkeersveiligheid. Een bijzondere focus werd gelegd op personen met een visuele beperking, aangezien zij in de eerste plaats door deze problematiek worden getroffen. Eerst werd een literatuurstudie uitgevoerd. Vervolgens werden semigestructureerde interviews afgenomen bij blinde en slechtziende personen om inzicht te krijgen in de uitdagingen rond hun mobiliteit en in de manier waarop stille voertuigen hun dagelijks leven kunnen beïnvloeden. Daarnaast werden twee kwantitatieve experimenten uitgevoerd: het eerste om objectieve geluidsmetingen van verschillende voertuigen te verrichten, en het tweede om de detecteerbaarheid van stille voertuigen bij voetgangers te evalueren in vergelijking met voertuigen met verbrandingsmotoren.

Literatuur

De wetenschappelijke literatuur die in dit rapport wordt besproken, focust op het belang van auditieve aanwijzingen voor voetgangers, en in het bijzonder voor blinde en slechtziende personen. Zij toont aan dat geluid een belangrijke rol speelt bij de detectie van voertuigen, met name om het gebrek aan visuele informatie te compenseren. Talrijke studies hebben eveneens aangetoond dat elektrische voertuigen een lager geluidsvolume hebben dan voertuigen met verbrandingsmotor, maar enkel bij lage snelheid (onder 20-30 km/u). Bij deze snelheden worden elektrische en hybride voertuigen later en moeilijker gedetecteerd dan voertuigen met verbrandingsmotor. Dit verschil neemt doorgaans toe naarmate het omgevingsgeluid stijgt. Elektrische voertuigen blijken ook moeilijker te lokaliseren dan hun tegenhangers met een verbrandingsmotor. Sommige studies hebben aangetoond dat blinde of slechtziende personen risicovollere oversteekbeslissingen nemen in aanwezigheid van elektrische wagens dan van wagens met verbrandingsmotor.

Het AVAS-systeem ("Acoustic Vehicle Alerting System") werd wereldwijd ingevoerd om tegemoet te komen aan de problematiek van stille voertuigen. Het betreft een artificieel geluid waarmee recente stille voertuigen (vanaf 2019) zijn uitgerust. Verschillende studies hebben de effectiviteit van dergelijke systemen aangetoond om de detecteerbaarheid van stille voertuigen te verhogen tot een niveau dat vergelijkbaar is met dat van voertuigen met een verbrandingsmotor. De effectiviteit van het AVAS-systeem is echter niet altijd gegarandeerd en hangt sterk af van het geluidsniveau, maar ook van het type geluid dat wordt gebruikt. De huidige discussies in de wetenschappelijke literatuur richten zich voornamelijk op het verbeteren van de doeltreffendheid van het AVAS-systeem, om een maximale effectiviteit te bereiken zonder bijkomend bij te dragen aan geluidsoverlast in stedelijke gebieden.

Semigestructureerd interviews

Er werden vijftien interviews afgenomen bij blinde en slechtziende personen. Deze laten toe de moeilijkheden waarmee zij zich bij verplaatsingen geconfronteerd zien beter te begrijpen, evenals de strategieën die zij aanleren of toepassen om een zo groot mogelijke autonomie te behouden. De bevraagde personen verplaatsen zich regelmatig zelfstandig, ook in stedelijke context. Daarbij wordt geluid quasi permanent gebruikt. Geluid is doorgaans de voornaamste informatiebron die hen toelaat zich te oriënteren en potentiële gevaren te vermijden. Blinde en slechtziende personen maken een mentale kaart van hun omgeving, waarbij zij onder meer gebruikmaken van auditieve informatie. Het verschijnen van voertuigen die zij niet altijd kunnen detecteren vormt dan ook een bron van ongerustheid, aangezien dit leidt tot een zekere onvoorspelbaarheid en verhindert dat zij hun omgeving volledig kunnen inschatten. De bevraagde personen zijn doorgaans op de hoogte van het bestaan van het AVAS-systeem, maar maken er slechts in beperkte mate gebruik van. Zij verwijten het systeem vooral dat het te zwak is, in het bijzonder in aanwezigheid van omgevingsgeluid. Een andere kritiek is dat het AVAS-systeem zeer uiteenlopende vormen kan aannemen, waardoor niet altijd duidelijk is dat het om een naderend voertuig gaat.

Geluidsmetingen

Er werden verschillende geluidsmetingen uitgevoerd bij 5 voertuigen die diverse manoeuvres uitvoerden (voorbijrijden aan constante snelheid, vertragen, versnellen, achteruitrijden). De analyses van de door de

voertuigen geproduceerde geluiden werden uitgevoerd op basis van het absolute geluidsniveau (dB) en via een spectrale frequentieanalyse. Deze metingen tonen aan dat het AVAS-systeem de mogelijkheid heeft om een stil voertuig even luid te maken als een voertuig met verbrandingsmotor, maar de resultaten kunnen verschillen naargelang het gebruikte AVAS-systeem: niet alle artificiële geluiden zijn evenwaardig. De frequentieanalyse toont aan dat elektrische voertuigen minder geluid produceren in de hoge frequenties, terwijl het geluid van voertuigen met verbrandingsmotor constanter is over het volledige frequentiespectrum. Dit verschil wordt kleiner vanaf 30 km/u, aangezien bij deze snelheden het rolgeluid overheerst.

Detecteerbaarheid van voertuigen

In het tweede experiment luisterden 70 deelnemers naar opnames van drie voertuigen (een elektrisch voertuig, een voertuig met verbrandingsmotor en een hybride voertuig) die aan constante snelheid voorbijreden (aan 10, 20, 30 en 50 km/u), bij verschillende niveaus van omgevingsgeluid (laag, gemiddeld en hoog). De steekproef bestond voor de helft uit blinde of slechtziende personen. Dit experiment toonde aan dat de elektrische wagen uitgerust met een AVAS-systeem en de wagen met verbrandingsmotor een vergelijkbare detecteerbaarheid hadden. De hybride wagen was daarentegen iets minder detecteerbaar, in het bijzonder in lawaaierige omgevingen. Blinde en slechtziende personen slaagden er iets minder goed in dan de controlegroep om de wagens te detecteren, behalve in specifieke omstandigheden.

Dit experiment toonde eveneens aan dat wagens vaak te laat, of zelfs helemaal niet, werden gedetecteerd, in het bijzonder in omstandigheden met gemiddeld of hoog omgevingsgeluid. Dit impliceert dat voertuigen in stedelijke gebieden vaak te moeilijk detecteerbaar zijn om de veiligheid van voetgangers te waarborgen. De deelnemers waren in de meerderheid van de gevallen in staat correct in te schatten of het voertuig al dan niet tijdig had kunnen stoppen vanaf het moment dat zij het hadden gedetecteerd, maar er is een relatief groot foutpercentage, wat zorgwekkend is aangezien dit kan leiden tot risicovolle oversteekbeslissingen door voetgangers.

Op basis van al deze elementen formuleert het rapport conclusies en aanbevelingen voor de wetgever. Deze aanbevelingen hebben onder meer betrekking op het AVAS-systeem en mogelijke verdere evolutie ervan. Deze studie pleit in de eerste plaats voor een uniformisering van het AVAS-systeem, zodat een doeltreffend geluidsdesign kan worden vastgelegd en voetgangers een specifiek geluid aan dit systeem kunnen koppelen. De studie reikt eveneens pistes aan met betrekking tot de geluidsfrequenties die best worden gehanteerd om de effectiviteit van het AVAS-systeem te verhogen. Naast het AVAS-systeem hebben de aanbevelingen ook betrekking op de sensibilisering van bestuurders van elektrische voertuigen, evenals op diverse technologische oplossingen.

Summary

The presence of quiet vehicles (electric and hybrid) on Belgian roads is increasing at a rapid pace. These vehicles raise concerns regarding the safety of vulnerable road users. Due to the lower noise they emit, such vehicles may, depending on the situation, not be audible enough for pedestrians or cyclists to detect them at a sufficient distance to ensure their safety. The aim of this report is to describe the current situation regarding the sound emissions of quiet vehicles, in comparison with those of internal combustion engine vehicles, and to determine the implications this may have for road safety. Particular attention was given to people with visual impairments, who are the primary group affected by this issue.

First, a review of the scientific literature was conducted. Next, semi-structured interviews were carried out with blind and visually impaired individuals in order to better understand the challenges related to their mobility and how quiet vehicles may affect their daily lives. Two quantitative experiments were also conducted: the first involved objective sound measurements of different vehicles, and the second evaluated the detectability of quiet vehicles by pedestrians, in comparison with internal combustion engine vehicles.

Literature review

The scientific literature presented in this report focuses on the importance of auditory cues for pedestrians, particularly for blind and visually impaired individuals. It shows that sound plays a crucial role in vehicle detection, especially in compensating for the lack of visual information. Numerous studies have also demonstrated that electric vehicles are quieter than internal combustion engine vehicles, but only at low speeds (below 20–30 km/h). At these speeds, electric and hybrid vehicles are detected later and with greater difficulty than internal combustion engine vehicles. This difference tends to increase as ambient noise levels rise. Electric vehicles also appear to be more difficult to localize than their internal combustion counterparts. Some studies have shown that blind and visually impaired individuals make riskier crossing decisions in the presence of electric vehicles compared to conventional vehicles.

The AVAS (“Acoustic Vehicle Alerting System”) was introduced worldwide to address the issue of quiet vehicles. It consists of an artificial sound fitted to all recent quiet vehicles (from 2019 onwards). Several studies have supported the effectiveness of such systems in increasing the detectability of quiet vehicles to levels comparable to those of internal combustion engine vehicles. However, the effectiveness of AVAS is not always guaranteed and depends heavily on its sound level as well as on the type of sound used. Current discussions in the scientific literature mainly focus on improving the effectiveness of AVAS in order to maximize its benefits while avoiding additional noise pollution in urban areas.

Semi-structured interviews

Fifteen semi-structured interviews were conducted with blind and visually impaired individuals. These interviews helped to better understand the mobility-related difficulties faced by these individuals, as well as the strategies they learn or develop to maintain as much independence as possible. The participants reported regularly traveling independently, even in urban environments. To do so, they rely almost constantly on auditory information. Sound is generally their primary source of information for orientation and for avoiding potential hazards. Blind and visually impaired individuals mentally map their environment, notably using sound cues. The emergence of vehicles that they cannot always detect therefore represents a source of concern, as it introduces unpredictability and prevents them from having a complete understanding of their surroundings. The participants were generally aware of the existence of AVAS but reported making little use of it. They criticized it for being too quiet, especially in the presence of ambient noise. Another criticism was that AVAS can take very different forms, which sometimes makes it difficult to recognize it as an approaching vehicle.

Sound measurements

Various sound measurements were conducted on five vehicles performing different maneuvers (constant-speed pass-bys, deceleration, acceleration, and reversing). The analysis of the sounds emitted by the vehicles focused on absolute sound level (dB) and on spectral frequency decomposition. These measurements show that AVAS can make a quiet vehicle as loud as an internal combustion engine vehicle; however, results vary depending on the AVAS system, as not all artificial sounds are equally effective. Frequency analysis indicates that electric vehicles produce less high-frequency noise, whereas the noise produced by internal combustion engine vehicles is more evenly distributed across the frequency spectrum. This difference is reduced above 30 km/h, as rolling noise becomes predominant at these speeds.

Vehicle detectability

In the second experiment, 70 participants listened to recordings of three vehicles (one electric, one internal combustion engine vehicle, and one hybrid) traveling at constant speeds (10, 20, 30, and 50 km/h) under different ambient noise conditions (low, medium, and high). Half of the sample consisted of blind or visually impaired participants. The results showed that the electric vehicle equipped with an AVAS system and the internal combustion engine vehicle had comparable detectability. However, the hybrid vehicle was slightly less detectable, particularly in noisy environments. Blind and visually impaired participants performed slightly worse than the control group in detecting vehicles, except under specific conditions.

This experiment also showed that vehicles were often detected too late, or not detected at all, particularly under medium or high ambient noise conditions. This suggests that in urban environments, vehicles are often too difficult to detect to ensure pedestrian safety. Participants were generally able to correctly estimate whether the vehicle would have had time to stop from the moment they detected it, but a relatively high proportion of errors was observed. This is concerning, as such errors may lead to risky crossing decisions by pedestrians.

Based on these findings, the report presents conclusions and recommendations for policymakers. These recommendations mainly concern the AVAS system and its potential developments. The study primarily advocates for the standardization of AVAS, which would allow for the definition of an effective sound design and enable pedestrians to associate a specific sound with this system. The study also provides guidance on the sound frequencies that should be prioritized to increase the effectiveness of AVAS. Beyond AVAS, the recommendations also address the awareness of electric vehicle drivers as well as various technological solutions.

1 Inleiding

Het Belgische wagenpark, net als dat van vele andere landen, elektrificeert in snel tempo. In de afgelopen vijf jaar is het aandeel elektrische of hybride wagens in België gestegen van 3% tot meer dan 20%¹. Deze ingrijpende verandering gaat gepaard met een reeks vragen die verband houden met de specifieke kenmerken van deze voertuigen (Feys et al., 2024), zoals hun gewicht, hun acceleratievermogen... Deze studie heeft tot doel de implicaties te begrijpen van de geluidskenmerken van elektrische en hybride voertuigen voor de veiligheid van kwetsbare weggebruikers. Deze voertuigen staan er immers om bekend stiller te zijn dan hun tegenhangers met een verbrandingsmotor. Een elektrische motor is bijna volledig geruisloos en hoewel de motor niet de enige geluidsbron van een wagen is, heeft dit wezenlijke verschil in geluidsproductie een reële impact op het geluidslandschap van onze openbare wegen. Sommigen zien in deze geluidsreductie een bijkomend argument om de elektrificatie te stimuleren, aangezien dit een van de remedies zou kunnen zijn tegen de al te aanwezige geluidsoverlast in stedelijke gebieden. Het potentiële effect van deze geluidsreductie op de veiligheid mag echter niet worden onderschat.

Het externe geluid dat door een wagen met verbrandingsmotor wordt geproduceerd, is voornamelijk afkomstig van twee bronnen: het motorgeluid en het rolgeluid, met andere woorden het geluid dat ontstaat door de interactie tussen de banden en het wegdek. Bij een elektrische wagen is het motorgeluid verwaarloosbaar. Het rolgeluid is dus de voornaamste geluidsbron. Het verschil in geluidsvolume tussen een voertuig met verbrandingsmotor en een elektrisch voertuig hangt sterk samen met de snelheid. Bij lage snelheid (onder 20 km/u) is het geluid van een voertuig met verbrandingsmotor voornamelijk afkomstig van de motor. Bij hogere snelheid wordt het rolgeluid dominant en wordt het motorgeluid verwaarloosbaar. Het geluidsvolume van een elektrische wagen is dus lager, maar enkel bij lage snelheid.

Het geluid dat door wagens wordt geproduceerd vervult bepaalde functies voor kwetsbare weggebruikers. Het wordt, afhankelijk van de situatie, regelmatig gebruikt om naderende voertuigen te detecteren en mogelijke aanrijdingen te vermijden. Verschillende studies (Cai, 2024a; Martinez-Carranza & Rascon, 2020; Roberts et al., 1995) hebben het gebruik van auditieve signalen door voetgangers onderzocht. Deze worden onder meer ingezet om het gebrek aan visuele informatie te compenseren, of op een passieve manier, dat wil zeggen zonder de aandacht bewust op een specifiek object te richten. Bovendien beschikt een deel van de bevolking eenvoudigweg niet over de mogelijkheid om zich tijdens verplaatsingen op visuele informatie te baseren. Blinde en slechthorende personen gebruiken geluid als voornaamste informatiebron om hun omgeving mentaal in kaart te brengen. De toenemende aanwezigheid van voertuigen die minder geluid produceren vormt dan ook een bron van ongerustheid bij personen met een visuele beperking, aangezien zij het risico lopen deze voertuigen niet of te laat te detecteren om hun veiligheid te waarborgen.

Om deze risico's te beperken werd onder meer in de Europese Unie een maatregel ingevoerd, namelijk de toevoeging van een artificiële geluidsbron op zogenaamde 'stille' voertuigen. Sinds 2019 moet elk voertuig dat in de Europese Unie wordt ingeschreven voldoen aan minimale geluidsnormen. Stille voertuigen die vanaf die datum zijn geproduceerd, zijn dus uitgerust met een luidspreker die tot doel heeft het voertuig bij lage snelheid detecteerbaar te maken. Dit systeem wordt het AVAS-systeem genoemd ('Acoustic Vehicle Alerting System'). Het AVAS-systeem was het onderwerp van verschillende experimenten die de effectiviteit ervan wilden aantonen (Hastings et al., 2011; M. Roan et al., 2017; Sivaraj et al., 2023). Hoewel het duidelijk is dat de toevoeging van een artificieel geluid positieve effecten heeft op de detecteerbaarheid van voertuigen, blijven er nog vragen bestaan over de aard van het gebruikte geluid, over het geluidsniveau dat nodig is om de veiligheid van kwetsbare weggebruikers te waarborgen zonder de geluidsoverlast te verergeren, en over het snelheidsbereik waarin het systeem actief moet zijn...

Deze studie levert empirische elementen aan om deze vragen te beantwoorden. Er werden interviews afgenomen bij blinde en slechthorende personen om hun gebruik van geluid en de moeilijkheden met betrekking tot stille voertuigen te begrijpen. Op basis van deze interviews blijkt dat elektrische en hybride voertuigen een bron van ongerustheid blijven, ondanks de quasi universele aanwezigheid van het AVAS-systeem. Er werden twee experimenten uitgevoerd: het eerste bestaat uit zo objectief mogelijke metingen van het geluid dat wordt geproduceerd door verschillende voertuigen met verbrandingsmotor, hybride voertuigen en elektrische voertuigen, om hun geluidsprofielen zo nauwkeurig mogelijk te kunnen vergelijken. Het tweede experiment heeft tot doel de verschillende voertuigtypes te vergelijken op het vlak van detecteerbaarheid door kwetsbare weggebruikers, onder realistische omstandigheden. Deze studie vergelijkt in hoofdzaak op welke afstand een

¹ <https://statbel.fgov.be/nl/themas/mobiliteit/verkeer/voertuigenpark>

voetganger een naderend voertuig kan detecteren, afhankelijk van het motortype en de snelheid. Verschillende factoren werden in rekening gebracht, zoals het niveau van omgevingsgeluid, en de studie vergelijkt onder meer blinde of slechtziende met personen met een functioneel gezichtsvermogen. Deze tweede studie richt zich zowel op 'objectieve' veiligheid, namelijk of voertuigen voldoende vroeg werden gedetecteerd om veilig te blijven, als op 'subjectieve' veiligheid, namelijk het vermogen van de deelnemers om in te schatten of het voertuig al dan niet zou kunnen stoppen binnen de detectieafstand.

Op basis van de resultaten van deze experimenten, evenals van de afgenomen interviews en de wetenschappelijke literatuur, wordt dit rapport afgesloten met een bespreking van de resultaten en aanbevelingen inzake het te voeren beleid. Dit rapport bespreekt met name wenselijke evoluties voor het AVAS-systeem, zowel wat betreft het geluidsdesign (type geluid, belangrijke frequenties) als wat betreft de activeringsvoorwaarden. Deze aanbevelingen zijn erop gericht twee ogenschijnlijk tegenstrijdige doelstellingen met elkaar te verzoenen: voertuigen voldoende hoorbaar maken voor kwetsbare weggebruikers, en tegelijk bijkomende geluidsoverlast vermijden in stedelijke omgevingen waar die nu al te hoog is.

2 Literatuurstudie

2.1 Geluid

2.1.1 Parameters

Vanuit fysisch oogpunt is geluid een algemene term die elke vorm van mechanische trilling aanduidt die zich voortplant door een medium (lucht, water, een vaste stof...). De term 'geluid' omvat een zeer ruim geheel van concepten. Een geluid kan zeer eenvoudige kenmerken vertonen, zoals bijvoorbeeld een zuivere toon, dat wil zeggen een geluid met een regelmatige en constante frequentie (zoals de toon van een stemvork), of zeer complex zijn wanneer het is samengesteld uit verschillende trillingen met uiteenlopende frequenties. Een voorbeeld dat aansluit bij het onderwerp van dit onderzoek is het geluid dat voortkomt uit het geheel van het wegverkeer. De samenstelling van geluid kan worden beschreven aan de hand van een reeks parameters die hieronder worden toegelicht.



Figuur 1 Geluidsintensiteit van verschillende dagelijkse situaties (FOD Volksgezondheid)

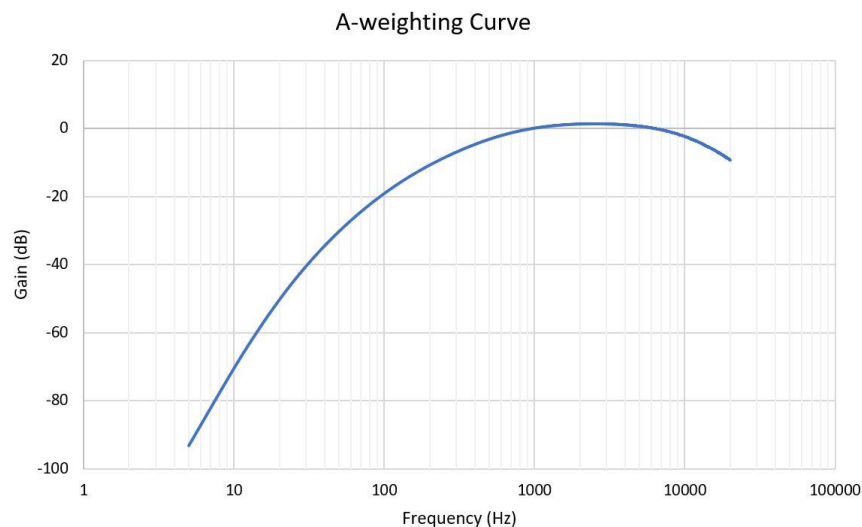
De **frequentie** van een geluid verwijst naar het aantal trillingen per seconde, gemeten in Hertz (Hz). Zij bepaalt de toonhoogte van een geluid. Een geluid dat als hoog wordt waargenomen, heeft een hogere frequentie dan een geluid dat als laag wordt waargenomen. Een geluid is vaak samengesteld uit een geheel van trillingen met verschillende frequenties. Het zijn de superposities van deze trillingen die leiden tot de uiteindelijke geluidspceptie. Het is dus mogelijk een geluid op te splitsen in een **frequentiespectrum** door de verschillende trillingen waaruit het bestaat te isoleren.

De **amplitude** van een geluid duidt op de maximale verplaatsing van de bewegende deeltjes tijdens de trilling. Zij bepaalt het volume van een geluid. Dit wordt doorgaans gemeten in decibel (dB). Figuur 1 geeft een overzicht van verschillende alledaagse gebeurtenissen met een overeenkomstige waarde in dB.

Het **timbre** is de uitdrukking van de klankkleur van een geluid. Dit wordt bepaald door de samenstelling van het geluid, met andere woorden door de verschillende trillingen waaruit het bestaat. Dezelfde noot gespeeld op verschillende muziekinstrumenten zal niet hetzelfde klinken, omdat het geluid, ook al heeft het dezelfde globale frequentie, niet op dezelfde manier is samengesteld.

2.1.2 Perceptie

Het is belangrijk een onderscheid te maken tussen geluidsemissie en geluidsimmissie. Geluidsemissie is het akoestisch vermogen, met andere woorden de geluidsenergie die door een object per tijdseenheid wordt geproduceerd. Anders gezegd verwijst geluidsemissie naar de hoeveelheid geproduceerd geluid. Geluidsimmissie daarentegen duidt op de hoeveelheid geluid die door het menselijk oor wordt waargenomen. Het gaat om de druk die door geluidsgolven op het trommelvlies wordt uitgeoefend. Het verschil tussen geluidsemissie en geluidsimmissie hangt grotendeels, maar niet uitsluitend, af van de afstand tussen het emitterende object en de persoon die het geluid ontvangt. Eenzelfde object is niet even 'luidruchtig' op 2 m als op 50 m. Naast de afstand kan de geluidsintensiteit ter hoogte van de ontvanger worden beïnvloed door de hoeveelheid energie die door de omgeving wordt geabsorbeerd (Matijevic & Popovic, 2017). De perceptie van dit geluid hangt eveneens af van het auditieve systeem van de persoon (kwaliteit van de receptoren). Deze notie is bijzonder belangrijk in het kader van dit onderzoek om een onderscheid te maken tussen het door een voertuig uitgezonden geluid en de perceptie ervan door voetgangers.



Figuur 2 Weergave van de wegingscurve voor het bekomen van de waarde dB(A)

dB(A) is een gewogen meeteenheid voor geluidsintensiteit die is aangepast aan de gevoeligheid van het menselijk oor voor verschillende frequenties. Het menselijk oor neemt bepaalde frequenties luider waar dan andere, zelfs wanneer zij hetzelfde volume hebben. De A-weging legt de nadruk op de frequenties waarvoor het oor het meest gevoelig is, namelijk rond 1 000 tot 5 000 Hz, en vermindert de impact van zeer lage frequenties (< 125 Hz) en hoge frequenties (> 10 000 Hz). De wegingswaarden worden weergegeven in Figuur 2. Andere wegingen, zoals de C-weging, worden gebruikt voor specifieke toepassingen, in dat geval om lage tonen te meten tijdens muziekevenementen. De specifieke toepassing van dB(A) geeft dus een nauwkeuriger beeld van de manier waarop mensen geluid waarnemen. Deze eenheid wordt vaak gebruikt bij metingen van omgevingsgeluid en geluidshinder (FOD Volksgezondheid, 2024).

2.1.3 Geluidsmetingen

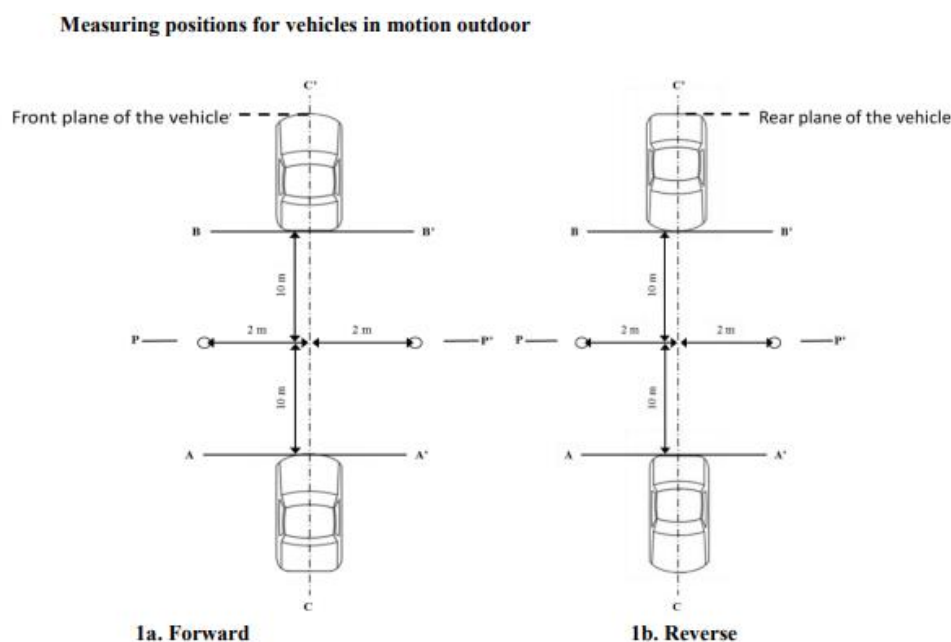
2.1.3.1 Meetinstrumenten

In de studies over dit onderwerp die werden geïnventariseerd, omvatten de meetinstrumenten doorgaans een decibelmeter, een snelheidsmeter, een geluidsmeter (microfoon) en eventueel een instrument voor het meten van wind of meteorologische omstandigheden. Een typische opstelling in studies rond geluid perceptie is de binaurale opname. In deze configuratie wordt de geluid perceptie rond het hoofd gesimuleerd door twee microfoons aan weerszijden van een kunsthoofd te plaatsen en het geluid op die manier op te nemen. Hoewel alle studies verschillen in het gebruik van meetinstrumenten, kunnen we stellen dat het belangrijkste instrument voor het meten van geluidsintensiteit de decibelmeter is. De decibelmeter is een gekalibreerd instrument dat toelaat een absolute waarde van het waargenomen geluidsvermogen op een specifieke plaats te verkrijgen. Een microfoon is niet gekalibreerd en de gevoeligheid ervan kan worden ingesteld. Een microfoon

laat toe geluiden op te nemen om ze nadien te analyseren, maar is niet geschikt voor een nauwkeurige meting van het geluidsvermogen.

2.1.3.2 Meetmethoden

In de meeste studies die de detecteerbaarheid van elektrische voertuigen hebben onderzocht, was de methode voor geluidsopname relatief vergelijkbaar. De standaardmethode bestaat uit een 'pass-by', een eenvoudige passage waarbij de wagen aan constante snelheid rijdt of specifieke manoeuvres uitvoert (versnellen, remmen, afslaan, achteruitrijden...). Meettoestellen, meestal een decibelmeter en een binaurale microfoon, werden op een vast punt geplaatst, op een nauwkeurig bepaalde afstand van het traject van de wagen. In sommige gevallen werd ook een meting van de meteorologische omstandigheden uitgevoerd. De Europese wetgeving betreffende de door voertuigen geproduceerde geluiden bevat een gedetailleerde beschrijving van een standaardmeetmethode voor een rijdend voertuig. Deze meting kan plaatsvinden in openlucht, in een zo geïsoleerd mogelijke omgeving, of in een anechoïsche of semi-anechoïsche ruimte. Figuur 3 toont een schema dat werd gepubliceerd in de wetgeving met betrekking tot het AVAS-systeem. Deze methodologie, die de afstanden tussen het voertuig en de meettoestellen nauwkeurig vastlegt, wordt gebruikt voor de homologatie van voertuigen wat betreft hun geluidsvolume. De in deze studie gebruikte methodologie zal grotendeels de methode volgen die in dit schema wordt weergegeven.



Figuur 3 Schema van de door de UNECE voorgeschreven meetmethode (VN-Reglement nr. 138)

2.2 Rol van geluid in de verkeersveiligheid

Om zich veilig op de openbare weg te kunnen verplaatsen, moeten kwetsbare weggebruikers, en in het bijzonder voetgangers, regelmatig in staat zijn voertuigen in hun omgeving te detecteren en te lokaliseren om conflicten of zelfs aanrijdingen te vermijden.

2.2.1 Belang en gebruik van geluid

Belang van auditieve aanwijzingen

Rekening houdend met de toename van het aantal stille voertuigen op de wegen (besproken in sectie 2.3 Stille voertuigen), hebben onderzoekers zich gebogen over het belang van auditieve informatie voor kwetsbare weggebruikers (met name voetgangers en fietsers) in vergelijking met visuele informatie. Studies (Oxley et al., 2005; Soares et al., 2020, 2021) hebben onder meer geprobeerd te evalueren in welke mate auditieve informatie een rol speelt bij oversteekbeslissingen van voetgangers. Deze studies tonen aan dat de visuele dimensie, die wordt gebruikt om de afstand tot het voertuig te beoordelen en de snelheid ervan in te schatten, voornamelijk bepalend is voor de beslissing om al dan niet over te steken. In situaties waarin de wagen

zichtbaar is, dient het geluid hoogstens om bijkomende informatie te verschaffen over de snelheid en het traject van het voertuig, zodat de resterende oversteektijd beter kan worden ingeschat.

Wanneer visuele informatie echter ontbreekt (belemmerd zicht, nacht, ...) of wanneer een object zich buiten het gezichtsveld bevindt, kan het gebruik van auditieve signalen de detectie van naderende voertuigen vergemakkelijken (Wiener et al., 1997). Aanrijdingen tussen voetgangers en voertuigen doen zich overigens vaak voor in omgevingen met beperkte zichtbaarheid (Roberts et al., 1995). Gedeelde ruimtes en parkings zijn eveneens goede voorbeelden van plaatsen waar een voertuig gemakkelijk buiten het gezichtsveld kan opduiken. In dat geval is auditieve informatie bijzonder nuttig om aanrijdingen te voorkomen (Cai, 2024b). Bovendien zijn er op de openbare weg tal van voor voetgangers relevante geluidssignalen die niet noodzakelijk van voertuigen afkomstig zijn.

De wetenschappelijke literatuur onderscheidt drie niveaus van auditieve perceptie (Martinez-Carranza & Rascon, 2020): detectie, classificatie (het identificeren van de aard van de geluidsbron) en lokalisatie (met inbegrip van het bepalen van de richting van een bewegend object). Deze drie niveaus van auditieve perceptie kunnen een rol spelen wanneer een voetganger zich veilig op de openbare weg wil verplaatsen. Hieronder worden deze verschillende niveaus kort besproken in de context van verkeersveiligheid.

Detectie

Hoewel het belangrijk is het type naderend voertuig te identificeren en te weten in welke richting het zich verplaatst, is dit enkel mogelijk indien het voertuig eerst werd gedetecteerd. De detectie van naderende voertuigen vormt dus het basis- en belangrijkste niveau voor een voetganger. Bovendien maakt de passieve detectie van een voertuig via het gehoor het mogelijk de aandacht erop te richten en nadien bewuster informatie te verzamelen. De visuele verwerking van een stimulus wordt overigens vergemakkelijkt wanneer deze vooraf auditief werd gedetecteerd (McDonald et al., 2000).

Talrijke studies hebben factoren onderzocht die de auditieve detectie van voertuigen kunnen beïnvloeden, waarbij het door het voertuig geproduceerde geluidsniveau vanzelfsprekend de belangrijkste factor is. Een groot deel van de studies in dit domein werd uitgevoerd om de detecteerbaarheid van elektrische/hybride voertuigen te vergelijken met die van voertuigen met verbrandingsmotor. Dit wordt verder uitgediept in de sectie gewijd aan stille voertuigen. Een zeer belangrijke notie binnen deze onderzoekslijn is bovendien de signaal-ruisverhouding (signal-to-noise ratio, of SNR) (Mendonça et al., 2013). Wetenschappelijk onderzoek benadrukt het cruciale belang om niet enkel het absolute geluidsvermogen te beschouwen, maar vooral het verschil, of eerder de verhouding, tussen dit geluidsvermogen en dat van de omgeving. De signaal-ruisverhouding is dus de vermogensverhouding tussen het door het te detecteren voertuig uitgezonden geluid (het signaal) en de andere omgevingsgeluiden die het signaal kunnen maskeren (de ruis). Ook al verwijzen niet alle hier besproken studies expliciet naar de signaal-ruisverhouding, toch kan de detecteerbaarheid van een voertuig onmogelijk los worden gezien van de intensiteit van het omgevingsgeluid.

Het merendeel van de literatuur over auditieve detectie van voertuigen heeft tot doel de detecteerbaarheid van stille voertuigen te vergelijken met die van voertuigen met verbrandingsmotor. Deze studies worden uitgebreider besproken in de sectie gewijd aan stille voertuigen.

Classificatie

Zeer weinig, zo niet geen enkele studie heeft zich verdiept in de classificatie van geluiden in het kader van verkeersveiligheid. Men kan veronderstellen dat detectie en lokalisatie de perceptieniveaus zijn die voor een voetganger daadwerkelijk van belang zijn. Wanneer men vaststelt dat een geluid aanwezig is en zich in onze richting verplaatst, is de herkenning en classificatie ervan minder essentieel voor de veiligheid en speelt deze mogelijk pas in tweede instantie een rol. Dat neemt niet weg dat classificatie relevant blijft, in het bijzonder in verband met het AVAS-systeem. Dit systeem, dat verder wordt besproken in de sectie gewijd aan oplossingen, is een artificieel geluid dat aan stille voertuigen wordt toegevoegd om de detecteerbaarheid van een naderend voertuig voor kwetsbare weggebruikers te verbeteren. Dit geluid wordt uitgezonden via een luidspreker die aan de buitenzijde van de wagen is geplaatst. Het systeem is doorgaans gereguleerd wat betreft het geluidsniveau, maar niet wat betreft de aard van het geluid, wat impliceert dat het type geluid sterk kan variëren van het ene systeem tot het andere. Bijgevolg kan de specifieke geluidsidentiteit van bepaalde AVAS-systemen nadelige effecten hebben op het vlak van classificatie. De herkenning van het door AVAS gegenereerde geluid wordt verder besproken in de secties die aan dit systeem zijn gewijd.

Lokalisatie

Om veilig te kunnen oversteken op basis van auditieve stimuli, moeten voetgangers eerst in staat zijn het voertuig te lokaliseren op basis van het door het voertuig geproduceerde geluid. Dit cognitieve proces is mogelijk dankzij interaurale verschillen in geluidsniveau of in tijd (Hartmann, 1999). Voor geluiden met een frequentie boven 500 Hz wordt het verschil in geluidsniveau (gemeten in decibel) tussen het linker- en het rechteroor gebruikt om het geluid te lokaliseren. Onder 500 Hz wordt het tijdsverschil tussen het moment waarop het geluid beide oren bereikt gebruikt. Beide aanwijzingen – interaurale niveauverschillen (ILD) en interaurale tijdsverschillen (ITD) – kunnen samen worden gebruikt, maar één ervan zal domineren afhankelijk van de frequentie van het geluid (Hartmann, 1999). Dit onderscheid kan potentieel een impact hebben op de lokalisatie van voertuigen naargelang hun geluidsprofiel (verdeling over het frequentiespectrum). Deze vragen werden vooral behandeld in de wetenschappelijke literatuur rond het geluidsdesign van AVAS-systemen en worden verder uitgediept in de desbetreffende sectie.

De literatuur heeft herhaaldelijk aangetoond dat de lokalisatie van een rijdend voertuig op basis van geluid meer of minder eenvoudig kan zijn afhankelijk van verschillende factoren, die niet noodzakelijk dezelfde zijn als bij detectie. Zo lijkt de lokalisatie van een voertuig gemakkelijker bij hogere snelheden, vermoedelijk dankzij het hogere geluidsvolume. Bovendien blijkt dat de lokalisatie van een voertuig wordt vergemakkelijkt wanneer het van rechts komt. Een mogelijke verklaring houdt verband met de organisatie van de hersengebieden die instaan voor auditieve perceptie (Barton et al., 2012).

2.2.2 Geluid voor blinde en slechthziende personen

2.2.2.1 Algemeen

Definitie

“Een visuele beperking ontstaat wanneer een oogaandoening het visuele systeem en de functies die het vervult aantast.”² Een visuele beperking kan verschillende vormen aannemen en meer of minder uitgesproken zijn. De Wereldgezondheidsorganisatie maakt in de eerste plaats een onderscheid tussen twee belangrijke begrippen. Het eerste is de gezichtsscherpte, die de helderheid van het zicht weergeeft. Wanneer de gezichtsscherpte afneemt, moet men dichterbij komen om scherp te kunnen zien. Het tweede is het gezichtsveld. Het is mogelijk een scherp zicht te hebben, maar met een beperkt gezichtsveld. Beperkingen van het gezichtsveld kunnen zich op uiteenlopende manieren manifesteren. Zo spreekt men van ‘tunnelzicht’ wanneer het perifere zicht is aangetast. Omgekeerd hebben sommige personen een verlies van het centrale zicht. Anderen zien zwarte of anders gekleurde vlekken die op verschillende plaatsen verschijnen, die kunnen bewegen of intermitterend optreden.³

Category		Visual acuity in the better eye	
		Worse than:	Equal to or better than:
Mild vision impairment		6/12	6/18
Moderate vision impairment		6/18	6/60
Severe vision impairment		6/60	3/60
Blindness		3/60	
Near vision impairment		N6 or M 0.8 at 40cm	

Figuur 4 Categorieën van visuele beperkingen – W.H.O.

² <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>

³ <https://www.blindenzorglichtentiefde.be/nl/meerweten/index/2325>

Het *World report on vision* (WHO, 2019) verduidelijkt dat hier wordt verwezen naar gezichtsscherpte 'met de gedragen correctie'. Personen met een verminderde gezichtsscherpte die met een bril kan worden gecorrigeerd, worden dus niet als slechtziend beschouwd. Zoals weergegeven in Figuur 4 worden visuele beperkingen op basis van de gezichtsscherpte ingedeeld naar ernst in lichte, matige en ernstige beperking, en wordt een persoon als blind beschouwd wanneer de gezichtsscherpte lager is dan 1/20. Een persoon kan ook als blind worden beschouwd wanneer het gezichtsveld kleiner is dan 10 graden. Deze criteria hebben betrekking op het binoculaire zicht, met andere woorden de gezichtsscherpte en het gezichtsveld gemeten met beide ogen samen.

Vanuit juridisch oogpunt bestaat er geen internationale consensus over de definitie van blindheid, maar in de meeste westerse landen wordt een persoon als blind beschouwd wanneer de gezichtsscherpte niet hoger is dan 20/200 of wanneer het gezichtsveld kleiner is dan of gelijk is aan 10 graden⁴.

Demografie

In 2019 waren er wereldwijd 2,2 miljard personen met een visuele beperking (WHO, 2019). Volgens de Belgische organisatie 'Licht en Liefde'⁵ leden in 2014 twee tot drie personen op 100 aan een visuele beperking en was één persoon op 1000 'sociaal blind'. Hoewel visuele beperkingen personen van alle leeftijden kunnen treffen, zijn vooral oudere personen getroffen. De WHO schat dat de meerderheid van de personen met een visuele beperking of blindheid ouder is dan 50 jaar. De meest voorkomende oorzaken in hoge-inkomenslanden zoals België zijn aandoeningen zoals glaucoom en leeftijdsgebonden maculadegeneratie.

2.2.2.2 Oriëntatie en mobiliteit van slechtziende personen

De leerprocessen en aanpassingen die blinde of slechtziende personen ontwikkelen om hun autonomie en mobiliteitsvaardigheden te verbeteren, zijn zeer divers en verschillen sterk van persoon tot persoon. Zij beperken zich uiteraard niet tot het leren gebruiken van geluid, maar omvatten uiteenlopende oplossingen die gebaseerd kunnen zijn op externe hulpmiddelen, het aanleren van strategieën, aanpassingen in verplaatsingsgewoonten, ... Het doel van deze sectie is niet om een exhaustieve beschrijving te geven van alle mogelijke benaderingen, maar om een globaal beeld te schetsen van de mobiliteitsvraagstukken van blinde en slechtziende personen, om vervolgens in te zoomen op het specifieke aspect van het gebruik van geluid.

De Brailleliga (Belgische vzw) legt uit dat ergotherapeuten die gespecialiseerd zijn in mobiliteit voor blinde of slechtziende personen eerst een persoonlijk 'bilan oriëntatie en mobiliteit' opmaken om de behoeften, moeilijkheden en vaardigheden van de persoon in kaart te brengen, met het oog op het uitwerken van een gepersonaliseerde begeleiding⁶. Dove et al. (2022) onderscheiden zes categorieën binnen het aanleren van mobiliteit bij personen met een visuele beperking:

- 'Defensieve' oriëntatie thuis en in de nabije omgeving om zich niet te verwonden
- Leren stappen met een begeleider
- Het gebruik van de witte stok
- Het gebruik van niet-visuele informatie (geluid, maar ook texturen, tijd, mentale kaarten ...)
- Trajectplanning
- Het gebruik van een navigatieapplicatie of andere technologische hulpmiddelen.

De opleidingen aangeboden door de Brailleliga sluiten aan bij deze door Dove et al. gedefinieerde categorieën. Er wordt gepreciseerd dat de trainingen grotendeels plaatsvinden in een vertrouwde omgeving, maar ook onderdelen bevatten in onbekende omgevingen. In het algemeen leggen opleidingen in dit domein sterk de nadruk op het gebruik van de witte stok, die het basisinstrument lijkt te vormen voor de mobiliteit van blinde en slechtziende personen. De stok dient vooral om obstakels op de grond in de nabije omgeving van de persoon te detecteren en te vermijden. Obstakels op hoogte blijven echter een probleem (Paré et al., 2021). De witte stok heeft ook een signaalfunctie. Zij maakt het mogelijk de visuele beperking zichtbaar te maken voor anderen, zodat zij hiermee rekening kunnen houden. Uit een enquête van de Brailleliga in 2022 bij 664 personen (86% blind en 14% slechtziend) blijkt dat 75% van de blinde personen en 45% van de slechtziende personen een witte stok gebruikt⁷.

⁴ <https://eqla.be/le-handicap-visuel/quest-ce-que-la-deficiencia-visuelle>

⁵ <https://www.blindenorglichtenliefde.be/nl/meerweten/index/10253>

⁶ <https://www.braille.be/nl/dienstverlening/leren-om-je-te-verplaatsen>

⁷ <https://www.braille.be/nl/2023-mobiliteit-in-vraag>

2.2.2.3 Specificiteiten in het gebruik van geluid

Verschillende studies hebben aangetoond dat personen die reeds lange tijd een visuele beperking hebben, ter compensatie betere auditieve capaciteiten ontwikkelen (Ashmead et al., 1998; Lessard et al., 1998). Zij presteren doorgaans beter dan anderen in taken rond detectie of lokalisatie van geluiden. Dit kan onder meer worden verklaard door het fenomeen van neuroplasticiteit. Neurale functies hebben de neiging zich te herorganiseren, waarbij de zones die door geluid worden geactiveerd een groter hersengebied innemen en gedeeltelijk de zones bezetten die normaal voor visuele stimuli zijn gereserveerd, in vergelijking met ziende personen (Kujala et al., 1997; Leclerc et al., 2000). De betere prestaties kunnen eveneens worden verklaard door adaptief gedrag of andere compensatiestrategieën.

Echolocatie is een goed voorbeeld van vaardigheden die deze personen hebben ontwikkeld om hun beperking te compenseren. Dit houdt in dat men zelf een geluid produceert en vervolgens luistert naar de echo die door objecten in de omgeving wordt teruggekaatst, om deze te detecteren en hun grootte in te schatten, vergelijkbaar met vleermuizen of bepaalde zeezoogdieren. Een toonaangevende expert in echolocatie is Daniel Kish, die deze techniek aan talrijke kinderen met een visuele beperking heeft aangeleerd. Het blijkt dat getrainde ziende personen in staat kunnen zijn echolocatie toe te passen, maar minder nauwkeurig dan blinde of slechtziende personen (Kolarik et al., 2014).

Zoals in de vorige sectie werd vermeld, vormt het gebruik van geluid één van de aanpassingsstrategieën om het gebrek aan visuele informatie te compenseren. Net zoals andere hulpmiddelen of strategieën (de witte stok, de geleidehond, navigatieapplicaties ...) specifieke functies vervullen (het vermijden van nabije obstakels, het volgen van voetpaden, het zich oriënteren naar een bestemming ...), vervullen geluid en de daarop gebaseerde strategieën eveneens specifieke functies. Zij kunnen zowel dienen om zich ruimtelijk te oriënteren, te weten waar men zich bevindt en welke richting men moet uitgaan, als om veilig te blijven door obstakels of botsingen met andere weggebruikers te vermijden en binnen de voor voetgangers bestemde zones te blijven (Kim et al., 2012).

Oversteken van een rijbaan

Het oversteken van een rijbaan is een complexere situatie, die meer aandacht en specifiekere strategieën vereist inzake het gebruik van geluid, in het bijzonder wanneer de oversteekplaats niet is uitgerust met verkeerslichten met een akoestisch signaal. Oversteekplaatsen met dergelijke uitrusting vallen buiten de hierna besproken problematiek (niet van toepassing).

De basisstrategie die reeds vele jaren wordt aangeleerd, is 'cross-when-quiet' (oversteken wanneer men niets hoort) (Emerson & Sauerburger, 2008). Deze strategie dateert inmiddels van meerdere decennia geleden en kent verschillende beperkingen. Ten eerste zorgt de geleidelijke vermindering van het geluid dat door verbrandingsmotoren wordt geproduceerd, samen met de opkomst van stille voertuigen, ervoor dat auditieve detectie steeds later plaatsvindt. Europese normen moedigen constructeurs aan om het motorgeluid steeds verder te beperken⁸. Daarnaast zou men kunnen stellen dat blinde of slechtziende personen vaker kunnen rekenen op een bestuurder die stopt om hen te laten oversteken, zonder daartoe verplicht te zijn ('driver yield' in de literatuur). Verschillende studies (D. Guth et al., 2005; Hassan, 2012) tonen echter aan dat het stoppen van bestuurders verre van systematisch is. Dit hangt in de eerste plaats af van de snelheid van de bestuurder, maar ook van de weginrichting, de infrastructuur en van de mate waarin de visuele beperking van de persoon die wil oversteken zichtbaar is voor de bestuurder (wetende dat 25% van de blinde personen en 50% van de slechtziende personen in België geen witte stok gebruiken, Brailleliga, 2023). Bovendien kunnen ziende personen oogcontact maken met de bestuurder, terwijl blinde of slechtziende personen veel beperktere mogelijkheden hebben tot non-verbale communicatie (Ashmead et al., 2005). Gelet hierop is het duidelijk dat de detecteerbaarheid van voertuigen op voldoende afstand om een veilige oversteek te garanderen cruciaal blijft voor deze doelgroep.

Tijdens het oversteken gebruiken blinde en slechtziende personen, naast het omgevingsgeluid om te bepalen wanneer zij kunnen oversteken, het geluid ook om de exacte richting van de oversteek te bepalen, met andere woorden om te vermijden dat zij afwijken of diagonaal oversteken (Guth et al., 1989). In België is een groot deel van de straten uitgerust met noppentegels die met een witte stok kunnen worden gebruikt en die tot doel hebben de aanwezigheid van een voetgangersoversteekplaats te signaleren en de persoon ernaartoe te leiden. Dit is echter niet op alle wegen het geval en sommige oversteekbewegingen moeten buiten een gemarkeerde oversteekplaats gebeuren. Bovendien geven de akoestische signalen op bepaalde verkeerslichten enkel

⁸ https://www.bruit.fr/revues/78_12995.PDF

informatie over het moment van oversteken, maar niet over de exacte richting die moet worden gevolgd. Zij kunnen zelfs misleidende informatie geven (Wall et al., 2004). Blinde en slechthorende personen gebruiken doorgaans het geluid van voertuigen die uit parallelle of loodrechte straten komen om de exacte richting te bepalen. Deze techniek is echter niet foutloos en leidt regelmatig tot vergissingen (D. A. Guth et al., 1989).

2.3 Stille voertuigen

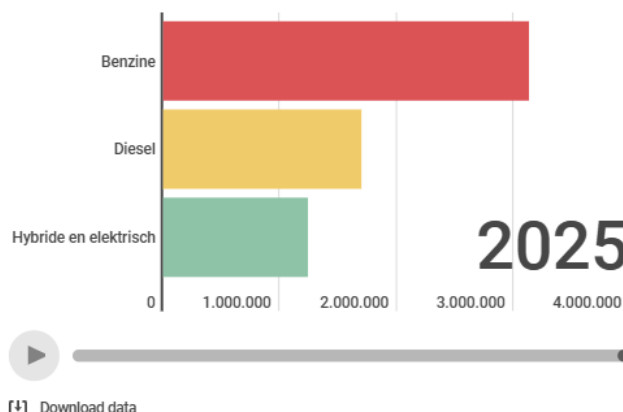
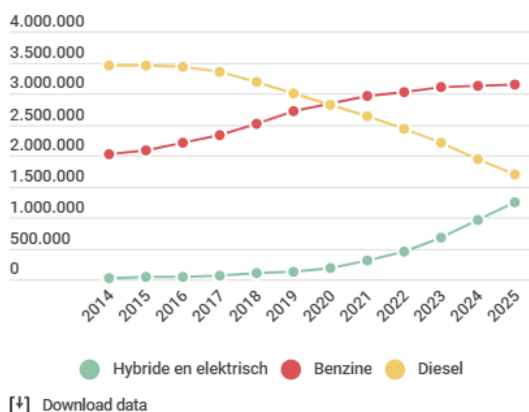
2.3.1 Definitie

Deze studie heeft in hoofdzaak tot doel zich specifiek te richten op zogenaamde 'stille' voertuigen. Het betreft voertuigen, in het bijzonder elektrische voertuigen (EV) en hybride voertuigen, die weinig geluid produceren in vergelijking met voertuigen met een traditionele verbrandingsmotor. In de Engelstalige literatuur wordt de afkorting "QRTV" gebruikt voor "Quiet Road Transport Vehicle". In Nederlandstalig België wordt vaak de term "stille voertuigen" of "elektrische voertuigen" gebruikt om elektrische en hybride voertuigen aan te duiden die weinig geluid produceren. Ook de afkorting "EV" voor elektrische voertuigen kan worden gebruikt om QRTV's te benoemen. In Franstalig België spreekt men van "Véhicules Routiers Silencieux" (VRS). In dit rapport gebruiken we voornamelijk de afkorting "QRTV" om stille voertuigen aan te duiden.

Figuur 5 geeft een weergave van het aantal voertuigen waaruit het Belgische wagenpark bestaat, volgens brandstoftype⁹. Deze grafiek toont dat het aandeel hybride en elektrische voertuigen de voorbije jaren voortdurend is toegenomen. Op 1 augustus 2025 waren er 254.240 elektrische wagens (+83,2% ten opzichte van 2024) en 710.687 hybride wagens (+19,1% ten opzichte van 2024). Op dat moment was ongeveer 16% van de wagens in België een QRTV. Elektrische wagens zijn in zeer grote mate bedrijfswagens (81,8%).

Evolutie van het aantal personenwagens per brandstoftype

2014-2025



Figuur 5 Aantal personenwagens in België volgens brandstoftype – Statbel

2.3.2 De afwezigheid van geluid bij elektrische/hybride voertuigen

2.3.2.1 Geluidsvermogen

Er zijn tal van elementen die het door een voertuig geproduceerde geluid kunnen beïnvloeden, waarbij elk van deze factoren afhankelijk van de situatie meer of minder impact kan hebben. De snelheid van het voertuig is de belangrijkste factor, maar er zijn ook andere elementen zoals de uitlaat, het type motor, de rijomstandigheden, de aerodynamica, maar ook de weersomstandigheden, het wegdek en de banden. De UNECE (Verenigde Naties) legt een maximale geluidslimiet op voor voertuigen van categorie M en N (personen- en goederenvervoer). Momenteel mag een voertuig, afhankelijk van het type voertuig en de verhouding

⁹ <https://statbel.fgov.be/nl/themas/mobiliteit/verkeer/voertuigenpark>

Vermogen/Massa, bij een snelheid van 50 km/u maximaal tussen 68 en 79 dB produceren. In 2016 lag deze drempel 3 tot 4 dB hoger.

Vanuit extern perspectief is het geluid dat door een voertuig met verbrandingsmotor wordt gegenereerd vrijwel volledig afkomstig van twee hoofdbronnen: het motorgeluid en het geluid veroorzaakt door de wrijving van de banden op het wegdek. Het aandeel van elk van deze bronnen in het totale geluidsniveau hangt sterk af van de snelheid van het voertuig. Bij lage snelheid overheerst het motorgeluid en speelt het bandengeluid slechts een beperkte rol in het totale geluidsniveau. Vanaf ongeveer 30 km/u is het geluid van het voertuig daarentegen voornamelijk afkomstig van de wrijving tussen banden en wegdek. Op basis van akoestische metingen bij voertuigen tijdens een 'pass-by', hebben van Blokland & Peeters (2009) het geluidsvermogen van elke bron in functie van de snelheid gemodelleerd. Zij bevestigen dat voor lichte voertuigen (<3,5 ton) het motorgeluid de belangrijkste geluidsbron is tot ongeveer 30 km/u. Aangezien zware voertuigen een krachtiger motorgeluid produceren, blijft dit bij hen de voornaamste geluidsbron tot snelheden boven 70 km/u.

Bij elektrische of hybride wagens (in elektrische modus) wordt het motorgeluid sterk gereduceerd, tot het praktisch verwaarloosbaar wordt. Dit impliceert dat elektrische voertuigen bij lage snelheid logischerwijs minder geluid produceren dan voertuigen met verbrandingsmotor. Dit werd in verschillende studies aangetoond. Zo voerden Garay-Vega et al. (2010) akoestische metingen uit bij drie elektrische of hybride voertuigen en hun equivalenten met verbrandingsmotor, waarbij verschillende manoeuvres werden uitgevoerd. Zij observeerden dat het geluidsvolume van elektrische/hybride voertuigen bij lage snelheid doorgaans lager is dan dat van hun tegenhanger met verbrandingsmotor. De geluidsniveaus worden vergelijkbaar rond 10 tot 20 miles per hour (ongeveer 15 tot 30 km/u), afhankelijk van de voertuigen. Iversen et al. (2013) analyseerden diverse wetenschappelijke studies waarin geluidsniveaus van elektrische/hybride voertuigen werden vergeleken met die van voertuigen met verbrandingsmotor. Het verschil in geluidsniveau bij lage snelheid wordt bevestigd, maar er zijn variaties in de snelheidsdrempel waarbij dit verschil niet langer waarneembaar is. Deze drempel varieert tussen 25 en 50 km/u, waarschijnlijk afhankelijk van de gemeten voertuigen en de specifieke omstandigheden van elke studie. Het maximale verschil in geluidsniveau (in decibel) tussen elektrische/hybride voertuigen en voertuigen met verbrandingsmotor varieert tussen studies, maar ligt doorgaans tussen 5 en 15 dB. Het is belangrijk te benadrukken dat dit verschil in volume in de loop der jaren waarschijnlijk zal afnemen dankzij nieuwe technologieën die het geluid van verbrandingsmotoren reduceren. Een lopende Europese wetgeving (EU-Verordening nr. 540/2014) beoogt het geluidsniveau van voertuigen met verbrandingsmotoren te verlagen tot een niveau dat vergelijkbaar is met dat van elektrische en hybride voertuigen. Een nota van autofabrikanten stelt overigens de mogelijke tegenstrijdigheid van deze regelgeving in vraag ten opzichte van de regelgeving die de installatie van een waarschuwingssysteem met een minimaal geluidsniveau verplicht (het AVAS-systeem, dat in de volgende secties wordt besproken)¹⁰.

2.3.2.2 Aard/Frequentie van het geluid

Verschillende studies hebben ook frequentieanalyses uitgevoerd waarin de door beide voertuigtypes uitgezonden frequenties werden vergeleken (Garay-Vega, Hastings, Pollard, Zuschlag, & Stearns, 2010; Steinbach et al., 2017). Het blijkt dat bij elektrische voertuigen de hoge frequenties doorgaans minder krachtig aanwezig zijn, terwijl bij voertuigen met verbrandingsmotor het geluidsvolume relatief constant is over het volledige gemeten frequentiespectrum. Het empirisch bewijs dat deze vaststelling bevestigt, is echter beperkt. Dit verschil in geluidsprofiel kan eveneens bijdragen tot een verschil in detecteerbaarheid, los van het globale geluidsvolume dat het voertuig produceert. De frequenties die de detecteerbaarheid het meest kunnen beïnvloeden, worden besproken in de sectie gewijd aan het AVAS-systeem.

2.3.3 Detectie en lokalisatie van stille voertuigen

2.3.3.1 Detecteerbaarheid

In de voorgaande secties werd ingegaan op het specifieke geluidsprofiel van elektrische en hybride voertuigen, waarbij werd aangetoond dat het geluidsvermogen doorgaans lager is dan bij voertuigen met verbrandingsmotor en dat ook het frequentiespectrum, en dus de aard van het geluid, verschilt. We gaan nu in op de vraag naar het verschil in detecteerbaarheid tussen beide voertuigtypes vanuit het perspectief van een voetganger. Hoewel het geluidsvermogen een van de belangrijkste factoren is bij de detectie en lokalisatie van een voertuig, is het niet de enige. Talrijke experimenten hebben geprobeerd te bepalen of stille voertuigen

¹⁰ https://www.bruit.fr/revues/78_12995.PDF

op voldoende grote afstand kunnen worden gedetecteerd. Zij onderzochten eveneens welke situaties de detectieafstand en lokalisatiecapaciteiten zodanig beperken dat een oversteek gevaarlijk wordt. In de meeste gevallen werd de detecteerbaarheid gemeten bij voertuigen die een 'pass-by' uitvoerden aan constante snelheid, waarbij onder meer de snelheid van het voertuig en het omgevingsgeluid werden gevarieerd. Bijna alle studies over dit onderwerp die hierna worden besproken, maakten gebruik van blinde of slechtziende proefpersonen.

Om de detecteerbaarheid tijdens een 'pass-by' te meten, focussen studies doorgaans op drie centrale meeteenheden: de detectieafstand, met andere woorden de afstand waarop een deelnemer de wagen kan detecteren; de 'time-to-arrival', zijnde het tijdsverschil tussen de detectie en het moment waarop het voertuig de microfoon/de deelnemer passeert; en de oversteekbeslissing, waarbij deelnemers wordt gevraagd of zij op het moment van detectie zouden oversteken, waarna wordt nagegaan of deze beslissing correct was in functie van de resterende tijd tot aankomst van het voertuig. Terwijl de detectieafstand een absolute indicatie geeft van de detecteerbaarheid, biedt de time-to-arrival eveneens informatie over het potentiële gevaar van de gemeten pass-by-situatie. Indien de resterende tijd te kort is, kan de reactietijd van bestuurder of voetganger onvoldoende zijn om een contact te vermijden. De oversteekbeslissing geeft daarnaast inzicht in het vermogen van deelnemers om de afstand tot het voertuig en de resterende tijd correct in te schatten. Deze maat kan echter sterk beïnvloed worden door de persoonlijkheid van de deelnemer.

Een relatief groot aantal studies had tot doel het verschil in detecteerbaarheid tussen elektrische of hybride voertuigen en voertuigen met verbrandingsmotor te onderzoeken. Zo vergeleek een studie van Garay-Vega et al. (2010), uitgevoerd voor de NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration, Verenigde Staten) en vaak als referentie aangehaald, de time-to-arrival bij detectie tussen verschillende voertuigen met verbrandingsmotor en hun elektrische equivalenten. Deze studie toont aan dat elektrische voertuigen systematisch op kortere afstand werden gedetecteerd dan hun tegenhanger met verbrandingsmotor bij een snelheid van 6 miles per hour (ongeveer 10 km/u). Roan et al. (M. Roan et al., 2017; M. J. Roan et al., 2017) voerden gelijkaardige tests uit en observeerden eveneens een systematisch kleinere detectieafstand voor elektrische voertuigen bij 10 km/u. Zij stelden echter vast dat dit verschil bijna volledig verdwijnt bij 20 km/u. Dit is consistent met wat in de vorige hoofdstukken werd besproken, namelijk dat het verschil in geluidsproductie tussen elektrische en voertuigen met verbrandingsmotor enkel aanwezig is bij lage snelheid. Glaeser et al. (2012) kwamen in een experiment met een vergelijkbare methodologie tot gelijkaardige conclusies.

2.3.3.2 De impact van omgevingsgeluid

Naast het aantonen dat elektrische/hybride voertuigen later en op kortere afstand worden gedetecteerd dan voertuigen met verbrandingsmotor, hebben de hierboven geciteerde studies (Garay-Vega et al., 2012; Roan et al., 2017; Roan et al., 2017) ook het effect van omgevingsgeluid op de detecteerbaarheid van stille voertuigen onderzocht. De perceptie van geluid is immers steeds afhankelijk van andere geluidsbronnen die gelijktijdig aanwezig zijn. Een geluid kan gemakkelijk worden gemaskeerd door andere geluiden. Op de openbare weg kan het omgevingsgeluid sterk variëren naargelang de locatie. In landelijke omgevingen of 's nachts kan het geluidsniveau lager blijven dan 30 tot 40 dB, terwijl het op grote verkeersassen kan oplopen tot 90 dB of meer. Het verschil in waargenomen geluidsniveau is aanzienlijk. Het is daarom noodzakelijk de hierboven vermelde resultaten in perspectief te plaatsen en te onderzoeken hoe het geluid van voertuigen wordt waargenomen in verschillende geluidsomgevingen.

In de NHTSA-studie (Garay-Vega, Hastings, Pollard, Zuschlag, Stearns, et al., 2010) varieerden de detectieafstanden van voertuigen met verbrandingsmotor tussen 40,5 en 55 voet (12,3 tot 16,8 meter) in een relatief lawaaijerige omgeving (49,8 dB), terwijl diezelfde voertuigen werden gedetecteerd op afstanden tussen 48,4 en 59,4 voet (14,8 tot 18,1 meter) in een stille omgeving (31,2 dB). Voor elektrische voertuigen was dit verschil nog groter: dezelfde voertuigen werden gedetecteerd tussen 20,9 en 36,3 voet (6,3 tot 11 meter) in een lawaaijerige omgeving en tussen 37,9 en 46,6 voet (11,6 tot 14,2 meter) in een stille omgeving. Hoewel het evident is dat een hoger omgevingsgeluid leidt tot een kortere detectieafstand, is het niet zeker of dit effect sterker is bij stille voertuigen of dat het alle voertuigtypes in gelijke mate beïnvloedt. Zo nam in een studie uit 2017 (M. J. Roan et al., 2017) de detectieafstand van elektrische voertuigen met 30% toe wanneer het omgevingsgeluid steeg van 55 naar 60 dB. In de studie van Cai (Cai, 2024b) daarentegen werd een duidelijke interactie vastgesteld tussen geluidsniveau en voertuigtype wat betreft detectieafstand. Het is mogelijk dat afhankelijk van het omgevingsgeluid de detecteerbaarheid van het ene voertuigtype sterker wordt beïnvloed dan die van een ander. Indien het omgevingsgeluid zich bijvoorbeeld bevindt tussen het geluidsniveau van een elektrische wagen en dat van een wagen met verbrandingsmotor, zal de

detecteerbaarheid van de elektrische wagen vermoedelijk sterker worden aangetast. Indien het omgevingsgeluid daarentegen aanzienlijk hoger ligt dan het geluidsniveau van beide voertuigen, zullen beide aan detecteerbaarheid verliezen. In dat geval is het relevanter om te spreken in termen van signaal-ruisverhouding en de detecteerbaarheid te evalueren in functie van de verhouding tussen het door het voertuig geproduceerde geluid en het omgevingsgeluid. Dit is onder meer wat Mendonça et al. (2013) deden, waarbij zij de signaal-ruisverhouding als predictor gebruikten. Hoewel dit niet de enige significante predictor was van detecteerbaarheid, verklaarde deze verhouding wel een groot deel van de variantie.

2.3.3.3 Andere detectiefactoren

Snelheid en omgevingsgeluid zijn de belangrijkste factoren die de detecteerbaarheid van voertuigen bepalen. Toch werden in de wetenschappelijke literatuur ook andere factoren onderzocht die een invloed kunnen hebben. Zo blijkt dat het type wegdek een belangrijke impact kan hebben op de detectieafstand (Mendonça et al., 2013), althans in bepaalde omstandigheden.

Een studie van Emerson & Sauerburger (2008) suggereert dat er een sterke interactie kan bestaan tussen het voertuiggeluid en de configuratie van de omgeving wat betreft detectievermogen. Zoals eerder beschreven hangt het waargenomen geluid af van het door een object geproduceerde geluid, de afstand tussen object en ontvanger, maar ook van de hoeveelheid energie die door de omgeving wordt geabsorbeerd (Matijevic & Popovic, 2017). In de studie van Emerson en Sauerburger werd vastgesteld dat omgevingsgeluid vanaf een bepaald niveau (43 dB) leidde tot een vermindering van de detectie, behalve in een specifieke omgeving met aanwezigheid van een heuvel. In dat geval werd een vermindering van de detectie vastgesteld bij een lager omgevingsgeluid (38 dB). Dit zou kunnen impliceren dat het weerkaatsingseffect van omgevingsgeluid door de omgeving het maskerend effect heeft versterkt.

Onderzoek van Barton (Barton et al., 2012, 2016) toonde aan dat er een verschil kan bestaan in detectieafstand afhankelijk van de kant vanwaar de wagen nadert. In verschillende studies werden wagens later gedetecteerd wanneer zij van rechts kwamen dan wanneer zij van links kwamen. Een hypothese van Barton is dat de asymmetrische fysiologie van het menselijke auditieve systeem aan de basis ligt van dit effect. Het zou interessant kunnen zijn na te gaan of dit effect aanwezig blijft in verschillende culturen, door onder culturen waar men rechts rijdt (waar men dus eerst aandacht heeft voor verkeer van links) te vergelijken met culturen waar men links rijdt, om te onderzoeken in welke mate dit effect voortkomt uit leerprocessen.

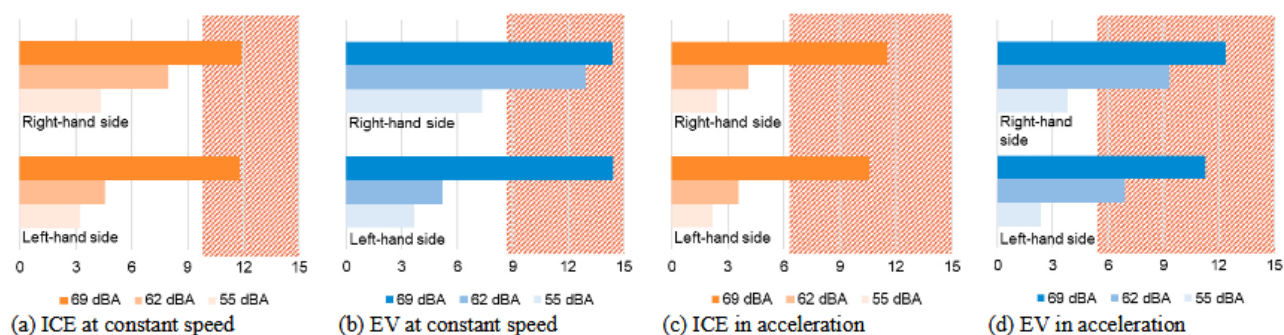
2.3.3.4 Vereiste afstand

Naast het bepalen in welke mate en onder welke omstandigheden stille voertuigen minder gemakkelijk detecteerbaar zijn dan andere voertuigen, hebben verschillende studies ook onderzocht of de afstand waarop zij worden gedetecteerd voldoende is om de veiligheid van kwetsbare weggebruikers te garanderen. In het algemeen kan worden gesteld dat een persoon een voertuig moet kunnen detecteren op een afstand die groter is dan de afstand die het voertuig nodig heeft om tot stilstand te komen. In de NHTSA-studie (Garay-Vega, Hastings, Pollard, Zuschlag, Stearns, et al., 2010) waren de detectieafstanden gemiddeld voldoende in alle omstandigheden behalve één: die van een elektrische wagen die aan 10 km/u reed in een lawaaierige omgeving. In de overige gevallen waren de detectieafstanden groot genoeg om het voertuig indien nodig te laten stoppen.

Figuur 6 is afkomstig uit een studie (Cai, 2024b) met een gelijkaardige opzet, waarin de detectieafstand van elektrische en voertuigen met verbrandingsmotor werd vergeleken. Naast de vaststelling dat elektrische voertuigen later werden gedetecteerd, werd ook vastgesteld dat de detectieafstanden soms onvoldoende waren om het voertuig tijdig tot stilstand te brengen. De grafieken tonen het verschil tussen detectieafstand en de vereiste stopafstand van het voertuig. De balken geven de detectieafstand weer. Wanneer een balk overlapt met het rode gedeelte in de grafiek, betekent dit dat het voertuig te laat wordt gedetecteerd om nog tijdig te kunnen stoppen. Bij een omgevingsgeluid van 62 dB werden elektrische voertuigen te laat gedetecteerd. Bij 69 dB werden beide voertuigtypes te laat gedetecteerd. Ter vergelijking: volgens een geluidskaart van Leefmilieu Brussel ligt het geluidsniveau op de meeste grote verkeersassen boven 70 dB¹¹. Dit impliceert dat in stedelijke gebieden situaties waarin voertuigen te laat worden gedetecteerd zeer vaak voorkomen.

¹¹ <https://leefmilieu.brussels/burgers/documentatie-en-tools/kaarten/cartografie-van-het-geluid-multi-blootstelling>

Bovendien is het belangrijk te vermelden dat deze berekeningen uitgaan van een gunstige situatie, met name een bestuurder die niet is afgeleid en een droog wegdek. In tal van gevallen kan de reële stopafstand groter zijn.



Figuur 6 Detectieafstand in verhouding tot de vereiste stopafstand (Cai, 2024b)

2.3.3.5 Lokalisatie en herkenning van het traject

Een beperkt aantal studies heeft zich gericht op het vermogen van deelnemers om op basis van geluid het traject van een wagen te herkennen of deze in de ruimte te lokaliseren. De belangrijkste conclusies uit deze studies geven aan dat voetgangers gemakkelijk kunnen herkennen of een wagen van rechts of van links komt en in welke richting zij rijdt. Daarentegen worden meer fouten gemaakt wanneer een wagen van voren of van achteren komt (Emerson et al., 2011; Stelling-Kończak et al., 2016). De meest plausibele verklaring is dat er geen interaurale verschillen in niveau of tijd bestaan wanneer de geluidsbron zich recht voor of achter de persoon bevindt.

Op de openbare weg verplaatsen voetgangers zich doorgaans in ruimtes die gescheiden zijn van het autoverkeer. Het oversteken van de rijbaan is het voornaamste moment waarop zij in contact kunnen komen met een wagen. In dat geval volstaat laterale lokalisatie. Situaties waarbij een wagen van voren of van achteren nadert, doen zich vaker voor in gedeelde ruimtes. In deze ruimtes worden gemakkelijker fouten gemaakt (Cai, 2024b). Anderzijds kan deze lokalisatietaak ook belangrijk zijn voor fietsers, die voertuigen rondom zich, inclusief die achter hen, moeten kunnen detecteren en lokaliseren.

2.3.4 Ongevallenstatistieken met stille voertuigen

Om de mogelijke gevaarlijkheid van stille voertuigen te beoordelen, is het eveneens relevant de ongevallenstatistieken te analyseren en te onderzoeken of zij vaker betrokken zijn bij ongevallen, in het bijzonder met kwetsbare weggebruikers. Het is ook relevant te kijken naar de omstandigheden waarin deze ongevallen plaatsvonden en deze te vergelijken met de omstandigheden die in de voorgaande paragrafen werden geïdentificeerd als momenten waarop deze voertuigen mogelijk niet hoorbaar zijn.

Een van de belangrijkste studies over dit onderwerp wordt beschreven in een rapport van de NHTSA (Wu et al., 2011) op basis van ongevallendata uit de Verenigde Staten. Deze studie toont aan dat elektrische voertuigen proportioneel vaker betrokken zijn bij ongevallen met voetgangers (1,2% van de geregistreerde ongevallen) dan voertuigen met verbrandingsmotor (0,6% van de geregistreerde ongevallen). Omstandigheden die een ongeval met voetgangers lijken te bevorderen, zijn onder meer achteruitrijden, stoppen en opnieuw vertrekken, het in- of uitrijden van een parkeerplaats of oprit, evenals vertragen en stoppen. Dit is consistent met het feit dat elektrische voertuigen volledig stil zijn wanneer zij stilstaan en bijna stil bij zeer lage snelheid.

Onderzoekers (Liu et al., 2018) analyseerden eveneens ongevallenstatistieken in Noorwegen tussen 2011 en 2018. Zij bevestigden dat de kans groter is dat een stil voertuig in botsing komt met een fietser of voetganger dan een wagen met verbrandingsmotor. Deze ongevallen doen zich vooral voor in stedelijke gebieden of op wegen met lage snelheid. Dit kan verband houden met het feit dat stille voertuigen voornamelijk in dergelijke zones voorkomen, maar sluit ook aan bij wat hierboven werd besproken inzake detecteerbaarheid. Een rapport van Vias (Feys et al., 2024) toont gelijkaardige bevindingen op basis van Belgische gegevens. De analyse van ongevallen met personenwagens tussen 2017 en 2022 wijst uit dat kwetsbare weggebruikers vaker betrokken zijn bij ongevallen met elektrische wagens dan wanneer alle types personenwagens samen worden beschouwd. Voetgangers zijn betrokken bij 7,1% van de ongevallen met alle types personenwagens. Wanneer

enkel elektrische wagens in aanmerking worden genomen, stijgt dit aandeel tot 8,7%. Voor fietsers bedraagt dit aandeel 15,3% bij alle personenwagens en 19,9% bij elektrische wagens.

2.4 Oplossingen

2.4.1 AVAS

2.4.1.1 Het AVAS-systeem

De voornaamste oplossing die werd voorgesteld en geïmplementeerd om de risico's van stille voertuigen te beperken, is het AVAS-systeem. AVAS, voor "Acoustic Vehicle Alerting System", is de benaming voor een toestel dat op stille voertuigen wordt geïnstalleerd en een geluid produceert dat bedoeld is om door kwetsbare weggebruikers te worden gedetecteerd. Dit geluid kan verschillende vormen aannemen, maar het geluidsniveau is onderworpen aan regelgeving die verschilt per geografische zone. Deze regelgeving wordt in het volgende punt besproken.

Momenteel is het AVAS-systeem wijdverspreid. In België, en ruimer in de Europese Unie, moet elk stil voertuig dat sinds juli 2019 in verkeer wordt gebracht, uitgerust zijn met een AVAS-systeem. Het exacte aandeel stille voertuigen dat met AVAS is uitgerust, is niet gekend, maar de sterke toename van stille voertuigen in België heeft zich voornamelijk na 2019 voorgedaan, zoals blijkt uit Figuur 5. We kunnen er dus van uitgaan dat vandaag de grote meerderheid ermee is uitgerust.

2.4.1.2 Regelgeving

In Europa

Binnen de Europese Unie wordt het AVAS-systeem geregeld door Verordening (EU) nr. 540/2014. Deze verordening heeft in het algemeen betrekking op het toegelaten geluidsniveau van motorvoertuigen, met zowel een minimaal als een maximaal geluidsniveau om geluidsoverlast te beperken. Volgens artikel 8 van deze verordening zijn de bepalingen inzake het AVAS-systeem vastgelegd in VN-Reglement nr. 138. De Europese verordening verwijst dus grotendeels naar de door de Verenigde Naties vastgelegde bepalingen inzake AVAS. De Europese regelgeving kan evenwel aanvullingen of correcties bevatten ten opzichte van de VN-reglementering. Eveneens worden amendementen die door de VN worden aangenomen niet automatisch toegepast in de Europese Unie: er moet een specifieke verwijzing worden gemaakt opdat deze van kracht worden. Op VN-niveau is een specifieke werkgroep belast met wetgeving inzake het AVAS-systeem, namelijk de "Groupe Rapporteur Bruit et Pneumatiques" (GRBP), een ondergeschikt orgaan van het World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29).

De momenteel geldende wetgeving in de Europese Unie is terug te vinden in VN-Reglement nr. 138, amendementenreeks 01¹². Deze regeling is van toepassing sinds 1 juli 2019 op alle nieuwe voertuigen die in verkeer worden gebracht. Zij legt minimale geluidsnormen vast binnen een bepaald snelheidsbereik: hoger dan 0 km/u en lager dan of gelijk aan 20 km/u. Het reglement vermeldt eveneens de verplichting om het geluid te activeren bij achteruitrijden. Activering is echter niet verplicht wanneer het voertuig stilstaat. Zowel het VN-reglement als de Europese verordening bepalen dat het geproduceerde geluid zich moet aanpassen aan de snelheid van het voertuig, zodat het rijgedrag duidelijk wordt weergegeven.

Homologatie

De tests voor de homologatie van een voertuig worden uitgevoerd bij 10 en 20 km/u. Het akoestisch niveau van het voertuig moet hoger liggen dan een globale waarde van 50 dB bij 10 km/u en 56 dB bij 20 km/u. Deze tests volgen een nauwkeurig vastgelegde methodologie waarbij een voertuig aan constante snelheid voorbijrijdt onder gecontroleerde omstandigheden. Deze omstandigheden worden eveneens beschreven in VN-Reglement nr. 138. Er zijn geen strikte vereisten inzake specifieke geluidsfrequenties, behalve dat het geluidsniveau een minimumwaarde moet bereiken in minstens twee tertsoctaafbanden, waarvan er minstens één gelijk moet zijn aan of lager dan 1600 Hz.

Schakelaar

¹² <https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-121-140>

In de oorspronkelijke versie van VN-Reglement nr. 138 bestond de mogelijkheid voor constructeurs om een schakelaar te voorzien waarmee het waarschuwingssysteem kon worden uitgeschakeld, met standaard de stand 'ON' bij het starten van het voertuig. Deze mogelijkheid werd geschrapt in de eerste amendementenreeks van het reglement. Sinds september 2021 is het dus niet langer mogelijk voor bestuurders om het AVAS-systeem uit te schakelen bij nieuwe voertuigen.

Toekomstige amendementen

Een tweede amendementenreeks (nr. 2) werd aangenomen in juni 2024. De belangrijkste wijziging betreft de verplichte activering van het AVAS-systeem wanneer het voertuig stilstaat. Deze reeks is nog niet in werking getreden. Een derde amendementenreeks is momenteel in bespreking. Deze heeft tot doel het toepassingsgebied van AVAS uit te breiden, onder meer door het snelheidsbereik te verhogen (de bovengrens zou van 20 naar 30 km/u gaan), maar ook om de mogelijke geluidsoverlast door AVAS te verminderen door de maximale geluidsniveaus te verlagen en activering buiten het betrokken snelheidsbereik te verbieden. Daarnaast beoogt zij het gebruik van AVAS voor marketingdoeleinden door constructeurs ("sonic branding") te verhinderen. Het voorgestelde geluid zou dus uitsluitend voor veiligheidsdoeleinden mogen worden gebruikt.

AVAS in andere landen

In de Verenigde Staten verplicht de 'Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) 141' eveneens het AVAS-systeem voor nieuwe voertuigen sinds 2020. Het betrokken snelheidsbereik werd daar meteen vastgelegd tussen 0 en 30 km/u. In China wordt de implementatie van het AVAS-systeem geregeld door norm GB/T 37153. Deze is in grote lijnen afgestemd op de Europese regelgeving, met iets hogere minimale geluidsdrempels (ongeveer 2 dB hoger).

2.4.1.3 Doeltreffendheid en aanpasbaarheid van AVAS

Doeltreffendheid

In een studie uitgevoerd voor de NHTSA ('National Highway Traffic Safety Administration') voerden Hastings et al. (2011) detectietests uit met voertuigen die uitgerust waren met geluidssystemen. De methodologie van deze tests is sterk vergelijkbaar met die gebruikt om de detecteerbaarheid van elektrische en voertuigen met verbrandingsmotor te vergelijken (zie sectie 2.3.3). De auteurs stelden vast dat een waarschuwingssysteem het gebrek aan motorgeluid bij een elektrisch voertuig kon compenseren en een detecteerbaarheidsniveau kon bereiken dat vergelijkbaar was met, of zelfs hoger dan, dat van voertuigen met verbrandingsmotoren, afhankelijk van het type geluid en de gebruikte frequenties. Een andere studie (Pliskow et al., 2011) kwam tot gelijkaardige conclusies: onder verschillende omstandigheden maakte het gebruik van AVAS het mogelijk voor deelnemers om elektrische voertuigen even goed te detecteren als voertuigen met verbrandingsmotor. Dit was echter niet in alle gevallen zo, afhankelijk van het gebruikte geluidstype. Een bijkomende studie bij personen met een visuele beperking (Kim et al., 2012) toonde aan dat elektrische voertuigen uitgerust met een artificieel geluid sneller werden gedetecteerd dan voertuigen met verbrandingsmotoren. Er werd echter geen significant verschil vastgesteld in het vermogen van deelnemers om de lokalisatie en rijrichting van voertuigen correct te bepalen. De auteurs benadrukken dat een grotere detecteerbaarheid niet noodzakelijk leidt tot een betere lokalisatie.

Talrijke studies hebben dus aangetoond dat het toevoegen van een artificieel geluid de detecteerbaarheid van voertuigen verbetert. De wetenschappelijke literatuur wijst echter ook op een onderliggend probleem bij het gebruik van het AVAS-systeem, namelijk geluidsoverlast. De negatieve effecten van verkeersgerelateerde geluidsoverlast, onder meer op cardiovasculaire aandoeningen, zijn uitgebreid gedocumenteerd (Münzel et al., 2021; Stansfeld & Matheson, 2003). Recente regelgeving beoogt dan ook het globale geluidsniveau van motorvoertuigen te verminderen. De invoering van een AVAS-systeem lijkt dus op gespannen voet te staan met deze inspanningen om geluidsoverlast te beperken. Daarom richt het huidige onderzoek zich, naast het aantonen van de doeltreffendheid van AVAS, op het identificeren van kenmerken die de detecteerbaarheid van elektrische voertuigen verhogen zonder het globale geluidsniveau en dus de geluidsoverlast te doen toenemen (Yamauchi, 2014). Dit onderzoek focust op twee aspecten: een geluidsdesign dat zich richt op specifieke frequenties, en een "adaptief AVAS", waarbij het geluidsniveau zich aanpast aan het omgevingsgeluid.

Frequenties

Zoals hierboven aangegeven, hangt de doeltreffendheid van AVAS-systemen sterk af van de eigenschappen van het gebruikte geluid. In bepaalde gevallen is het mogelijk de detecteerbaarheid van een elektrisch voertuig te verbeteren tot boven die van een voertuig met verbrandingsmotor, terwijl het globale geluidsniveau gelijk blijft (Hastings et al., 2011; Yamauchi, 2014). Op basis van verschillende studies blijken de frequentiebanden met de grootste impact op de detecteerbaarheid zich te situeren tussen 1000 en 5000 Hz (met enige variatie naargelang de publicatie). Garay-Vega, Hastings, Pollard, Zuschlag, Stearns, et al. (2010) stellen dat het menselijk oor bijzonder gevoelig is voor deze frequenties. Yamauchi et al. (2014) observeerden dat gelijkaardige detectiedrempels konden worden bereikt met een lagere geluidsindruk, indien het geproduceerde geluid wordt geconcentreerd in specifieke frequenties tussen 2000 en 5000 Hz. Daarnaast moeten de uitgezonden frequenties zich onderscheiden van de frequenties die reeds aanwezig zijn in het verkeer, om niet gemakkelijk gemaskeerd te worden. Volgens Yamauchi et al. (2014) situeren deze zich rond 1000 Hz. Het zou dus aangewezen zijn zich te richten op hogere frequenties.

Het adaptieve AVAS

Onder de mogelijke evoluties van het AVAS-systeem vermelden enkele auteurs (Berge & Haukland, 2019; Sivaraj et al., 2023; Yamauchi, 2014) de mogelijkheid om een 'adaptief' AVAS te ontwikkelen waarvan het geluidsniveau zich aanpast aan de externe omstandigheden. Dit zou het dubbele voordeel bieden dat de detecteerbaarheid van elektrische voertuigen in zeer lawaaierige omgevingen wordt verhoogd, terwijl in stille omgevingen het geluidsniveau – en dus de bijdrage aan geluidsoverlast – wordt verlaagd. Deze auteurs wijzen ook op het risico van een geluidscompetitie met overwegend negatieve gevolgen. Verdere studies zijn nodig om relevante grenzen voor het door het systeem geproduceerde geluidsniveau te bepalen. Momenteel zijn er echter nauwelijks studies beschikbaar. Bovendien zou de ontwikkeling van dergelijke systemen een technologische uitdaging vormen. Men kan bijvoorbeeld denken aan het gebruik van nieuwe technologieën voor onderling verbonden voertuigen.

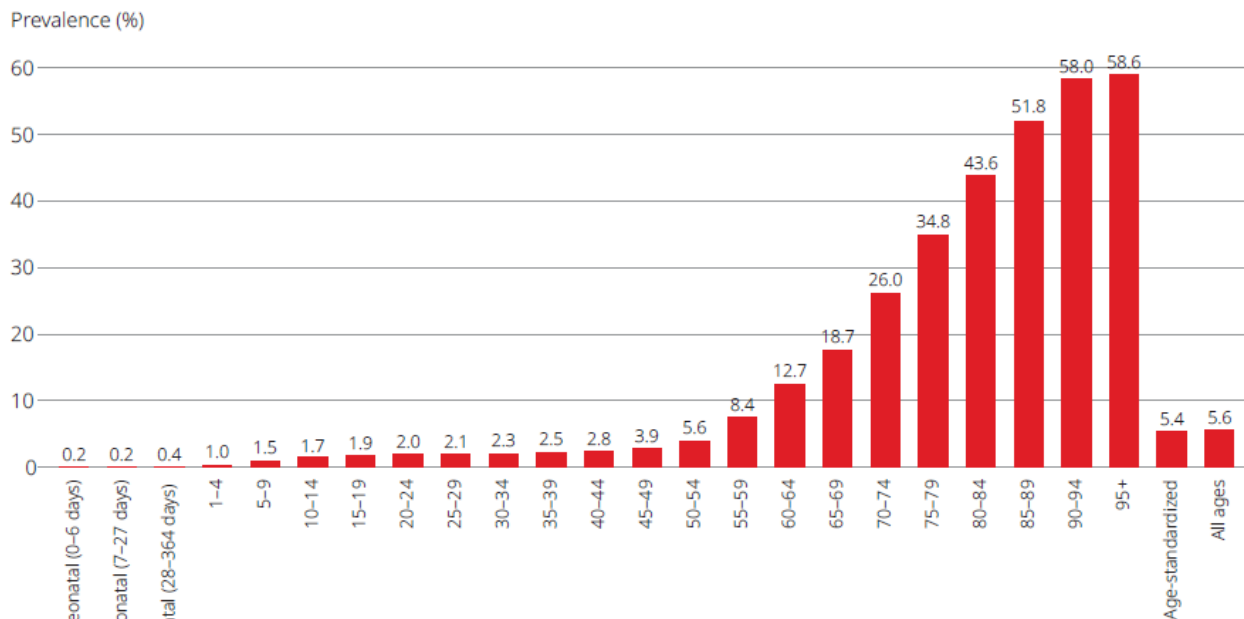
2.4.2 Akoestische oplossingen en gehoorverlies

Bij de invoering van akoestische oplossingen zoals AVAS moet rekening worden gehouden met het effect van gehoorverlies op de perceptie van voertuiggeluiden en moet het ontwerp van deze oplossingen worden aangepast om de doeltreffendheid voor de volledige bevolking te maximaliseren. Leeftijdsgebonden factoren en auditieve capaciteiten werden in de wetenschappelijke literatuur rond stille voertuigen slechts in beperkte mate in rekening gebracht. Slechts enkele artikelen hebben getracht de effectiviteit van AVAS-systemen te onderzoeken in relatie tot gehoorscores. Zoals eerder vermeld hebben de veiligheidsvraagstukken rond stille voertuigen in de eerste plaats betrekking op blinde personen, aangezien geluid hun belangrijkste informatiebron is, wat ook duidelijk blijkt uit de stand van de wetenschappelijke literatuur. Niettemin lijkt het noodzakelijk het effect van gehoorverlies te integreren bij de analyse van de risico's verbonden aan stille voertuigen en de voorgestelde oplossingen.

2.4.2.1 Statistieken over gehoorverlies

Het World Report on Hearing (WHO, 2020) beschrijft het gehoor van een persoon als een "traject dat afhankelijk is van de auditieve capaciteit bij de geboorte en van de risico's en preventieve factoren die men gedurende het leven ondervindt". Ongeacht de oorzaken van gehoorverlies is dit dus sterk verbonden met de leeftijd van de persoon. In Europa bedraagt de prevalentie van matig of ernstig gehoorverlies 10,9% bij personen tussen 60 en 69 jaar. Dit aandeel stijgt aanzienlijk in hogere leeftijdsgroepen: 23,4% bij 70- tot 79-jarigen, 42% bij 80- tot 89-jarigen en 56,5% bij personen ouder dan 90 jaar. Figuur 7, afkomstig uit hetzelfde rapport, toont het aandeel van de bevolking met gehoorbeperkingen in functie van de leeftijd.

De natuurlijke en onvermijdelijke achteruitgang van het gehoorvermogen wordt presbycusis genoemd ('presbycusis' in het Engels). Deze wordt gekenmerkt door een verhoging van de minimale gehoordrempels, maar niet uniform over het volledige frequentiespectrum (Gates & Mills, 2005; Wasano et al., 2021). Figuur 8 toont de gehoordrempels bij verschillende frequenties in functie van de leeftijd. De hogere frequenties worden het vroegst en het sterkst aangetast. De frequenties boven 1000 Hz zijn het meest betrokken. Dit nuanceert de eerder gepresenteerde conclusies: door zich te concentreren op hogere frequenties, die zich onderscheiden van andere verkeersgeluiden, bestaat het risico dat oudere kwetsbare weggebruikers worden benadeeld.

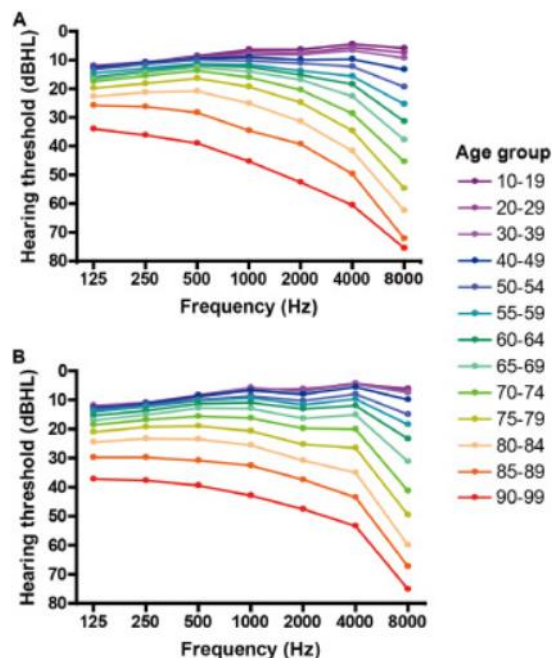


Figuur 7 Prevalentie van gehoorbeperkingen in functie van de leeftijd

2.4.2.2 Leeftijd, gehoor en stille voertuigen

In nagenoeg alle studies naar de auditieve detecteerbaarheid van elektrische of hybride voertuigen werd leeftijd enkel meegenomen als controlevariabele, zonder dat er specifieke analyses rond werden uitgevoerd.

Het is dan ook moeilijk om een specifiek effect van gehoorverlies vast te stellen, anders dan een algemene vermindering van de detectieafstand. Een specifiek voorbeeld (Emerson et al., 2013) toont aan dat blinde deelnemers met een gehoorbeperking extreem risicovolle oversteekbeslissingen namen, doordat zij zich baseerden op onaangepaste of ongeschikte auditieve aanwijzingen. Het is belangrijk te vermelden dat gecombineerde visuele en auditieve beperkingen relatief vaak voorkomen.



Figuur 8 Impact van natuurlijk gehoorverlies in termen van frequenties

3 Kwalitatief onderzoek

3.1 Inleiding

Een van de voornaamste doelstellingen van dit onderzoek is te begrijpen welke impact de opkomst van stille voertuigen kan hebben op het dagelijks leven van slechtziende en blinde personen. Wij achten het essentieel om de betrokkenen zelf te bevragen en samen met hen de belangrijkste aspecten van deze problematiek in kaart te brengen. Bovendien is het duidelijk dat, om de uitdagingen van elektrische voertuigen in relatie tot hun mobiliteit te kunnen definiëren, eerst moet worden gekeken naar het bredere kader van de verplaatsingsgewoonten van deze populatie.

Daarom werd in eerste instantie gekozen voor een kwalitatieve benadering, met als doel tendensen te identificeren en na te gaan welke standpunten binnen deze populatie eerder op consensus dan wel op divergentie wijzen. Deze kwalitatieve studie omvat drie afzonderlijke luiken die overeenkomen met drie doelstellingen. Ten eerste werd een mobiliteitsprofiel van de persoon opgesteld: wat zijn de verplaatsingsgewoonten, welke hulpmiddelen worden gebruikt, in welke omgevingen verplaatst men zich? Het tweede luik had tot doel het belang van geluid tijdens het stappen op de openbare weg te begrijpen: in welke mate wordt het gebruikt in verhouding tot andere zintuigen, met welk doel en in welke omstandigheden? Dit luik geeft eveneens inzicht in moeilijkheden die verband houden met het ontbreken of vervormen van geluid. Ten slotte had het derde luik tot doel de algemene houding van de deelnemers ten aanzien van stille voertuigen te beschrijven, evenals de situaties waarin deze een bron van gevaar of bezorgdheid kunnen vormen. Vervolgens werd gezocht naar mogelijke oplossingspistes, die werden bevraagd en geëvalueerd. Daarbij werd bijzondere aandacht besteed aan het AVAS-systeem, dat momenteel de belangrijkste maatregel is om het gebrek aan geluid bij elektrische/hybride voertuigen te compenseren.

3.2 Methode

Rekrutering

Wij namen via e-mail contact op met verschillende verenigingen die zich richten tot slechtziende en blinde personen. De meeste van deze verenigingen stemden ermee in een uitnodiging tot deelname aan ons onderzoek te verspreiden. De voorgestelde deelname bestond uit een interview van maximaal één uur, online via Teams. Aan het begin van elk interview werd toestemming gevraagd om het gesprek op te nemen teneinde een transcriptie te kunnen maken. Alle interviews en alle deelnemers werden strikt beschermd, en enkel de onderzoekers die rechtstreeks bij het project betrokken waren, hadden toegang tot de gegevens. Na afronding van de transcripties werden deze geanonimiseerd. Deze procedure werd bij aanvang van elk interview door de deelnemer goedgekeurd. Aangezien één blinde en slechthorende persoon niet in staat was om een interview via Teams te voeren, vond de uitwisseling met deze persoon uitsluitend via e-mail plaats.

De bevraagde personen werden uitsluitend gerekruteerd via verenigingen die ondersteuning bieden aan personen met een visuele beperking. Dit impliceert dat onze steekproef enkel bestaat uit personen die reeds gebruik hebben gemaakt van deze diensten en een aangepaste opleiding hebben ontvangen. Het is zeer waarschijnlijk dat dit kwalitatieve onderzoek een specifieke groep binnen de populatie van blinde/slechtziende personen mist, namelijk zij die meer geïsoleerd leven en daardoor moeilijker te bereiken zijn.

Vragenlijst

De interviews werden afgenomen in de vorm van semigestructureerde gesprekken. Er werd een vragenlijst opgesteld die uit drie delen bestond: profiel, gebruik van geluid en mening over elektrische voertuigen en AVAS. Hoewel vooraf een lijst met vragen werd voorbereid, was het de bedoeling dat het interview flexibel verliep en zich aanpaste aan de thema's die door elke deelnemer naar voren werden gebracht. Het is dus mogelijk dat bepaalde vragen niet of in aangepaste vorm werden gesteld, of dat gesprekken uitgebreider gingen op onderwerpen die vooraf niet waren voorzien.

Deelnemers

De uiteindelijke steekproef bestond uit 15 deelnemers. Van deze 15 personen waren er 12 blind en 3 slechtziend (tunnelzicht, met verschillende visuele scherpste). De groep blinde personen was relatief evenwichtig verdeeld tussen personen die blind zijn sinds de geboorte en personen die hun zicht later in het

leven hebben verloren (een exact cijfer is niet mogelijk, aangezien sommige deelnemers de oorsprong van hun beperking niet specificerden).

Op demografisch vlak omvatte de steekproef 7 vrouwen en 8 mannen, 10 Nederlandstaligen en 5 Franstaligen. De deelnemers waren tussen 34 en 66 jaar oud, met een gemiddelde leeftijd van ongeveer 50 jaar. De meerderheid van de bevroegde personen (12 op 15) woont in een stedelijke omgeving, waaronder sommigen in een grote stad. De overige deelnemers wonen eerder in een voorstedelijke omgeving. Alle deelnemers gaven aan zich regelmatig, zelfs dagelijks, alleen of begeleid te verplaatsen.

Analyse

De interviews werden volledig uitgeschreven, met behoud van de anonimiteit van de deelnemers. Nadat alle interviews waren afgenomen, werd een transversale analyse uitgevoerd om de voornaamste thema's die naar voren kwamen te identificeren. Ook algemene tendensen werden geanalyseerd om te bepalen welke standpunten eerder een consensus weerspiegelen en welke verschillen tussen deelnemers vertonen.

3.3 Resultaten

3.3.1 Verplaatsingsgewoonten

3.3.1.1 Frequentie en algemeen gevoel

Een eerste element waarover onder de bevroegde personen een duidelijke consensus bestaat, is dat verplaatsingen integraal deel uitmaken van hun dagelijkse leven. Alle deelnemers gaven aan zich meerdere keren per dag te verplaatsen, hetzij om naar het werk te gaan, hun hond uit te laten of gewoon voor ontspanning. Het merendeel van deze verplaatsingen gebeurt bovendien alleen. Dit hangt uiteraard samen met de familiale situatie van de respondenten: sommigen zijn alleenstaand en wonen alleen, waardoor zij zich bijna altijd zelfstandig verplaatsen; anderen verplaatsen zich vaker samen met anderen, al dan niet met hulp. In elk geval gaf geen enkele deelnemer aan fundamentele problemen te hebben met het alleen stappen.

Wel stelden we verschillen vast in het gevoel dat gepaard gaat met zelfstandig verplaatsen en in de mate van comfort daarbij. Uit de interviews blijkt dat blinde en slechtziende personen de voorkeur geven aan vertrouwde trajecten. Het herhalen van trajecten maakt het enerzijds mogelijk routes te kiezen die veiliger zijn en plaatsen te vermijden die moeilijk te interpreteren zijn (deze worden verder besproken). Anderzijds vergemakkelijkt het de oriëntatie: men bouwt routines op, telt afstanden of gebruikt herkenningspunten. Deze herkenningspunten kunnen tactiel, auditief of olfactorisch zijn. Ze verminderen onzekerheid en geven de persoon de zekerheid zich op veilige delen van de openbare weg te bevinden.

"Eerst leer je de basistechniek van de witte stok (...). De tweede fase bestaat uit het aanleren van trajecten, die men best grondig en uit het hoofd leert. Daarna volgen technieken om zich zelfstandig te verplaatsen." – S.

Daarnaast varieert de beleving van het nemen van onbekende routes sterk tussen de deelnemers. Sommigen zijn daaraan gewend en ervaren geen bijzondere stress, anderen vermijden dit zoveel mogelijk wanneer zij niet begeleid worden. Deze verschillen lijken deels samen te hangen met persoonlijkheid en levensgeschiedenis. In onze steekproef ervaren personen die blind zijn sinds de geboorte bijvoorbeeld minder angst in onbekende omgevingen dan personen die later in hun leven hun zicht hebben verloren.

"Ik ben helemaal niet gestresseerd door verplaatsingen. (...) Ik ben van nature niet erg angstig." – K. (blind sinds de geboorte)

3.3.1.2 Omgevingen

Bijna alle bevroegde deelnemers wonen in een eerder stedelijke omgeving. Sommigen wonen in het centrum van grote Belgische steden, anderen in de rand of in middelgrote steden, maar een uitgesproken landelijke woonomgeving komt nauwelijks voor. Een van de deelnemers gaf hiervoor een waarschijnlijke verklaring: stedelijke omgevingen bieden meer autonomie. Blinde personen profiteren ervan te wonen waar openbaar vervoer beschikbaar is, zodat zij niet afhankelijk zijn van anderen. Verschillende deelnemers gaan regelmatig naar het platteland voor wandelingen of ontspanning. In die context verlopen verplaatsingen minder methodisch dan in de stad.

"Wanneer ik op het platteland ben, verplaats ik mij zonder stok omdat ik de buurt ken. Ik volg dan de goten en moet weinig straten oversteken." – Y.

De gesprekken tijdens de interviews gingen spontaan vooral over verplaatsingen in stedelijke omgevingen. De volgende bevindingen zijn dan ook in het bijzonder van toepassing op stedelijke contexten. Het lijkt erop dat moeilijkheden waarmee blinde/slechtziende personen geconfronteerd worden, minder uitgesproken zijn in omgevingen waar het verkeer beperkter is en de infrastructuur eenvoudiger te interpreteren valt.

3.3.1.3 Vervoerswijzen

Een andere duidelijke consensus onder de deelnemers betreft het gebruik van openbaar vervoer en taxi's. Het merendeel van hun verplaatsingen bestaat uit een combinatie van stappen en het gebruik van één of meerdere vormen van openbaar vervoer. Voor functionele verplaatsingen (niet louter recreatief) verkiezen deelnemers vaak het openbaar vervoer, zelfs wanneer dit hun traject enigszins verlengt, boven het volledig te voet afleggen van de afstand.

Het gebruik van openbaar vervoer brengt op zich echter ook moeilijkheden met zich mee, vooral voor blinde personen. Het kan lastig zijn het juiste haltepunt te vinden en te bereiken, en vervolgens het correcte voertuig te nemen. Sommige deelnemers geven aan dat zij de gewoonte hebben ontwikkeld hulp te vragen bij het opstappen in een bus of tram. Desondanks wordt openbaar vervoer als comfortabeler en geruststellender ervaren dan zich volledig te voet verplaatsen.

3.3.2 Verplaatsingen te voet

Om het belang van geluid in de verplaatsingen van blinde en slechtziende personen te begrijpen, is het noodzakelijk eerst inzicht te krijgen in de uitdagingen die hiermee gepaard gaan, de beschikbare hulpmiddelen en de ervaren moeilijkheden.

3.3.2.1 Basisprincipes

Uit de analyse van de interviews kwamen twee hoofddoelstellingen naar voren die blinde of slechtziende personen nastreven wanneer zij zich te voet op de openbare weg verplaatsen: zich oriënteren en gevaren vermijden. Elke strategie of hulpmiddel die verder wordt besproken, kan worden begrepen als een ondersteuning van één of beide componenten.

De basisstrategie bij verplaatsingen te voet bestaat erin zo veel mogelijk op het trottoir te blijven. Dit wordt beschouwd als een veilige ruimte die bescherming biedt tegen gevaren verbonden aan het verkeer. Bovendien helpt het trottoir om een gekozen richting aan te houden en zich gemakkelijker te oriënteren. Op enkele uitzonderingen na ontstaan gevaarlijke situaties wanneer men het trottoir moet verlaten. In stedelijke context betreft dit voornamelijk twee gevallen, die verder in detail worden besproken: het oversteken van de rijbaan en situaties waarin een voertuig zich in beweging zet in de nabijheid (uitritten van parkings, gedeelde ruimtes...). Beide situaties vereisen specifieke aanpassingen en strategieën.

Een begrip dat herhaaldelijk terugkwam in de interviews is dat van de 'mentale kaart'. Dit lijkt een veelgebruikte strategie te zijn. Het houdt in dat men een mentale voorstelling maakt van de omgeving waarin men zich bevindt. Het doel is zoveel mogelijk beschikbare informatie te gebruiken om deze mentale ruimte zo volledig mogelijk in te vullen en er vervolgens naar te handelen. Zoals eerder aangehaald, verkiezen blinde en slechtziende personen doorgaans vertrouwde routes. Een waarschijnlijke reden is dat deze mentale kaart reeds vooraf beschikbaar is, dat men het optimale traject al heeft bepaald en herkenningspunten (tactiel, auditief, olfactorisch) heeft geïntegreerd. De cognitieve belasting van het verplaatsen is dan aanzienlijk lager dan in onbekende omgevingen die volledig moeten worden verkend.

3.3.2.2 Oversteken van de rijbaan

Een groot deel van de gesprekken tijdens de interviews had betrekking op het oversteken van de rijbaan. Een klassiek traject vereist dat men meerdere keren moet oversteken en voor blinde en slechtziende personen is dit niet altijd een handeling zonder risico. We zullen later in onze analyse verschillende specifieke aspecten rond het oversteken van de rijbaan verder uitwerken, maar het is belangrijk om eerst te begrijpen hoe de bevroegde personen dergelijke situaties benaderen. In de eerste plaats moeten zij de aankomst van een voertuig of andere weggebruiker kunnen anticiperen en daar gepast op kunnen reageren. Zij blijven daarom voortdurend alert, in het bijzonder op geluiden, om zich indien nodig zo snel mogelijk te kunnen terugtrekken.

De algemene strategie bestaat erin het verkeer te analyseren – voornamelijk via geluidssignalen – te begrijpen waar de voertuigen zich rondom hen bevinden en in welke richting zij rijden, om zo het juiste moment te bepalen om over te steken.

Daarnaast is het belangrijk om duidelijk te communiceren met andere weggebruikers om niet te worden verrast. Blinde en slechthziende personen hebben hiervoor een techniek ontwikkeld waarbij zij hun witte stok voor zich plaatsen in een 'barrièrepositie' om hun intentie om over te steken kenbaar te maken. Wanneer zij effectief oversteken, 'openen' zij eerst die barrière om het begin van de oversteekbeweging aan te geven. Een oversteek vereist dus niet alleen aandacht voor andere weggebruikers, maar ook dat men anderen de mogelijkheid geeft om het eigen gedrag te anticiperen. Om die reden steken deze personen in principe altijd over op een zebrapad, behalve wanneer dat niet mogelijk is.

"Een straat oversteken is een kwestie van houding en aandacht." – Y.

3.3.2.3 Hulpmiddelen

Blinde en slechthziende personen hanteren onderling vrij uiteenlopende verplaatsingsgewoonten, maar er bestaan verschillende hulpmiddelen en strategieën om hun mobiliteit te ondersteunen. Meerdere deelnemers gaven aan dat blinde en slechthziende personen onderling veel tips en strategieën uitwisselen. Daarnaast wordt een groot deel van de beschikbare ondersteuning aangeboden via organisaties die zich richten op personen met een visuele beperking. Deze organisaties focussen op uiteenlopende aspecten van mobiliteit met als doel een zo groot mogelijke autonomie te waarborgen. Zo bieden zij een specifieke opleiding in het gebruik van de witte stok aan, stellen zij navigatieoplossingen via GPS ter beschikking en leggen zij in bepaalde gevallen samen met de persoon concrete trajecten af, zodat herkenningspunten kunnen worden aangeleerd en geïntegreerd in de mentale kaart.

Er dient te worden opgemerkt dat een deel van deze populatie om uiteenlopende redenen geen beroep doet op dergelijke organisaties (bijvoorbeeld uit schaamte of door een gebrek aan informatie). De deelnemers aan deze studie werden vrijwel uitsluitend via deze organisaties gerekruteerd. Het is dus aannemelijk dat het perspectief ontbreekt van een groep personen die minder opleiding heeft gekregen en voor wie verplaatsingen mogelijk minder gestructureerd of risicovoller verlopen.

De witte stok

Het belangrijkste hulpmiddel waarover blinde en slechthziende personen beschikken, is de witte stok. De voornaamste functie van de stok – maar niet de enige – is het verschaffen van tactiele informatie over de onmiddellijke omgeving, en in het bijzonder over wat zich vóór de persoon bevindt. Deze informatie vervult meerdere functies tijdens verplaatsingen te voet. In de eerste plaats maakt zij het mogelijk om potentiële obstakels op het traject te detecteren en te omzeilen. Daarnaast laat de stok toe om veranderingen in het wegdek, boordstenen, niveauverschillen en inkepingen waar te nemen, wat de oriëntatie vergemakkelijkt. De stok helpt ook bij het lokaliseren van specifieke herkenningspunten, zoals noppentegels die de aanwezigheid van een zebrapad aanduiden.

Naast informatie over de omgeving fungeert de witte stok ook als communicatiemiddel naar andere weggebruikers. Zo kan zij bijvoorbeeld aangeven dat iemand op het punt staat de rijbaan over te steken. Eén van de deelnemers gaf aan zijn stok op te heffen wanneer hij hulp nodig heeft en om nabijgelegen voetgangers aan te spreken. In principe heeft elke persoon die een witte stok gebruikt vooraf een specifieke opleiding gekregen om deze correct en veilig te hanteren.

De hond

De geleidehond wordt door het brede publiek vaak gezien als hét hulpmiddel bij uitstek voor blinde personen, maar zijn rol wordt niet altijd correct begrepen. Zoals verschillende deelnemers toelichtten, bestaat de belangrijkste functie van de hond erin obstakels betrouwbaarder te vermijden dan met een stok alleen en de persoon te begeleiden naar een specifiek doel, zoals een zebrapad of een bushalte. De hond onthoudt echter geen vast traject; hij moet aangestuurd worden. De persoon blijft steeds zelf verantwoordelijk voor de richting en de beslissingen.

"Met de stok bots ik tegen een paal, een paaltje, een fietswiel... Met een hond vermijd ik dat allemaal, dus dat is comfortabeler." – A.

De rol van de hond op het vlak van verkeersveiligheid is in feite eerder beperkt. In het bijzonder biedt hij geen ondersteuning bij het oversteken van de rijbaan. De voetganger moet zelf kunnen inschatten wanneer het veilig is om over te steken.

"Het is niet de hond die een auto ziet. Honden kunnen afstanden niet inschatten, net zomin als wij, blinden, en we mogen dus niet op onze hond rekenen om de rijbaan over te steken." – R.

Bovendien is een geleidehond niet voor iedereen toegankelijk. Naast de hoge kostprijs vergt hij dagelijks een aanzienlijke investering in tijd en zorg. Daarenboven zijn sommige personen allergisch voor honden. Een geleidehond kan daarom niet als een universele oplossing worden beschouwd.

Navigatie-applicaties

Het gebruik van navigatie-applicaties (bijvoorbeeld Google Maps) verschilt sterk van persoon tot persoon. Sommige deelnemers gaven aan deze niet te gebruiken omdat zij zich uitsluitend op vertrouwde trajecten begeven of omdat de instructies volgens hen onvoldoende gedetailleerd zijn.

"Ik gebruik geen GPS omdat de laatste meters ontbreken." – A.

Voor personen die regelmatig onbekende trajecten afleggen, is GPS daarentegen een onmisbaar hulpmiddel.

"Ik heb de GPS in één oor, met veel aanwijzingen." – K.

De meest gebruikte applicatie is Google Maps, maar sommige personen verkiezen meer gespecialiseerde tools, zoals Moovit voor het openbaar vervoer of Voice Vista.

Andere voetgangers

Hoewel de bevroegde blinde en slechthziende personen er de voorkeur aan geven zich zo zelfstandig mogelijk te verplaatsen, vragen zij in bepaalde situaties toch hulp aan andere voetgangers. De drempel om hulp te vragen verschilt per persoon en hangt onder meer samen met de persoonlijkheid. Niettemin vormen andere voetgangers een potentiële hulpbron. Zo gaf één deelnemer aan doorgaans iemand om hulp te vragen bij het instappen in de bus. Anderen vragen enkel hulp wanneer zij zich onzeker, gedesoriënteerd of onveilig voelen.

"Ik vraag liever hulp wanneer ik echt gedesoriënteerd ben bij het oversteken van een straat." – D.

Fluohesje

Van de 15 deelnemers gaven er twee aan dat zij bij elke verplaatsing een fluohesje dragen. Zij beschouwen dit als een manier om beter zichtbaar te zijn voor automobilisten en zo het risico te beperken, in het bijzonder bij het oversteken van de rijbaan.

3.3.2.4 Infrastructuur

Zelfs bij de deelnemers die zich het meest comfortabel voelen om zich op een rijbaan te verplaatsen, bestond er een algemene consensus dat bepaalde types infrastructuur beter vermeden worden. De concrete locaties die door de verschillende deelnemers werden genoemd, lopen niet volledig gelijk, maar we bespreken hier de situaties die herhaaldelijk werden aangehaald als te vermijden of net te verkiezen.

In het algemeen geven blinde en slechthziende personen de voorkeur aan omgevingen die eenvoudig te interpreteren zijn en zo weinig mogelijk onzekerheid bevatten. Zoals eerder vermeld, genieten eenvoudige, rechte trottoirs de voorkeur omdat zij overzichtelijk zijn en in principe geen specifieke risico's inhouden. Hoe complexer een infrastructuur te interpreteren is, hoe groter de neiging om die te vermijden. Een bijkomend criterium is voorspelbaarheid. Zo wordt een snellere weg doorgaans vermeden, omdat risico's zich daar sneller en minder voorspelbaar aandienen dan op een weg met een lagere snelheidslimiet.

Kruispunten/zebrapaden

Het oversteken van de rijbaan vormt doorgaans een complexe en soms risicovolle handeling voor blinde en slechthziende personen. De moeilijkheidsgraad varieert echter sterk naargelang de locatie. Het is duidelijk dat het oversteken van een zebrapad in een eenrichtingsstraat met een snelheidslimiet van 30 km/u niet hetzelfde risico inhoudt als het oversteken van een druk kruispunt met meerdere rijstroken op een weg waar 50 km/u is toegestaan.

Bij het oversteken van grote kruispunten vormt de aanwezigheid van verkeerslichten met een geluidssignaal een cruciale ondersteuning. Sommige deelnemers gaven aan hun trajectkeuze af te stemmen op de aanwezigheid van dergelijke rateltickers. Het geluidssignaal werd door de meerderheid van de deelnemers aangehaald, omdat het toelaat het kruispunt niet zelf te moeten interpreteren en zo fouten – en dus potentiële gevaren – te vermijden.

"Ik moet een aantal straten oversteken en ik probeer dat te doen waar er een verkeerslicht is dat mij beschermt." – Y.

Wanneer er geen akoestisch signaal aanwezig is, moeten blinde en slechtziende personen zelf het geschikte moment bepalen om over te steken, bijna uitsluitend op basis van verkeersgeluiden. Een meer gedetailleerde analyse van het gebruik van geluid en de moeilijkheden die dit kan meebrengen, volgt in een afzonderlijk hoofdstuk. De gangbare strategie bestaat erin te luisteren naar het verkeer om te onderscheiden welke voertuigen stilstaan en welke in beweging zijn. Op basis daarvan wordt bepaald wanneer het mogelijk is om over te steken.

"Als er geen akoestisch signaal is, dan vertrouw ik, zoals veel mensen, op het rijdende of stilstaande verkeer." – Y.

Deze strategie kent echter beperkingen, waardoor bepaalde kruispunten of zebapaden gevaarlijk kunnen zijn. Meer specifiek zorgen kruispunten met meerdere rijstroken en niet-gelijktijdige verkeersfasen voor een aanzienlijk complexere situatie, waardoor men bij het oversteken nooit volledig zekerheid heeft. Ook op snellere wegen volstaat het louter luisteren naar voertuigen niet, omdat auto's vaak te laat worden gedetecteerd om nog tijdig te kunnen anticiperen.

"De auto's rijden daar 70 km/u. Er is een verkeerslicht, maar ik zal die straat nooit oversteken zonder hulp, het is te gevaarlijk." – Y.

Tijdens de interviews werd eveneens sterk de nadruk gelegd op een centraal element bij het oversteken: de podotactiele tegels die in stedelijke omgevingen alomtegenwoordig zijn geworden. Deze tegels, bestaande uit ribbels of noppen in het wegdek vóór zebapaden, werden in alle interviews vermeld. Zij zijn onmisbaar om zich exact te positioneren ten opzichte van het zebapad dat men wil gebruiken en om ervoor te zorgen dat men het juiste traject aanhoudt en dus niet diagonaal oversteekt.

Rotondes

Rotondes werden door twee deelnemers expliciet genoemd als locaties die beter vermeden worden, wat aansluit bij de bevindingen in de wetenschappelijke literatuur. Rotondes brengen bijkomende moeilijkheden met zich mee voor blinde en slechtziende personen, omdat er geen duidelijke, eenduidige rijrichting is. Dit bemoeilijkt de interpretatie van auditieve informatie. Geluiden van voertuigen lopen gemakkelijker in elkaar over en het is moeilijker om hun traject correct te analyseren. Bovendien is het doel van een rotonde net om het verkeer vlot te laten doorstromen, zonder verplichte stopmomenten. Hoewel dit de verkeersdoorstroming bevordert, betekent het ook dat er geen duidelijk, vast moment is waarop veilig kan worden overgestoken; men moet erop vertrouwen dat automobilisten die de rotonde verlaten, effectief stoppen. Dat kan een belangrijke bron van stress zijn.

In het bijzonder werden rotondes waar ook een tram doorheen rijdt als bijzonder problematisch ervaren. Zij zijn nog moeilijker te interpreteren en de tramhalte bevindt zich vaak in het midden van de rotonde, waardoor zij moeilijk toegankelijk is.

Fietspaden

Fietspaden vormen een probleem wanneer zij niet fysiek gescheiden zijn van het trottoir. In veel stedelijke situaties bevinden fietspaden zich op hetzelfde niveau als het trottoir en worden zij enkel aangeduid door een kleurverschil. Voor een blinde persoon is dit uiteraard volledig ondetecteerbaar, waardoor men onbewust op het fietspad kan terechtkomen.

3.3.3 Gebruik van geluid

Terwijl de witte stok toelaat om te detecteren wat zich in de onmiddellijke nabijheid bevindt, vormt geluid de voornaamste informatiebron over de meer afgelegen omgeving. Over het belang van geluid om zich op een veilige manier op de openbare weg te verplaatsen, bestaat een duidelijke consensus onder de deelnemers. Bij slechthorende personen is geluid, afhankelijk van het type visuele beperking, niet de enige bron van informatie over de verdere omgeving, maar het blijft steeds een waardevolle aanvulling, in het bijzonder voor personen met tunnelzicht. In dat geval verschaft geluid in één luistermoment een globaal overzicht, terwijl het veel tijd en inspanning zou vergen om met de ogen de volledige ruimte rondom zich systematisch te scannen.

"Het is het belangrijkste zintuig voor ons als mensen met een visuele beperking; het probeert het gebrek aan zicht te compenseren." – D.

Opnieuw blijkt dat het gebruik van geluid functies vervult die kunnen worden onderverdeeld in twee eerder aangehaalde categorieën: zich oriënteren en veilig blijven.

3.3.3.1 Om zich te oriënteren

In de eerste plaats maakt geluid het mogelijk om de nabije omgeving te begrijpen en na te gaan of men zich nog op het juiste traject bevindt.

"Je leert in het midden van het trottoir te lopen, door naar het verkeer te luisteren." – A.

Hoe complexer de omgeving waarin men zich bevindt, hoe actiever deze auditieve signalen worden gebruikt. Op een rechte trottoir zal men vooral luisteren naar voorbijrijdende voertuigen om de richting van het traject te bevestigen. In complexere omgevingen (rotondes, grote kruispunten, parkings ...) wordt geluid intensiever en systematischer ingezet, omdat men er gemakkelijker het overzicht verliest.

"In onoverzichtelijke ruimtes volg ik het verkeer, ik oriënteer mij op het verkeer. In meer standaardomgevingen is dat minder nodig." – S.

Zoals eerder vermeld, kunnen geluiden ook fungeren als herkenningspunten op vertrouwde trajecten. Blinde en slechthorende personen tonen daarbij vaak creativiteit in hun gebruik van geluid. Alle eigenschappen van geluid kunnen worden benut. Zo verwezen verschillende deelnemers naar het gebruik van het 'gevoel voor massa's' of echolocatie.

"Er is een effect van geluidsverandering. Als ik bijvoorbeeld langs een bestelwagen loop, merk ik dat wat links of rechts van mij was, plots iets veel massievers is." – Y.

Deelnemers gebruiken ook vaak echo's om een parkingtoegang, een brug of een doorgang te lokaliseren. Eén deelnemer gaf aan soms zelf geluid te genereren met de witte stok om te bepalen of een deur vóór hem of haar open of gesloten is, waarbij de weerkaatsing van het geluid wordt gebruikt als een soort sonar. Er leeft het idee dat personen die hun zicht verloren hebben automatisch een beter gehoor ontwikkelen. Volgens de bevroegde blinde personen horen zij niet noodzakelijk beter dan anderen, maar hebben zij zich getraind om auditieve informatie grondiger en systematischer te benutten.

"Ik hoor niet beter dan u (...), maar ik gebruik de informatie op een andere manier." – Y.

3.3.3.2 Voor de veiligheid

"Wanneer we een voertuig horen, komt het binnen in onze omgeving, in onze mentale kaart. Wat we niet horen, nemen we niet mee in rekening." – D.

Geluid vormt de belangrijkste, en soms zelfs de enige, informatiebron over het omringende verkeer. Het is daarom essentieel voor de verkeersveiligheid van blinde en slechthorende personen. Tijdens de interviews bleek dat het gebruik van geluid in het verkeer grotendeels intuïtief gebeurt; het was niet altijd eenvoudig om concrete voorbeelden te verkrijgen. De geïnterviewden spraken vooral over geluid wanneer zij de moeilijkheden beschreven die ontstaan bij een gebrek eraan. Die moeilijkheden worden verderop besproken, maar hier wordt toegelicht hoe geluid wordt ingezet, met name bij het oversteken van de rijbaan.

Zoals eerder aangehaald vereist het oversteken van een rijbaan dat men de omgeving analyseert, de rijrichtingen bepaalt en voertuigen detecteert, evenals de richting waarin zij rijden. Blinde en slechtziende personen construeren daarbij een mentale kaart van hun omgeving om te bepalen in welke richting en op welk moment zij veilig kunnen oversteken. Wanneer het om een eenvoudige rijbaan gaat, komt de taak neer op het onderscheiden of er voertuigen naderen en, zo ja, aan welke snelheid, om te beoordelen of oversteken mogelijk is. In dat geval zijn interaurale verschillen in geluidsniveau en timing cruciaal om de positie en de richting van een voertuig te analyseren, zoals ook in de literatuurstudie werd toegelicht.

In complexere situaties, zoals kruispunten met meerdere rijstroken, wordt de taak aanzienlijk ingewikkelder. Eerst moet het kruispunt mentaal worden gestructureerd: hoeveel rijstroken zijn er, is er een verkeerslicht (met of zonder akoestisch signaal), zijn er meerdere rijstroken per richting ... Vervolgens moet worden bepaald op welk moment er voertuigen op de verschillende rijstroken in beweging zijn. Zelfs wanneer men een geschikt moment heeft vastgesteld om over te steken, blijft waakzaamheid vereist voor mogelijks naderende voertuigen.

"Op een kruispunt moet je altijd analyseren: hoeveel straten, welke richtingen, wanneer auto's vertrekken of stoppen, is er een verkeerslicht of niet...?" – A.

"Als er geen rateltikker is, proberen we te horen of de auto's stilstaan of niet." – K.

Dit alles verloopt via het gehoor en vereist dat een grote hoeveelheid auditieve informatie gelijktijdig wordt verwerkt.

3.3.3.3 Moeilijkheden bij het gebruik van geluid

Om de complexiteit nog te vergroten, is het gehoor – veel meer dan het zicht – voortdurend onderhevig aan interferenties en veranderende omstandigheden. Hieronder worden de belangrijkste moeilijkheden besproken die door de deelnemers werden aangehaald bij het gebruik van geluid.

Omgevingsgeluid

Dit thema kwam in alle interviews naar voren en zal in het verdere verloop van deze studie een centrale rol spelen. De belangrijkste moeilijkheid bij het gebruik van geluid is dat het gevoelig is voor interferentie, met andere woorden voor andere geluidsbronnen. Dat is ook een van de redenen waarom blinde en slechtziende personen drukbezochte plaatsen vaak vermijden: geluiden vermengen zich en het wordt moeilijk om afzonderlijke geluidsbronnen van elkaar te onderscheiden.

Twee voorbeelden werden vrijwel systematisch genoemd: werfzones en hulpdienstvoertuigen. Dit zijn typische bronnen van zeer krachtige geluiden die regelmatig in de openbare ruimte voorkomen. Blinde en slechtziende personen vermijden werfzones omdat het geproduceerde lawaai andere auditieve informatie volledig kan overstemmen. Zich dan veilig op de openbare weg verplaatsen wordt nagenoeg onmogelijk.

"Er is altijd dat gevoel van gevaar wanneer er werken zijn. Dat zorgt voor een verzadiging op auditief niveau." – D.

"Alles wat stoort, zoals een hulpvoertuig dat voorbijrijdt ... Ik blijf dan liever staan, want anders verlies ik te veel informatie." – Y.

De weersomstandigheden

Er zijn tal van voorbeelden van hoe weersomstandigheden de verkeersgeluiden beïnvloeden. Sommige omstandigheden maskeren de omgeving eerder, zoals wind of hevige regenval. Andere kunnen net helpen bij het detecteren van voertuigen. Zo zijn voertuigen die rijden op een nat wegdek of over natte bladeren beter hoorbaar dan gewoonlijk. Sneeuw heeft eveneens een specifiek effect op het bandengeluid op het wegdek. Het is zelfs mogelijk om voertuigen die volledig stilstaan te detecteren wanneer de regen erop valt.

Deze voorbeelden tonen aan hoezeer de aard van de geluiden die men in het verkeer hoort – en die essentieel zijn voor de verkeersveiligheid van blinde en slechtziende personen – gevoelig is voor externe omstandigheden en van het ene moment op het andere ingrijpend kan veranderen.

De algemene vermindering van verkeersgeluid

De algemene perceptie van verkeerslawaai bij de brede bevolking is eerder negatief. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de ontwikkeling van nieuwe technologieën in de transportsector gepaard gaat met een algemene vermindering van het geluidsniveau. Tijdens de interviews werden verschillende voorbeelden aangehaald. Ook zonder het over elektrische of hybride voertuigen te hebben, neemt het geluidsniveau van verbrandingsmotoren doorheen de jaren af. Nieuwe wegdekken worden bovendien ontworpen om het rolgeluid van banden maximaal te beperken. Ook recente trams zijn ontwikkeld met het oog op een zo laag mogelijk rolgeluid, wat door een van de deelnemers expliciet werd vermeld.

In het algemeen zijn de deelnemers zich bewust van de hinder die stadsgeluiden veroorzaken en begrijpen zij de wens om het globale geluidsniveau te reduceren. Tegelijk voelen zij zich bij hun verplaatsingen geleidelijk aan onzekerder en betreuren zij als minderheid onvoldoende te worden meegenomen in de ontwikkeling van deze nieuwe technologieën.

Een bijzonder sprekend voorbeeld, waarop we iets uitgebreider ingaan, is het 'start-en-stopsysteem' dat in recente voertuigen wijdverspreid is. Dit systeem werd in de meerderheid van de interviews negatief beoordeeld, omdat het een belangrijk verlies aan auditieve informatie betekent voor blinde en slechtziende personen. Zoals eerder aangehaald moeten zij, om een kruispunt te analyseren, kunnen bepalen welke rijstroken in beweging zijn en welke stilstaan. Door het automatisch uitschakelen van de motor maken voertuigen die stationair staan echter geen geluid meer en zijn ze dus niet langer detecteerbaar. Dat maakt het oversteken van complexe kruispunten nog risicovoller.

3.3.4 De QRTV's

3.3.4.1 Algemeen gevoel

Op basis van wat tijdens de verschillende interviews, tijdens de rekrutering en in de andere fasen van dit onderzoek werd vastgesteld, blijkt duidelijk dat het thema van stille voertuigen een bron van bezorgdheid vormt binnen de gemeenschap van blinde en slechtziende personen. De meeste vertegenwoordigers van verenigingen die wij contacteerden, gaven aan opgelucht te zijn dat deze problematiek belangstelling krijgt van de overheid. Als aanspreekpunt voor deze gemeenschap worden zij vaak met deze vragen geconfronteerd.

"Ik hoop dat zij voor deze studie contact met u zullen opnemen, want ze lijkt me van cruciaal belang."

Onze interviews bevestigen dit beeld: bijna alle bevroegde personen gaven aan bezorgd te zijn over de toenemende aanwezigheid van stille voertuigen op de openbare weg. Voor blinde en slechtziende personen vormen deze voertuigen een bijkomende bron van stress tijdens hun verplaatsingen te voet. Zoals eerder beschreven is geluid een essentieel element dat voortdurend wordt gebruikt. De mogelijke aanwezigheid van voertuigen die zij niet kunnen horen en die dus op elk moment onverwacht kunnen opduiken, zorgt dagelijks voor grote ongerustheid. Deze personen steunen sterk op hun vermogen om potentiële gevaren te anticiperen. Stille voertuigen zijn echter veel moeilijker te anticiperen, omdat zij in veel gevallen veel later worden gedetecteerd dan voertuigen met een verbrandingsmotor.

"Een auto met verbrandingsmotor hoor je van verder aankomen; dat laat toe om te anticiperen en je traject bij te sturen vóór hij vlak bij je is. (Met elektrische wagens) ontbreekt dat noodzakelijke anticipatievermogen." – K.

"Ik denk dat we op een dag geconfronteerd zullen worden met een stijging van het aantal dodelijke slachtoffers onder kwetsbare weggebruikers in Brussel, omdat het aantal elektrische wagens zal toenemen." – Y.

Zoals in de voorgaande paragrafen werd toegelicht, stellen verplaatsingen te voet, zeker in stedelijke context, blinde en slechtziende personen bloot aan een zeer grote verscheidenheid aan situaties. Elk kruispunt, elke parking, elk plein heeft eigen kenmerken die men moet kunnen begrijpen om ze veilig te kunnen gebruiken. Bovendien heeft eenzelfde plaats niet op elk moment van de dag dezelfde akoestische eigenschappen; die variëren naargelang het tijdstip, de weersomstandigheden en de aanwezige geluidsbronnen (werken, vliegtuigen ...). Zich verplaatsen is dus een cognitief complexe taak voor blinde en slechtziende personen. De opkomst van stille voertuigen voegt daar nog een extra laag van complexiteit en onvoorspelbaarheid aan toe.

"Mijn enige aanpassingstechniek is dubbel zo voorzichtig zijn." – S.

3.3.4.2 Negatieve ervaringen

De meerderheid van de bevroegde personen kon minstens één negatieve ervaring met een elektrisch voertuig beschrijven. In de eerste plaats moet worden benadrukt dat de gerapporteerde incidenten gelukkig geen gevolgen hadden voor hun fysieke integriteit. Van de 15 geïnterviewde personen gaven er 4 aan dat zij ooit zijn aangereden, telkens aan lage snelheid en zonder ernstige lichamelijke gevolgen. Daartegenover staat dat een meerderheid minstens één negatieve ervaring kon aanhalen waarbij een elektrisch voertuig hen verraste en een plotse schrikreactie veroorzaakte. Zeven personen werden bijna aangereden bij het oversteken van een rijbaan, en drie personen werden aangereden of bijna aangereden door een voertuig dat uit een garage of parkeerplaats reed. Deze twee situaties (het oversteken van een rijbaan en het vertrekken van een stilstaand voertuig) omvatten alle negatieve gebeurtenissen die door de deelnemers werden gerapporteerd.

Binnen onze steekproef omvatten de negatieve ervaringen geen ernstige incidenten met lichamelijke gevolgen. Toch blijkt duidelijk dat stille voertuigen een potentiële bron van gevaar en van onveiligheidsgevoelens vormen binnen deze gemeenschap. Bovendien bestaat onze steekproef, zoals eerder vermeld, uitsluitend uit personen die een opleiding hebben gevolgd en dus theoretisch minder risico lopen. Het is aannemelijk dat een deel van de populatie dat geen beroep heeft gedaan op begeleiding, kwetsbaarder is voor ernstigere ongevallen. De ongevallenstatistieken die in de literatuurstudie werden aangehaald, geven eveneens een duidelijke indicatie van de reële dreiging die stille voertuigen kunnen vormen. Eén van de deelnemers gaf toe bij elke verplaatsing een fluohesje te dragen, deels naar aanleiding van 'schrikmomenten' die hij had meegemaakt met elektrische voertuigen. Ook de personen die geen concrete negatieve ervaring hadden gehad met stille voertuigen, drukten zonder uitzondering hun bezorgdheid hierover uit.

"Ik denk dat dit soort ongevallen helaas met tientallen te tellen zijn (...), ik denk dat we niet moeten wachten tot er ernstige incidenten gebeuren om het probleem effectief aan te pakken." – K.

In de volgende paragraaf lichten we meer in detail toe op welke manier elektrische voertuigen in het dagelijks leven problemen kunnen veroorzaken.

3.3.4.3 Specifieke moeilijkheden in verband met QRTV's

Omgevingsgeluid

Zoals eerder toegelicht, is één van de belangrijkste moeilijkheden voor blinde en slechthorende personen dat het geluid van voertuigen kan worden gemaskeerd door omgevingsgeluid. Aangezien geluid gevoelig is voor interferentie, wordt in bepaalde situaties de detectie van voertuigen in de omgeving aanzienlijk complexer en gebeurt die bijgevolg veel later dan in andere omstandigheden. Blinde en slechthorende personen hebben de neiging om dergelijke situaties te vermijden. Elektrische of hybride voertuigen, die globaal een lager geluidsniveau hebben, worden nog makkelijker overstemd door omgevingsgeluid.

"Met het zicht kan je een auto van heel ver detecteren, niet met het gehoor, zeker niet bij elektrische wagens." – K.

Het lijkt erop dat voertuigen met een verbrandingsmotor zelf ook een maskerend effect hebben op het geluid dat door elektrische/hybride voertuigen wordt geproduceerd. In drukke omgevingen kan de cumulatieve geluid van klassieke voertuigen QRTV's quasi ondetecteerbaar maken. Dit maakt sommige oversteebewegingen bijzonder risicovol. Betrokkenen worden dan gedwongen een zekere mate van onzekerheid te aanvaarden bij het oversteken in druk verkeer.

"Dat maakt het oversteken moeilijk, je wordt altijd verrast." – Y.

Daarnaast kunnen andere elementen, die deels al eerder werden opgesomd, het geluid van elektrische voertuigen maskeren (regen, wind, wegenwerken, vliegtuigen ...).

"Ik heb hem niet waargenomen, waarschijnlijk door de regen; ik steek over en mijn stok werd geraakt." – D.

In de literatuurstudie werd aangetoond dat het verschil in geluidsniveau tussen elektrische/hybride voertuigen en voertuigen met een verbrandingsmotor vooral waarneembaar is onder een bepaalde snelheid (30 tot 50 km/u volgens de bronnen). Dat is een vaststelling die ook de meeste deelnemers maakten. De meerderheid gaf aan dat zij de grootste moeilijkheden ondervinden bij het detecteren van een elektrisch voertuig wanneer dit traag rijdt.

"Onder de 30 km/u is het moeilijk. Daarboven heb je evenveel informatie als bij andere voertuigen. Het is niet het motorgeluid dat mij helpt." – D.

Parkings/gedeelde ruimtes

Naast de moeilijkheden bij het oversteken van een rijbaan, hadden de negatieve ervaringen van de deelnemers ook betrekking op situaties waarin een voertuig stilstaat en vervolgens vertrekt. In het geval van een voertuig met verbrandingsmotor worden blinde en slechthorende personen gewaarschuwd door het geluid van de startende motor. Zij kunnen zich dan opzij begeven om elk risico op een aanrijding te vermijden. Bij stille voertuigen ontbreekt dit geluid en is er geen auditieve waarschuwing dat een voertuig zal vertrekken. Bovendien zijn dergelijke plaatsen vaak gekenmerkt door beperkte zichtbaarheid en dode hoeken, waardoor ook de bestuurder een voetganger die achter het voertuig nadert mogelijk niet detecteert. Dit verklaart de frequentie van dit soort incidenten, die weliswaar meestal zonder ernstige gevolgen blijven, maar een groot deel van onze doelgroep treffen.

Gedeelde ruimtes waar voetgangers en voertuigen zich mengen, werden door sommige deelnemers eveneens als risicogebieden benoemd. Het ontbreken van een duidelijke afbakening tussen voetgangers- en rijzones impliceert dat men zijn intenties moet communiceren naar andere weggebruikers. Dat gebeurt vaak via oogcontact, wat uiteraard niet mogelijk is voor blinde of slechthorende personen. Verschillende deelnemers gaven aan dergelijke zones te vermijden omdat ze voor hen verwarrende situaties kunnen creëren.

Bestuurders van QRTV's

Tijdens de interviews vroegen wij de deelnemers naar hun mening over bestuurders van stille voertuigen. De bedoeling was na te gaan of zij vinden dat deze bestuurders zich bewust zijn van het feit dat zij moeilijker detecteerbaar zijn, en of zij hun rijgedrag daaraan aanpassen. De meeste respondenten gaven aan dat zij dat niet zeker weten, maar sommigen hadden het gevoel dat bestuurders zich hiervan bewust zijn en effectief voorzichtiger rijden. Wat eveneens naar voren kwam, is dat bestuurders vaak niet, of niet snel genoeg, opmerken dat een voetganger blind of slechthorend is. Dat kan aanleiding geven tot conflict- of verwarringssituaties.

"Het gebeurt dat bestuurders tekenen doen om over te steken, maar wij zien dat natuurlijk niet." – D.

Detectie van openbaar vervoer

Een deel van de deelnemers wees ook op een moeilijkheid in verband met de elektrificatie van het openbaar vervoer. Blinde personen merken blijkbaar regelmatig niet dat hun bus is aangekomen en dat zij kunnen instappen. Dit probleem hadden wij vooraf niet voorzien en het valt enigszins buiten het strikte veiligheidskader van deze studie, maar het blijkt relatief frequent voor te komen. Zoals eerder toegelicht, maken alle bevroegde personen regelmatig gebruik van het openbaar vervoer, en het niet kunnen horen van een bus of zelfs een taxi aan de halte vormt een reëel dagelijks ongemak.

3.3.5 De oplossingen

Vooreerst is het belangrijk te benadrukken dat de geïnterviewde personen in het algemeen niet gekant zijn tegen stille voertuigen als zodanig. Zij erkennen de voordelen van deze nieuwe technologieën, zowel op het vlak van ecologie als van geluidsreductie. Hun wens is veeleer dat er oplossingen worden uitgewerkt die een veilige co-existentie mogelijk maken, zeker in het licht van het steeds groter wordende aandeel stille voertuigen binnen het Belgische wagenpark.

3.3.5.1 AVAS

Algemeen gevoel

Het toevoegen van een kunstmatig geluid lijkt de voornaamste oplossing te zijn die door blinde en slechthorende personen naar voren wordt geschoven. In de verschillende afgenomen interviews hoefden wij dit onderwerp zelf nauwelijks aan te snijden; het kwam spontaan en snel ter sprake. De meerderheid van de bevroegde personen verwees naar dit kunstmatig geluid, zonder het noodzakelijk bij naam te noemen, nog vóór wij de vraag stelden. Het lijkt erop dat het AVAS-systeem, in de perceptie van blinde en slechthorende personen, de meest voor de hand liggende piste is om een betere co-existentie met elektrische of hybride voertuigen mogelijk te maken.

Zoals in de voorgaande paragrafen en in de literatuurstudie werd toegelicht, zijn auditieve signalen essentieel voor autonome verplaatsingen van blinde en slechtziende personen. Zij maken in de eerste plaats gebruik van geluid en een groot deel van de aangeleerde of doorgegeven strategieën steunt hierop. Het bevorderen van een oplossing die voertuigen auditief detecteerbaar maakt, sluit dan ook logisch aan bij deze reeds ingeburgerde strategieën. Het AVAS lijkt een systeem te zijn dat blinde en slechtziende personen toelaat om zo veel mogelijk controle te behouden over hun omgeving en hen in staat stelt om zelf actor te blijven van hun eigen veiligheid. Bovendien dient geluid in de publieke ruimte niet uitsluitend veiligheidsdoeleinden, maar vervult het permanent ook andere functies, onder meer om zich te oriënteren en de omgeving te begrijpen.

Ondanks het feit dat het merendeel van de stille voertuigen in het huidige Belgische wagenpark uitgerust is met een AVAS-systeem, blijft de situatie volgens de meeste bevroegde personen zorgwekkend. Bijna geen enkele deelnemer gaf aan tevreden te zijn of het AVAS bewust te gebruiken als informatiebron tijdens verplaatsingen. Uit de interviews spreekt duidelijk een gevoel van ontevredenheid, dat aan verschillende factoren kan worden toegeschreven.

Het geluidsniveau

Vooreerst zouden AVAS-systemen in het algemeen onvoldoende krachtig zijn om er betrouwbaar op te kunnen rekenen.

"De wagen moet eigenlijk al voorbij zijn voor je hem hoort." – Y.

Een groot deel van de bevroegde personen geeft aan dat het geluid dat aan elektrische wagens wordt toegevoegd slechts in beperkte omstandigheden hoorbaar is en in de praktijk onvoldoende bruikbaar is, zeker in een stedelijke context. Voor velen wordt het geluid te gemakkelijk overstemd door omgevingsgeluid. Het volstaat zich op een drukke verkeersas te bevinden om het AVAS volledig ondetecteerbaar te maken. De deelnemers gaven talrijke voorbeelden van dagelijkse geluiden die het AVAS-geluid volledig kunnen maskeren.

"Die geluiden gaan gewoon op in andere geluiden, en dat is net de moeilijkheid: de wagen maakt wat geluid, maar naast de bus die rijdt, naast de wagen met verbrandingsmotor die meer lawaai maakt, naast de moto, naast een kind dat roept ..." – K.

"Dat geluid, als het regent, wordt het gemaskeerd. Dan bestaat het gewoon niet meer." – Y.

In dergelijke omstandigheden vermindert het AVAS het stressgevoel dat gepaard gaat met de aanwezigheid van elektrische voertuigen op de openbare weg niet, omdat het te laat wordt gedetecteerd om er rekening mee te houden.

Wat het geluidsvolume van het AVAS betreft, vroegen wij de deelnemers ook of een verhoging mogelijk te ver zou kunnen gaan en contraproductief zou worden, of het AVAS eerder een bron van geluidshinder dan een hulpmiddel zou kunnen worden. De antwoorden zijn vrij eensluidend: zolang het niet buitensporig wordt, zou een verhoging van het geluidsniveau gunstig zijn voor de detectie van elektrische voertuigen zonder andere geluidsbronnen te overstemmen. Geluid blijft voor blinde en slechtziende personen een informatiebron en zij zijn in staat verschillende geluidsbronnen van elkaar te onderscheiden. De enige bezorgdheid betreft geluidsoverlast. Hoewel de bevroegde personen baat hebben bij omgevingsgeluid, zijn zij zich ook bewust van en ondervinden zij hinder van een te hoge geluidsbelasting in situaties met hoge verkeersdichtheid. In dat perspectief benadrukken zij de nood aan een evenwicht dat enerzijds voldoende detecteerbaarheid van elektrische voertuigen garandeert om risico's te beperken, en anderzijds de reeds aanzienlijke stedelijke geluidsoverlast niet verder doet toenemen. Sommigen suggereerden zelfs een geleidelijke vermindering van het AVAS-volume indien het wagenpark grotendeels uit stille voertuigen zou bestaan.

De aard van het geluid

In de gesprekken over het AVAS kwam regelmatig de moeilijkheid naar voren om het AVAS-geluid te herkennen en het onmiddellijk met een voertuig te associëren. De huidige Europese regelgeving legt geen specifieke aard van het geluid op, maar focust voornamelijk op minimale geluidsniveaus. Dit leidt tot een grote variatie in de aangeboden geluiden afhankelijk van de constructeur. Sommige elektrische/hybride voertuigen imiteren het geluid van een traditionele motor, terwijl andere een eerder "futuristisch" geluid produceren, dat door deelnemers soms wordt omschreven als het geluid van een vliegende schotel of een ventilator.

"Je hoort het wel, het is zo'n ventilatorachtig geluid, maar het is niet het meest opvallende." – Y.

Los van de voertuigen die het geluid van een klassieke motor nabootsen, zorgt deze diversiteit aan geluiden voor verwarring bij blinde en slechthorende personen, wat contraproductief kan zijn aangezien zij de primaire doelgroep van het AVAS zijn. In het algemeen hebben zij nood aan reflexen die gekoppeld zijn aan het geluid van een voertuig, en aan een directe associatie tussen een specifiek geluid en een potentieel gevaar. Eén van de deelnemers gaf aan dat zij haar gedrag aanpast naargelang het naderende voertuig: zij reageert anders op het geluid van een motorfiets, een fiets of een zwaarder voertuig. In gevaarlijke situaties kan bovendien een snelle reactie vereist zijn. Een onbekend geluid vergt meer tijd om te identificeren en kan de reactietijd van de voetganger verlengen.

"Het moet echt iets zijn dat tot ons spreekt, dat zegt: 'Ah, dat is een elektrische auto'..." – S.

Verschillende deelnemers verklaarden dat zij een elektrische wagen vaak wel herkennen aan de specifieke geluidssignatuur van het AVAS, maar dat dit te laat gebeurt, nadat het voertuig al is gepasseerd.

In de meeste interviews staan deelnemers eerder positief tegenover het reproduceren van het geluid van een traditionele motor. Zij hebben dit geluid immers al onbewust geassocieerd met een auto en strategieën ontwikkeld rond dit specifieke geluid. Zij hebben geleerd er zo veel mogelijk informatie uit te halen, bijvoorbeeld door te letten op de verandering in frequentie om te bepalen of een voertuig versnelt of vertraagt.

De eigenschappen van het AVAS

Naast een zekere uniformisering van het geluid van elektrische/hybride voertuigen, werd ook gesproken over verschillende geluidskennmerken die nuttig zouden kunnen zijn, hetzij omdat zij beter detecteerbaar zijn, hetzij omdat zij meer informatie bevatten.

Zo wensen de meeste deelnemers de bestaande koppeling tussen toonhoogte (frequentie) en snelheid te behouden, zoals die in zekere mate aanwezig is bij voertuigen met verbrandingsmotor. Meerdere deelnemers gaven aan een eerder hoog geluid te verkiezen, zodat het zich onderscheidt van rolgeluid en gemakkelijker waarneembaar is tussen andere voertuigen.

Bijna alle deelnemers benadrukten bovendien dat het AVAS geen onaangenaam, schel of stresserend geluid mag worden. Zij zijn zich bewust van en ondervinden zelf de gevolgen van de bestaande stedelijke geluidsoverlast en wensen geen geluidsescalatie die voor iedereen nadelig zou zijn.

"Het zou een heel specifiek volume moeten hebben, niet te zacht en niet te luid, om te vermijden dat het een te opdringerig geluid wordt." – D.

AVAS bij stilstand

Een thema dat regelmatig terugkwam in de interviews is dat van stilstaande voertuigen. Op basis van de gesprekken is het duidelijk dat het geluid van een voertuig, zelfs wanneer het stilstaat, nuttig is voor blinde en slechthorende personen. Verschillende deelnemers gaven aan dat zij onder meer het geluid van stilstaande voertuigen aan verkeerslichten gebruiken om de fasen te analyseren en te bepalen wanneer het geschikt is om over te steken.

Files vormen een ander voorbeeld dat in meerdere interviews werd aangehaald. Wanneer die zich in stedelijke context voordoen, moet een blinde of slechthorende persoon soms tussen stilstaande voertuigen oversteken. Indien sommige van deze voertuigen volledig stil zijn, wordt die taak aanzienlijk risicovoller. Om die reden betreurden verschillende deelnemers zowel de aanwezigheid van het 'Start & Stop'-systeem in hedendaagse voertuigen als het feit dat het AVAS niet noodzakelijk actief moet zijn wanneer een voertuig niet rijdt.

3.3.5.2 Andere oplossingen

Hoewel het AVAS vandaag het centrale thema is wanneer men het heeft over de detectie van elektrische voertuigen, werden in de verschillende interviews ook andere oplossingen aangehaald die de veiligheid van slechthorende en blinde personen kunnen verbeteren.

Generieke mobiliteitshulpmiddelen voor personen met een visuele beperking

De deelnemers verwezen onder meer naar de aanwezigheid van noppentegels, dat wil zeggen reliëfmarkeringen in beton die ter hoogte van zebrapaden zijn aangebracht en die blinde en slechthorende personen via hun witte stok naar de oversteekplaats leiden. Deze voorzieningen zijn alomtegenwoordig in het straatbeeld en zijn uitgegroeid tot een essentieel element voor de mobiliteit van deze doelgroep. Zelfs bij

vertrouwde en herhaalde trajecten kan een blinde persoon immers gemakkelijk licht afwijken of iets grotere of kleinere passen zetten dan gewoonlijk. Zij hebben dus referentiepunten nodig om exact te weten waar zij kunnen oversteken en in welke richting het zebrapad zich bevindt, zodat zij niet diagonaal oversteken en zo weinig mogelijk tijd op de rijbaan doorbrengen.

Verkeerslichten met een akoestisch signaal vormen eveneens een belangrijke oplossing om het risico op conflicten met andere weggebruikers te beperken. Zoals eerder in het kwalitatieve luik en in de literatuurstudie werd beschreven, doen veel risico's zich voor wanneer blinde of slechtziende personen de rijbaan moeten oversteken. De aanwezigheid van verkeerslichten met geluidssignalen kan deze risico's aanzienlijk verminderen of zelfs volledig wegnemen. Zij spelen dan ook een doorslaggevende rol bij de keuze van de te volgen route.

Beperking van het aanrijdingsrisico

Meerdere deelnemers verwezen ook naar het automatisch noodremstelsel waarmee steeds meer voertuigen zijn uitgerust. Zij gaven aan gerustgesteld te zijn door het bestaan en de toenemende verspreiding van dit stelsel. Het vermindert in zekere mate hun afhankelijkheid van de waakzaamheid van bestuurders.

Sensibilisering/opleiding

Wij vroegen de deelnemers of zij het gevoel hebben dat bestuurders van stillere voertuigen zich ervan bewust zijn dat zij moeilijker detecteerbaar zijn dan andere voertuigen. Hoewel veel antwoorden eerder veronderstellingen of onzekerheden betroffen, pleitte de meerderheid van de deelnemers voor een grotere sensibilisering van bestuurders, zowel over het stille karakter van hun voertuig als breder over de aanwezigheid van personen met een visuele beperking in het verkeer.

"In het kader van de risicoperceptietest kan een automobilist die met een elektrisch voertuig rijdt, geconfronteerd worden met mensen die plots voor hem oversteken." – Y.

Eén van de geïnterviewde personen gaf aan af en toe sensibiliseringsworkshops rond visuele beperkingen te organiseren. Zo laat zij deelnemers bijvoorbeeld een parcours afleggen met geblinddoekte ogen en met een witte stok. In de meeste gevallen leidt dit tot een echte schok en een bewustwording van hoe moeilijk het is om zich in het verkeer te begeven zonder gebruik te kunnen maken van het gezichtsvermogen.

"Ik denk dat iemand die kan zien zich dat niet spontaan realiseert, omdat hij of zij niet in die situatie zit. Maar zodra je één zintuig wegneemt, en zeker het zicht, is dat duidelijk ontregelend." – D.

3.4 Bespreking van de resultaten

Steekproef

Deze kwalitatieve analyse is gebaseerd op 15 interviews met blinde of slechtziende personen. Van deze 15 personen zijn er 12 blind en de overige drie hebben een matige tot ernstige visuele beperking. Het voornaamste doel van deze analyse was om in eerste instantie een algemeen beeld te schetsen van mobiliteit bij slechtziende en blinde personen en vervolgens in te zoomen op het thema van stille voertuigen om de belangrijkste elementen te identificeren die relevant zijn voor het verdere onderzoek.

Er moet echter worden benadrukt dat het beperkte aantal deelnemers geen algemene conclusies toelaat op het niveau van de volledige populatie van blinde en slechtziende personen. De onderstaande resultaten zijn daarom voorlopige bevindingen die mogelijk niet representatief zijn voor de hele gemeenschap. Bovendien is het waarschijnlijk dat onze steekproef bepaalde vertekeningen vertoont. De deelnemers werden gerekruteerd via verenigingen, wat erop wijst dat het vermoedelijk gaat om een relatief goed geïnformeerde en getrainde groep op het vlak van mobiliteit, en om personen die eerder in een stedelijke context leven.

Gewoonten

Ten eerste lijkt het erop dat blinde en slechtziende personen vaker in stedelijke omgevingen wonen. Uit de interviews blijkt dat zij nabijheid tot openbaar vervoer en een vlotte toegang tot diverse diensten belangrijk vinden, wat de aantrekkingskracht van stedelijke omgevingen kan verklaren. Wat de verplaatsingsfrequentie betreft, verklaarden alle bevroegde personen zich dagelijks of bijna dagelijks te verplaatsen, ook alleen. Dit wijst erop dat zij, ondanks hun beperking, streven naar een zekere mate van zelfstandigheid. Ook hier is het mogelijk dat een meer geïsoleerd deel van de populatie buiten beeld is gebleven.

De meest gebruikte vervoerswijzen zijn te voet gaan, het openbaar vervoer en soms de taxi. Deze bevindingen sluiten aan bij de enquête die in 2023 door de Brailleliga werd uitgevoerd¹³, waaruit bleek dat 73% van de blinde en slechthorende personen gebruikmaakt van het openbaar vervoer.

Binnen onze steekproef zijn er echter verschillen merkbaar. Sommige geïnterviewden geven aan zich zonder problemen in onbekende omgevingen te verplaatsen, terwijl anderen zich liever beperken tot vertrouwde en vooraf voorbereide routes. Er zijn ook verschillen in het gebruik van hulpmiddelen (geleidehond, GPS, enz.), hoewel alle deelnemers gebruikmaken van de witte stok. Deze lijkt bijna onmisbaar bij individuele verplaatsingen.

Geluid

Om de problematiek rond stille voertuigen te begrijpen, is het noodzakelijk eerst inzicht te krijgen in het belang van geluid voor blinde en slechthorende personen en in de manier waarop zij dit gebruiken. De deelnemers waren hierover unaniem: geluid speelt een essentiële rol. Hoewel ook andere zintuigen worden aangesproken, is het gehoor het belangrijkste zintuig om het gebrek aan zicht te compenseren. Het gebruik van geluid vervult tijdens verplaatsingen twee hoofdfuncties. Ten eerste dient het om zich te oriënteren en te positioneren in de ruimte. Verschillende aspecten en eigenschappen van geluid (zoals het dopplereffect, het massa-effect, echolocatie...) fungeren als auditieve referentiepunten om de omgeving mentaal in kaart te brengen en zich een voorstelling te maken van de te volgen richting en van obstakels op het traject.

De tweede functie van geluid is het waarborgen van de veiligheid. Geluid wordt zowel actief als passief gebruikt om potentiële gevaren te detecteren. Bij het oversteken van de rijbaan laat geluid uiteraard toe om te weten of een voertuig nadert, maar het wordt ook gebruikt om de fasen van een verkeerslicht te begrijpen, zich correct uit te lijnen met een zebrapad of zelfs om met een bestuurder te communiceren (bijvoorbeeld wanneer die claxonneert om aan te geven dat men kan oversteken). In veel situaties kunnen potentiële gevaren uit verschillende richtingen komen (uitritten van garages, parkings, gedeelde ruimtes). Geluid waarschuwt dan vooraf voor dat gevaar, ook al gebeurt dit in zulke gevallen eerder op een passieve manier.

Elektrische voertuigen

Het is dus vrij duidelijk dat het geluid afkomstig van het verkeer, en in het bijzonder van voertuigen, een belangrijke rol speelt in hun mobiliteit. In dat kader is het logisch om het gevoel van deze doelgroep te bevragen ten aanzien van de opkomst van voertuigen waarvan het geluidsniveau duidelijk lager ligt dan dat van een 'traditioneel' voertuig. De mate van bezorgdheid varieert weliswaar van persoon tot persoon, maar alle deelnemers hebben hun ongerustheid geuit over de toename van het aantal stille voertuigen op de weg. Men zou hier kunnen aanvoeren dat er sprake kan zijn van een selectiebias in onze studie, waarbij vooral personen die zich sterk betrokken voelen bij het thema bereid waren om te antwoorden. Dit argument moet in rekening worden gebracht, ook al blijkt uit de interviews en uit onze contacten met verschillende organisaties dat discussies over stille voertuigen zeer courant zijn binnen deze doelgroep.

Stille voertuigen lijken in het algemeen een bron van bezorgdheid en onvoorspelbaarheid te vormen bij hun verplaatsingen. Om zich veilig te kunnen verplaatsen, moet een blinde of slechthorende persoon zo veel mogelijk elementen van zijn of haar omgeving mentaal in kaart brengen om obstakels of potentiële gevaren te kunnen anticiperen. De deelnemers geven aan dat elektrische en hybride voertuigen moeilijker te detecteren zijn en dat zij bij detectie vaak al te dichtbij zijn. Hoewel geen van de deelnemers fysiek gewond raakte bij een aanrijding met een stil voertuig, komt het regelmatig voor dat zij verrast of zelfs geschrokken zijn wanneer zij plots vaststellen dat zich een voertuig vlakbij bevindt. Verschillende deelnemers vermeldde ook situaties waarin een voertuig abrupt moest remmen omdat zij begonnen over te steken zonder het voertuig te hebben gehoord. Een andere situatie die herhaaldelijk in de interviews werd aangehaald, betreft bestuurders die achteruitrijden bij het verlaten van een garage of parkeerplaats en daarbij een blinde persoon raken. Hoewel de impact doorgaans zeer beperkt is, draagt dit bij tot het gevoel van onveiligheid dat met deze voertuigen gepaard gaat. Deze bevindingen sluiten aan bij de observaties uit de wetenschappelijke literatuur (Cai, 2024; Emerson & Sauerburger, 2008; Garay-Vega et al., 2010), waarin de detectieafstanden van elektrische/hybride voertuigen worden vergeleken met die van voertuigen met een verbrandingsmotor. Deze studies tonen aan dat elektrische/hybride voertuigen op kortere afstand worden gedetecteerd dan voertuigen met een verbrandingsmotor en dat deze afstanden soms te beperkt zijn om de veiligheid van voetgangers te garanderen, rekening houdend met de noodzakelijke stopafstand van een voertuig in functie van zijn snelheid.

¹³ <https://www.braille.be/nl/2023-mobiliteit-in-vraag>

Het AVAS

Wat de voorgestelde oplossingen betreft, is het 'AVAS' (Acoustic Vehicle Alerting System) momenteel het meest besproken systeem. Onze interviews bevatten dan ook specifieke vragen over dit systeem. In meerdere gevallen werd het onderwerp AVAS echter spontaan door de deelnemer zelf aangehaald, ook al werd het niet altijd bij naam genoemd. Meestal spraken de deelnemers over een 'toegevoegd geluid' dat doet denken aan een ventilator of een vliegende schotel. Hoewel een aanzienlijk deel van de deelnemers het bestaan van het AVAS kent, bleek die kennis doorgaans vrij beperkt. Zij verwezen ernaar als iets wat zij al eens hadden opgemerkt, zonder verdere details. Het bewust en systematisch gebruiken van het AVAS als informatiebron bij verplaatsingen gebeurt bij geen van de bevroegde personen. Over het algemeen uitten de deelnemers kritiek op het ondermaatse geluidsniveau van dit systeem. Zelfs wanneer het geluid waarneembaar is, gebeurt dit vaak pas wanneer het voertuig al te dichtbij is, en enkel onder gunstige akoestische omstandigheden. Het AVAS-geluid lijkt gemakkelijk gemaskeerd te worden door omgevingsgeluid, waaronder het geluid van andere voertuigen op drukke verkeersassen. Deze bevindingen staan in contrast met de wetenschappelijke literatuur, die doorgaans een goede effectiviteit van het AVAS aantoonde om de detectieafstanden te vergroten. Sommige studies hebben verschillende soorten geluiden met elkaar vergeleken en aangetoond dat de effectiviteit kan variëren (Hastings et al., 2011; Pliskow et al., 2011). Een mogelijke hypothese is dat bepaalde momenteel gebruikte AVAS-geluiden minder doeltreffend zijn vanwege hun specifieke geluidskarakteristiek. De analyses in het experimentele luik van deze studie leveren bijkomende empirische elementen om de reële effectiviteit van het AVAS-systeem te evalueren.

De bevroegde personen gaven aan dat zij wensen dat dit systeem wordt verbeterd, aangezien het potentieel heeft om hen aanzienlijk te ondersteunen in hun verplaatsingen. Aangezien hun mobiliteitsstrategieën in sterke mate rond geluid zijn opgebouwd, staan zij in het algemeen positief tegenover het AVAS. Wij vroegen hen dan ook welke verbeteringen zij wenselijk achten. Naast een hoger geluidsniveau – zonder dat dit onaangenaam of vervuilend wordt – uitten meerdere deelnemers de wens om het geluid te uniformiseren over alle stille voertuigen, zodat een specifiek geluid onmiddellijk kan worden geassocieerd met een potentieel gevaar. In dezelfde logica wordt het idee om het AVAS-geluid het geluid van een verbrandingsmotor te laten nabootsen (zoals bij sommige voertuigen reeds het geval is) positief onthaald, aangezien dit geluid vertrouwd is. Blinde en slechtziende personen hebben geleerd om de locatie en snelheid van een voertuig in te schatten op basis van het motorgeluid, en zij zouden deze mogelijkheid graag behouden binnen het AVAS-systeem. Op basis van deze interviews en van de meest recente studies ter zake lijkt het erop dat het AVAS-systeem verdere evoluties nodig heeft, met name op het vlak van geluidsdesign, om uit te groeien tot een betrouwbare en constante ondersteuning voor blinde en slechtziende personen. Intussen blijven stille voertuigen een bron van bezorgdheid voor een kwetsbare doelgroep.

"Je hoort elektrische voertuigen helemaal niet, zelfs niet wanneer ze uitgerust zijn met een waarschuwingssysteem. Dat geluid is gewoon te stil." – K.

4 Kwantitatieve studie

4.1 Doelstellingen

Deze kwantitatieve studie heeft als voornaamste doel concrete elementen aan te reiken om de situatie rond stille voertuigen en de risico's die zij kunnen inhouden voor kwetsbare weggebruikers in kaart te brengen. Het doel is om de bevindingen uit de literatuurstudie verder uit te diepen en de vraagstellingen die in het kwalitatieve luik naar voren kwamen empirisch te toetsen. De huidige discussies over stille voertuigen lijken zich hoofdzakelijk toe te spitsen op het AVAS-systeem en de modaliteiten ervan, alsook op de optimale manier om stille voertuigen beter detecteerbaar te maken zonder te leiden tot een algemene toename van het geluidsniveau van het verkeer. Aangezien het AVAS-systeem in België nagenoeg alomtegenwoordig is geworden op elektrische en hybride voertuigen, lijkt het noodzakelijk om onze observaties te concentreren op voertuigen die met dit systeem zijn uitgerust.

Deze studie beoogt tastbare observaties te leveren over twee complementaire aspecten van de detecteerbaarheid van gemotoriseerde voertuigen. Ten eerste gaat het om het beschrijven van de geluidssignaturen van stille voertuigen die uitgerust zijn met een AVAS-systeem en deze te vergelijken met die van voertuigen met een verbrandingsmotor. Meerdere voertuigen werden gemeten op vlak van geluidsvermogen en frequentiespectrum tijdens verschillende manoeuvres. Deze metingen werden uitgevoerd onder zo gecontroleerd mogelijke omstandigheden, zodat de vergelijking zo breed mogelijk toepasbaar is. Deze vaststellingen bieden aanknopingspunten voor een verdere optimalisering van het AVAS-systeem. De wetenschappelijke literatuur biedt een aantal kwantificeerbare aanwijzingen over optimale geluidskenmerken voor AVAS. Het doel is hier dan ook om de in het veld vastgestelde geluidskenmerken te vergelijken met de eigenschappen die wenselijk worden geacht, om zo gerichte aanbevelingen te kunnen formuleren.

Ten tweede, na het meten van een vorm van 'objectieve' hoorbaarheid van stille voertuigen, lijkt het noodzakelijk om ook empirische observaties te verzamelen over de detecteerbaarheid van deze voertuigen vanuit het perspectief van de weggebruiker. Het tweede deel van dit kwantitatieve luik heeft daarom als doel deelnemers in omstandigheden te plaatsen die zo dicht mogelijk bij reële situaties aanleunen, om te testen of stille voertuigen tijdig kunnen worden gedetecteerd om de veiligheid van kwetsbare weggebruikers te waarborgen. Het experiment werd uitgevoerd met variërende niveaus van omgevingsgeluid, om verschillende reële omgevingen te simuleren. Op basis van het kwalitatieve luik blijkt dat de voornaamste kritiek op het AVAS-systeem betrekking heeft op de beperkte bruikbaarheid ervan in lawaaiëring omgevingen. Deze studie heeft dan ook als hoofddoel na te gaan of de huidige geluidskenmerken van voertuigen volstaan om een voldoende vroege detectie te garanderen voor de veiligheid, en in welke omstandigheden dit mogelijk tekortschiet.

Daarnaast onderzoekt deze studie of deelnemers hun eigen detectie op basis van geluid correct kunnen inschatten, door hen te vragen te bepalen of zij het voertuig tijdig hebben waargenomen om een veilige oversteek te kunnen uitvoeren. Aangezien de detectie van een naderend voertuig vooral van belang is bij het oversteken van de rijbaan, is een van de doelstellingen na te gaan of kwetsbare weggebruikers geneigd zijn de afstand tot een voertuig te overschatten, wat potentieel gevaarlijk kan zijn indien zij op basis daarvan een oversteek initiëren. Dit tweede deel is bijzonder relevant voor personen met een visuele beperking, die vaak hoofdzakelijk of uitsluitend op hun gehoor moeten vertrouwen om een oversteek te starten. In dit experiment werd daarom een gelijk aantal blinde of slechthziende personen opgenomen als deelnemers uit een 'controlegroep' met functioneel zicht. Deze keuze sluit aan bij de algemene doelstelling van deze studie om blinde en slechthziende personen te beschouwen als de primaire doelgroep binnen de problematiek van stille voertuigen.

4.2 Deel 1: Objectieve geluidsmetingen

4.2.1 Methode

4.2.1.1 Materiaal

De geluidsopnames werden uitgevoerd op een afgesloten testpiste met een bitumenverharding in goede staat. De piste beschikte over een voldoende lange rechte lijn om de opnames uit te voeren zonder bochten te moeten nemen.

Het opnamemateriaal bestond uit een binaurale microfoon (Zoom H4n Pro) en een geluidsniveaumeter (Fusion 01dB Metravib), die vóór gebruik werd gekalibreerd. Daarnaast werd een camera in lijn met het geluidsopnamemateriaal geplaatst, zodat de verkregen outputs gesynchroniseerd konden worden.

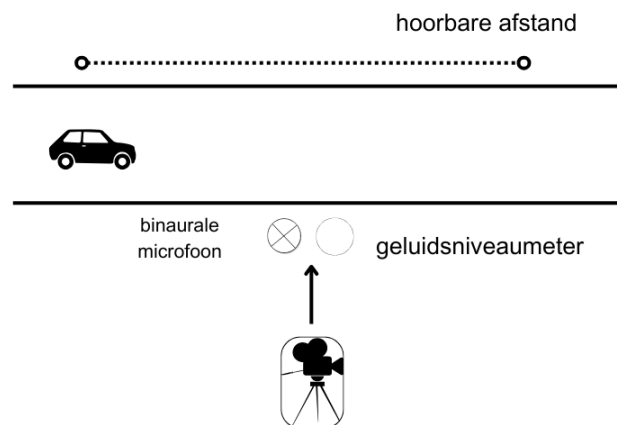
Dezelfde metingen werden uitgevoerd op vijf verschillende voertuigen:

- Een voertuig met verbrandingsmotor (VM) (Skoda Fabia)
- Twee hybride voertuigen die volledig in verbrandingsmodus werden opgenomen (HT) (VW Golf Variant en Audi A5 Berline Quattro)
- Een hybride voertuig dat volledig in elektrische modus werd opgenomen (HE) (Cupra Leon)
- Een volledig elektrisch voertuig (E) (VW ID4)

Om resultaten te bekomen die zo breed mogelijk toepasbaar zijn, waren alle opgenomen voertuigen recente modellen en werd de bandenspanning vlak vóór het experiment aangepast aan het aanbevolen niveau.

4.2.1.2 Procedure

De geluidsopnames werden uitgevoerd op een afgesloten testpiste. Om het omgevingsgeluid maximaal te controleren, werd gekozen voor een geïsoleerde piste, uitsluitend omringd door vegetatie. De opnames vonden plaats op één dag, bij droog weer en met weinig wind. Het meet- en opnamemateriaal werd opgesteld in het midden van een voldoende lange rechte lijn, zodat het voertuig binnen en buiten de hoorbare afstand kon rijden aan constante snelheid. Figuur 9 geeft schematisch de positie van het materiaal weer tijdens het voorbijrijden van het voertuig. De microfoon en de geluidsniveaumeter werden op gemiddelde oorhoogte geplaatst, zo dicht mogelijk bij elkaar. Een camera werd net achter deze toestellen opgesteld. De camera werd gebruikt om de opnames van beide apparaten te synchroniseren en om exact te bepalen op welk moment het voertuig de microfoon passeerde.



Figuur 9 Schema van de opnameprocedure

Voor elke wagen werd dezelfde procedure gevolgd. De verschillende meettoestellen werden tussen de voertuigen aan- en uitgeschakeld, maar niet tussen de afzonderlijke passages van éénzelfde voertuig. Alle passages van één voertuig werden in één opname geregistreerd. Na de start van de opname sprak een onderzoeker luidop het merk van het voertuig uit en klapte vervolgens in de handen voor de camera, wat toeliet om de microfoon, de geluidsniveaumeter en de camera te synchroniseren. Daarna werden de passages

uitgevoerd in een vaste volgorde (10, 20, 30, 40, 50 km/u, vertraging, versnelling, achteruitrijden). Het AVAS-systeem op elektrische en hybride voertuigen (in elektrische modus) was actief tot en met 20 km/u, conform de geldende regelgeving. Bij de versnellingsconditie reed het voertuig eerst aan constante snelheid van 10 km/u tot een vooraf bepaald punt, waarna het geleidelijk versnelde om 30 km/u te bereiken op het moment dat het de microfoon passeerde. Bij de vertragingconditie werd dezelfde procedure toegepast, maar dan van 30 km/u naar 10 km/u. De achteruitrijconditie bestond uit een passage aan constante snelheid van 5 km/u in achteruit. Tussen elke passage bleef het voertuig minstens 30 seconden stilstaan. Indien zich tijdens een passage een probleem voordeed (de beoogde snelheid werd niet gerespecteerd binnen een foutenmarge van 2 km/u, een externe geluidsbron, ...), werd de passage automatisch herhaald. Na de opnamedag werden de geluidsbestanden geëxporteerd, onderling gesynchroniseerd en per passage opgesplitst.



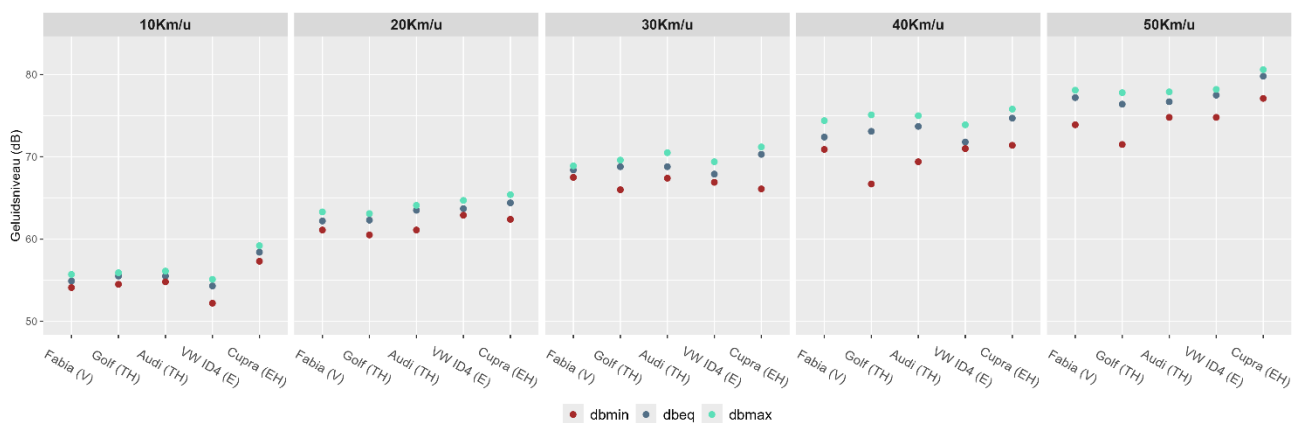
Figuur 10 Foto van de opnameprocedure

4.2.2 Resultaten

4.2.2.1 Geluidsniveau

Constante snelheid

Figuur 11 toont de geluidsdruk gemeten door de geluidsniveaumeter op het moment dat het voertuig de microfoon passeert. De weergegeven waarden zijn aggregaties van de niveaus gemeten over één seconde. In het rood staat de minimale waarde ('dbmin'), in het blauw de equivalente gemiddelde waarde ('dbeq') en in het groen de maximale waarde ('dbmax'). Zoals verwacht neemt het geluidsvolume van de voertuigen geleidelijk toe in functie van de snelheid. Het is eveneens belangrijk vast te stellen dat er slechts beperkte verschillen zijn tussen de geluidsvolumes van de verschillende voertuigen. Met andere woorden, het absolute geluidsniveau dat door elk voertuig wordt geproduceerd, is relatief vergelijkbaar. Er zijn echter enkele uitzonderingen waarneembaar. Bij 10 km/u en bij 50 km/u produceert de Cupra Leon (hybride in elektrische modus, met AVAS-systeem) een krachtiger geluid dan de andere voertuigen. Bij de overige snelheden ligt het niveau eveneens licht hoger, maar is het verschil minder uitgesproken. De Volkswagen ID4 (volledig elektrisch, met AVAS-systeem) is daarentegen minder luid dan de andere voertuigen bij 10 km/u.

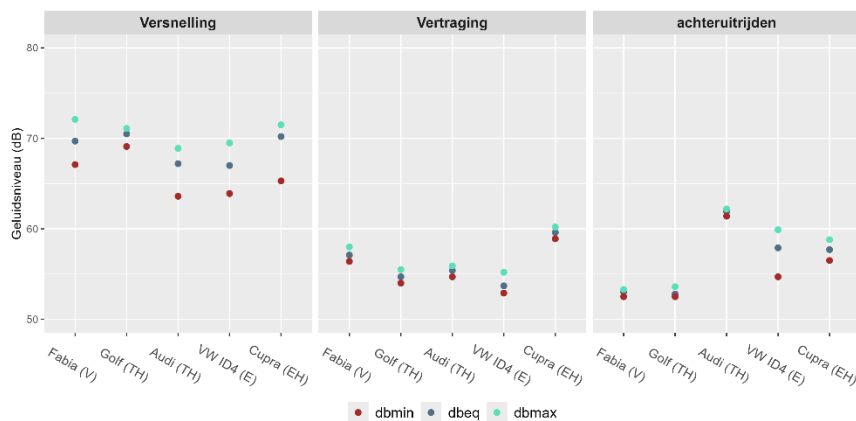


Figuur 11 Geregisteerde geluidsvolumes bij verschillende snelheden

Hieruit kan worden afgeleid dat bij 10 km/u de voertuigen met actieve verbrandingsmotor onderling een vergelijkbaar geluidsvermogen vertonen, terwijl de elektrische voertuigen met actief AVAS-systeem onderling verschillen: het ene produceert een hoger, het andere een lager geluidsniveau. Dit kan erop wijzen dat AVAS-systemen niet noodzakelijk gelijkwaardig zijn. Aangezien de aard van het geluid en het geluidsvermogen aan de constructeur worden overgelaten, zolang aan de voorgeschreven minimale geluidsniveaus wordt voldaan, is het aannemelijk dat er significante verschillen bestaan tussen fabrikanten.

Andere manoeuvres

In de gebruikte methode hield de versnellingsconditie in dat het voertuig startte aan 10 km/u en 30 km/u bereikte op het moment dat het de microfoon passeerde. Omgekeerd vereiste de vertragingconditie dat het voertuig startte aan 30 km/u en vertraagde tot 10 km/u ter hoogte van de microfoon. Aangezien de hier weergegeven waarden gemeten werden op het moment van passage voor de microfoon, zouden zij theoretisch niet sterk mogen verschillen van de waarden gemeten bij constante snelheid. Dat blijkt hier inderdaad het geval. De waarden gemeten bij 30 km/u liggen zeer dicht bij die van de versnellingsconditie, en de waarden gemeten bij 10 km/u zijn zeer vergelijkbaar met die van de vertragingconditie.



Figuur 12 Geregisteerd geluidsvolume bij verschillende manoeuvres

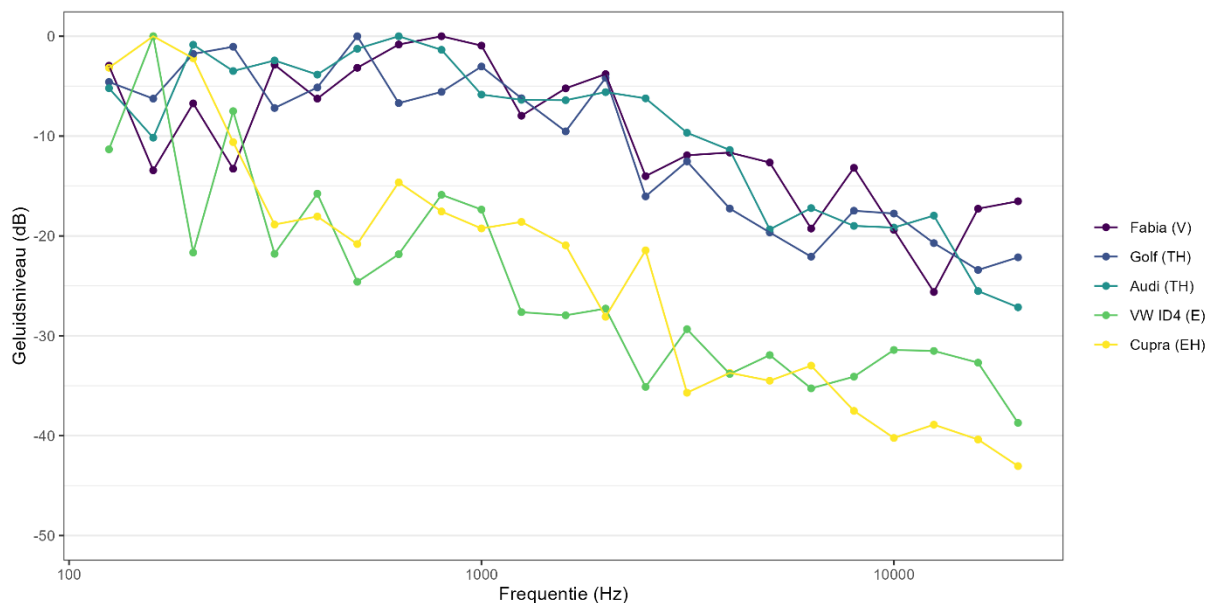
Wat het achteruitrijden betreft, worden wel aanzienlijke verschillen tussen de voertuigen vastgesteld. Het is belangrijk te benadrukken dat het hier gaat om de conditie met het globaal laagste geluidsniveau, waardoor de waarden gevoeliger zijn voor omgevingsvariaties. Deze resultaten dienen dan ook met de nodige voorzichtigheid te worden geïnterpreteerd. Er is een duidelijk verschil zichtbaar in de gemeten waarden. Twee van de drie voertuigen met verbrandingsmotor (de Skoda Fabia en de Golf) blijken het minst luid (respectievelijk 53 en 52,3 dB voor dbeq). De twee elektrische voertuigen situeren zich ongeveer 5 dB hoger (57,7 dB voor de Cupra en 57,9 dB voor de Volkswagen). De Audi vertoont de hoogste waarde (61,9 dB). Een

mogelijke interpretatie is dat sommige verbrandingsmotoren, afhankelijk van hun ontwerp, bij stationair draaien aanzienlijk luider kunnen zijn dan andere. De gemeten AVAS-systemen zouden zich dan op een intermediair niveau bevinden.

4.2.2.2 Frequenties

Lage snelheden

Naast het globale geluidsniveau dat door de voertuigen wordt geproduceerd, is het essentieel om ook de verdeling van het geluid over het frequentiespectrum te analyseren. Zoals besproken in de literatuurstudie heeft de geluidsfrequentie een belangrijke invloed op de detecteerbaarheid van geluid. Het is dan ook noodzakelijk na te gaan of de geluidssignalen van de verschillende voertuigen sterk van elkaar verschillen. Een identiek globaal geluidsniveau kan immers volledig anders worden waargenomen naargelang het hoofdzakelijk uit lage dan wel hoge frequenties bestaat. Om het frequentiespectrum te verkrijgen, werden fragmenten van 500 ms uit de door de microfoon opgenomen geluidsbestanden geselecteerd. Telkens stemden deze fragmenten overeen met het exacte moment waarop het voertuig zich ter hoogte van de microfoon bevond. Vervolgens werd een fouriertransformatie toegepast om het geluidssignaal op te splitsen in afzonderlijke frequenties en voor elk frequentieniveau een waarde te verkrijgen. Deze amplitudes werden vervolgens geaggregeerd per tertsband. Voor elke tertsband werd het geluidsvermogen in decibel berekend over een frequentiebereik van 125 Hz tot 20.000 Hz. Het frequentiespectrum werd genormaliseerd naar eenzelfde referentieniveau, zodat de onderlinge verdeling van frequenties kon worden vergeleken, ongeacht het globale geluidsvolume. De weergegeven curves tonen dus de frequentieverdeling, waarbij de maximale waarde telkens gelijk is aan 0.

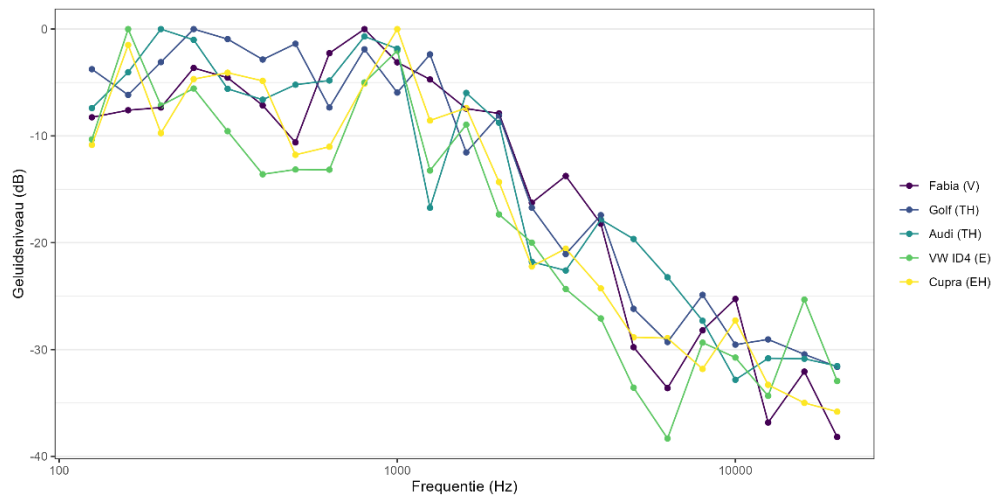


Figuur 13 Frequentiespectrum – 10 km/u

Eerdere studies over de frequenties die door stille voertuigen worden geproduceerd, geven aan dat deze voertuigen voornamelijk lage frequenties genereren en dat het geluidsniveau afneemt naarmate de frequentie stijgt. Voertuigen met verbrandingsmotor zouden daarentegen een geluid produceren dat gelijkmatiger over het frequentiespectrum is verdeeld. Figuur 13 toont het bekomen frequentiespectrum voor elk voertuig bij 10 km/u. De resultaten bevestigen deze hypothesen. Duidelijk zichtbaar is dat de twee voertuigen met elektrische aandrijving een geluidssignatuur vertonen die zich hoofdzakelijk concentreert in de lagere frequenties. Het geluidsniveau daalt snel naarmate de frequentie toeneemt, en het verschil tussen de hoogste en laagste frequenties bedraagt ongeveer 40 dB. Voor de drie voertuigen met verbrandingsmotor blijft het geluidsniveau relatief stabiel onder 1000 Hz en neemt het geleidelijk af bij hogere frequenties. Het verschil tussen de hoogste frequenties en het maximale niveau bedraagt hier slechts 20 tot 25 dB.

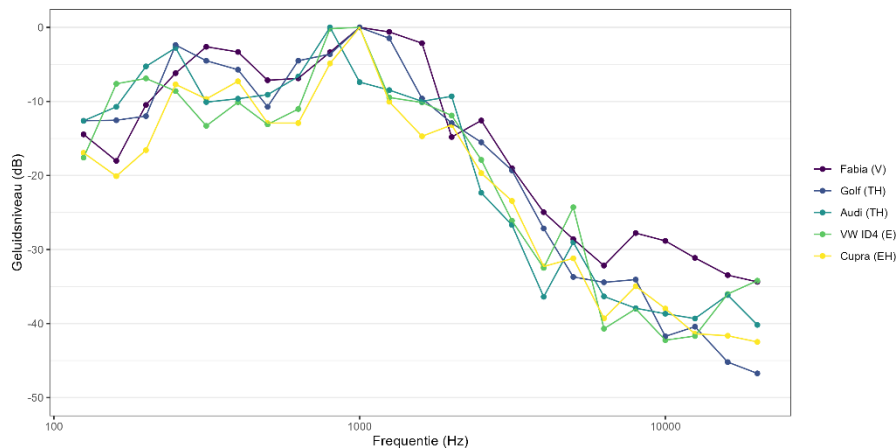
Hogere snelheden

Bij hogere snelheden wordt het rolgeluid (de interactie tussen banden en wegdek) dominantier dan het motorgeluid. Er kan dan ook worden verwacht dat de geluidssignaturen tussen de voertuigen meer uniform worden. Dit is eveneens zichtbaar in Figuur 14 bij 30 km/u en in Figuur 15 bij 50 km/u.



Figuur 14 Frequentiespectrum – 30 km/u

In Figuur 15 is bij alle vijf voertuigen een duidelijke piek in geluidsvermogen waarneembaar rond 1000 Hz. Aangezien bij 50 km/u de voornaamste geluidsbron de interactie tussen banden en wegdek is, kan worden verondersteld dat dit rolgeluid zich voornamelijk situeert in frequenties rond 1000 Hz. Deze vaststelling kan van groot belang zijn bij het formuleren van richtlijnen voor AVAS-systemen. Indien dergelijke systemen zich op een gelijkaardig frequentiebereik concentreren, bestaat het risico dat zij gemakkelijk gemaskeerd worden door het rolgeluid van andere voertuigen in de omgeving.



Figuur 15 Frequentiespectrum – 50 km/u

4.3 Deel 2: detectie van voertuigen

4.3.1 Methode

4.3.1.1 Verzameling van geluidsopnames

Voertuigpassages

Om dit experiment op te zetten, bestond de eerste stap uit het verzamelen van nieuwe geluidsopnames die nadien getest zouden worden. De opnamecriteria verschilden licht van die in het eerste deel van de experimentele sectie. Een bijzonder belangrijk aspect was hier het gebruik van stereoregistraties, zodat de lokalisatie van voertuigen mogelijk werd via interaurale verschillen in geluidsniveau en frequentie. Ook de selectiecriteria voor de voertuigen verschilden. In plaats van recente voertuigen met gecontroleerde

bandenspanning te verkiezen, werd gekozen voor voertuigen die representatiever zijn voor wat men dagelijks op de openbare weg aantreft. De gebruikte voertuigen waren:

- Een voertuig met verbrandingsmotor (Mazda 2)
- Een hybride voertuig (Toyota Yaris)
- Een volledig elektrisch voertuig (Peugeot e-208)

Voor het overige bleef de methode voor het verzamelen van geluidsopnames grotendeels gelijk aan die in het eerste deel. Een geïsoleerd, recht wegsegment werd geselecteerd om omgevingsgeluid maximaal te beperken. Een stereomicrofoon (Zoom H4n Pro) werd langs de weg geplaatst, in een positie vergelijkbaar met die van een voetganger die wil oversteken, en op gemiddelde oorhoogte. De voertuigen reden voorbij aan constante snelheid (met een foutenmarge van 2 km/u boven of onder de doelsnelheid). De gekozen weg was lang genoeg zodat de voertuigen hun doelsnelheid reeds bereikt hadden wanneer zij binnen hoorbare afstand van de microfoon kwamen. Metingen werden uitgevoerd bij 10, 20, 30, 40 en 50 km/u. Enkel de snelheden van 10, 20, 30 en 50 km/u werden in het experiment gebruikt, om de duur voor de deelnemers te beperken. De passages werden in beide rijrichtingen uitgevoerd, maar de rechts-links opnames werden gespiegeld zodat alle passages werden waargenomen alsof zij van links naar rechts plaatsvonden. Deze links-rechtsbeweging werd gekozen uit realismeoverwegingen, aangezien een voetganger in België bij het oversteken in eerste instantie aandacht heeft voor verkeer dat van links komt.

Luidruchtige omgevingen

Om voertuigpassages in een luidruchtige omgeving te simuleren, werden twee bijkomende opnames gemaakt in stedelijke context. Het doel was een matig luidruchtige en een sterk luidruchtige omgeving te verkrijgen. De eerste opname werd gemaakt langs een relatief drukke weg (een verkeersas in de Brusselse rand, met snelheidsbeperking van 30 km/u, opgenomen tijdens de spits). De tweede opname vond plaats nabij een sterk belast kruispunt (druk kruispunt met meerdere rijstroken, eveneens in de Brusselse rand, opgenomen tijdens de spits). Voor deze omgevingsopnames werd hetzelfde materiaal en dezelfde instellingen gebruikt als voor de voertuigpassages. Hierdoor konden de geluidsopnames onderling worden vergeleken, zelfs zonder gebruik van een decibelmeter, met andere woorden zonder absolute volumemetingen.

4.3.1.2 Inhoud van de geluidsopnames

Voor een correcte interpretatie van de resultaten moeten de specifieke kenmerken van elke geluidsopname per snelheid in rekening worden gebracht. De opname van voertuigen met een AVAS-systeem, waaronder één hybride voertuig, heeft immers invloed op de verwachte detecteerbaarheid. Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende geluidsopnames en vermeldt per opname het type motor dat actief was en of het AVAS-systeem al dan niet ingeschakeld was. Samengevat waren de AVAS-systemen van het elektrische en hybride voertuig uitgeschakeld vanaf 30 km/u (conform de huidige Europese regelgeving). Het hybride voertuig reed in elektrische modus bij 10 en 20 km/u, en in verbrandingsmodus bij hogere snelheden (wat overeenkomt met het gangbare gedrag van hybride voertuigen).

	<i>Verbranding</i>	<i>Elektrisch</i>	<i>Hybride</i>
10 km/u	Verbrandingsmotor	Elektrische motor + AVAS	Verbrandingsmotor + AVAS
20 km/u	Verbrandingsmotor	Elektrische motor + AVAS	Verbrandingsmotor + AVAS
30 km/u	Verbrandingsmotor	Elektrische motor	Verbrandingsmotor
50 km/u	Verbrandingsmotor	Elektrische motor	Verbrandingsmotor

Tabel 1 Motortype en activatie van AVAS volgens snelheid

De geluidssignaturen van elektrische en hybride voertuigen verschillen dus sterk naargelang de snelheid. Daarom worden snelheid en voertuigtype in de analyses steeds gezamenlijk in rekening gebracht.

4.3.1.3 Experimenteel design

Inleiding

Het experiment werd uitgevoerd bij meer dan 70 personen. De uiteindelijke steekproef, na datacleaning, bestond uit 35 blinde of slechthziende personen en 35 personen met een functioneel zicht. De demografische beschrijving van de finale steekproef wordt weergegeven in de resultatensectie. Een testsessie bestond eerst uit het voorleggen van een geïnformeerde toestemmingsverklaring die door de deelnemer moest worden ondertekend. Voor blinde of slechthziende deelnemers werd aangeboden om het formulier luidop voor te lezen. Na toestemming werden enkele mondelinge vragen gesteld. Voor de controlegroep werden enkel leeftijd en gender genoteerd. Bij de groep blinde en slechthziende personen werden daarnaast ook gegevens verzameld over de oorsprong van de visuele beperking en over hun verplaatsingsgewoonten.

Vorbereidende stappen

Vervolgens werd de deelnemer geïnstalleerd voor het experiment. Het materiaal dat de deelnemer nodig had, bestond uitsluitend uit een kastje met twee drukknoppen en een hoofdtelefoon. De hoofdtelefoon was aangesloten op een pc waarop het experiment was geïnstalleerd, en werd systematisch op hetzelfde geluidsniveau ingesteld. Zodra de deelnemer met deze twee elementen was uitgerust, werd het experiment opgestart; het verdere verloop verliep volledig geautomatiseerd. Het experiment zelf werd volledig geprogrammeerd met behulp van de tool 'Psychopy' (versie 2024.2.4). Het was beschikbaar in twee talen: Frans en Nederlands. Afgezien van de taal was het experiment identiek voor alle deelnemers, ongeacht of zij een visuele beperking hadden of niet. De instructies werden in alle gevallen uitsluitend mondeling aangeboden.

Het experiment bestond uit drie afzonderlijke delen:

- Een eerste deel bestond uit een gehoortest, bedoeld om de auditieve capaciteiten van de deelnemer te meten op 8 verschillende frequenties (van 250 tot 8000 Hz, waarbij de frequentie telkens werd verdubbeld). De test was een vereenvoudigde versie van de 'Pure-Tone Audiometry test'. Zuivere tonen van elke frequentie werden in willekeurige volgorde aangeboden. Elke toon werd eerst op een duidelijk hoorbaar volume gepresenteerd, waarna het volume om de twee seconden stapsgewijs werd verlaagd. De deelnemer kreeg de instructie om op de knop te drukken zodra hij of zij het geluid niet langer hoorde.
- De tweede stap bestond uit het presenteren van de instructies van het eigenlijke experiment. Om een goed begrip te garanderen, werden de instructies stapsgewijs aangeboden. Na elke instructie werd de deelnemer uitgenodigd om op de knop te drukken om verder te gaan, of om zich te melden indien iets niet duidelijk was. Regelmatig werden praktische voorbeelden gegeven, zodat de deelnemer niet verrast werd bij de start van het experiment. Zodra alle instructies waren afgerond, werd via de audiosysteem aangekondigd dat het experiment zou starten en dat er nog vragen konden worden gesteld alvorens verder te gaan.
- De laatste stap was het experiment zelf. Dit bestond uit 40 geluidsfragmenten van ongeveer 30 seconden elk. In elk fragment naderde een voertuig van links naar rechts, passeerde het het luisterpunt en reed het vervolgens rechtdoor verder. Zesendertig van deze 40 fragmenten waren een combinatie van drie experimentele condities: 3 voertuigen (elektrisch, hybride en verbranding) bij 4 verschillende snelheden (10, 20, 30 en 50 km/u), in drie niveaus van omgevingsgeluid (stil, matig luidruchtig en sterk luidruchtig). De overige vier waren controlecondities, waarbij geen doelvoertuig aanwezig was (2 in de matig luidruchtige omgeving en 2 in de sterk luidruchtige omgeving). De taak van de deelnemer was om op de knop te drukken zodra hij of zij er zeker van was een voertuig te hebben gedetecteerd dat van links naar rechts naderde.

De matig en sterk luidruchtige fragmenten bevatten andere, verder gelegen voertuigen, maar geen enkel voertuig dat van links kwam. De geluidsfragmenten werden zodanig geselecteerd dat de omgeving realistisch was, maar geen geluiden bevatte die tot systematische detectiefouten konden leiden. Bovendien werden deze omgevingsfragmenten eerst zonder doelvoertuig aan de deelnemers aangeboden, zodat zij konden wennen aan de aanwezige geluiden en deze niet zouden verwarren met de later toegevoegde doelvoertuigen.

Zodra de deelnemer op de knop drukte, stopte het geluidsfragment onmiddellijk. Vervolgens moest de deelnemer beoordelen of het voertuig tijdig tot stilstand had kunnen komen vóór het zijn positie bereikte, indien hij of zij op het moment van detectie zou beslissen om de rijbaan over te steken. De vraag werd dus niet zo geformuleerd dat de deelnemer moest beslissen of hij of zij al dan niet zou oversteken. Op die manier wilden we vermijden dat de antwoorden te sterk zouden afhangen van iemands persoonlijkheid of risicobereidheid. De bedoeling was dat de deelnemer een zo objectief mogelijke inschatting maakte van de mogelijkheid voor het voertuig om nog tot stilstand te komen op het moment van detectie. Deze stap laat niet

alleen toe na te gaan of het voertuig daadwerkelijk vroeg genoeg werd opgemerkt om een aanrijding te vermijden, maar ook of de inschattingen van de deelnemers hierover correct waren.

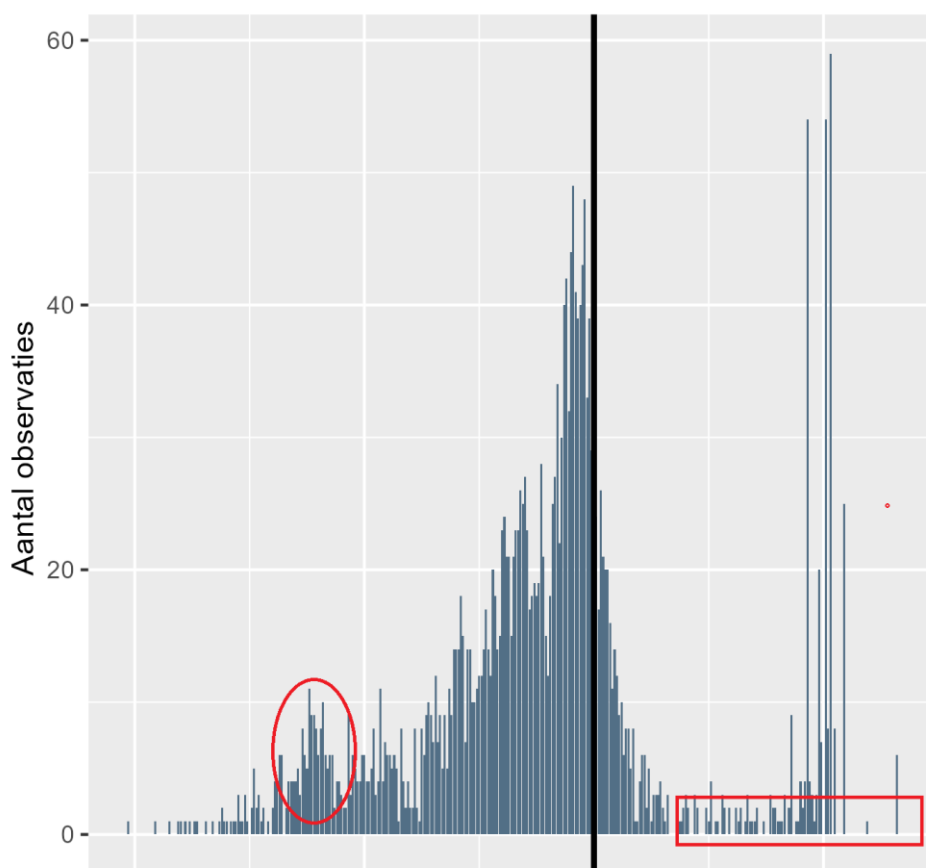
4.3.1.4 Datacleaning

Er werden verschillende voorafgaande analyses uitgevoerd om de data op te schonen. In eerste instantie werd een analyse van ontbrekende of afwijkende gegevens uitgevoerd. Op basis daarvan moesten 3 deelnemers uit de finale dataset worden verwijderd. Eén van hen drukte systematisch binnen de eerste twee seconden na het starten van het geluidsfragment op de knop. De twee andere deelnemers drukten in de grote meerderheid van de proeven niet op de knop. Dit wijst erop dat de instructies niet correct werden begrepen of dat het experiment niet serieus werd genomen.

Vervolgens werd een meer diepgaande analyse uitgevoerd om gemiste passages te identificeren. De term 'gemiste passage' verwijst naar geluidsfragmenten (proeven) waarin het voertuig niet werd gedetecteerd, of naar foutieve detecties, dat wil zeggen proeven waarin de deelnemer vermoedelijk onterecht op de knop drukte. Figuur 16 geeft een globaal overzicht van de positie van het voertuig ten opzichte van de microfoon op het moment van detectie. De zwarte verticale lijn stelt de positie van de microfoon voor. De algemene vorm van de curve komt overeen met wat verwacht werd: de meeste detecties vonden plaats enkele seconden of tienden van seconden vóór het voertuig de microfoon passeerde.

Bij de datacleaning werden twee observaties in rekening gebracht, in het rood aangeduid in de grafiek:

- Aan de linkerzijde is een lichte piek van detecties zichtbaar die optreedt vóór het voertuig duidelijk binnen hoorbare afstand is. Na verdere analyse bleek dat deze pieken uitsluitend voorkwamen in de condities met een matig luidruchtige omgeving. Het betreffende geluidsfragment bevat een licht geluid dat inderdaad kan worden verward met een voertuiggeluid en dat optreedt op het moment van deze detectiepiek. Daarom werd beslist om detecties tussen 6,9 en 8,7 seconden in de condities met een matig luidruchtige omgeving als fouten te beschouwen en als ontbrekende waarde te hercoderen. Op basis van dit criterium werden 69 proeven als foutief beschouwd, op een totaal van 2520 proeven in de finale dataset.
- Aan de rechterzijde van de grafiek zijn enkele detecties zichtbaar die plaatsvonden nadat het voertuig reeds was gepasseerd. De uitgesproken pieken uiterst rechts zijn in werkelijkheid niet-responsen die door het programma werden gecodeerd als detecties op het einde van het geluidsfragment. Detecties die ruim na het passeren van het voertuig plaatsvonden, evenals deze niet-detecties, werden beschouwd als 'gemiste passages' en zullen als dusdanig in de resultatensectie worden geanalyseerd. De drempel waarboven werd aangenomen dat het voertuig niet werd gedetecteerd, werd vastgelegd op 3,3 seconden na het passeren van het voertuig. Deze drempel is gebaseerd op de verzamelde data: vanaf 3,3 seconden zijn de detecties verspreid en niet langer geconcentreerd. In totaal werden 334 van de 2520 proeven op deze manier als gemiste passages beschouwd, wat overeenkomt met 13%.



Figuur 16 Verdeling van de tijd tussen het begin van de geluidsopname en de detectie

4.3.2 Resultaten

4.3.2.1 Demografie

Om de resultaten van blinde of slechtziende personen te kunnen vergelijken met die van personen uit de algemene populatie, werd voor het experiment een gelijk aantal deelnemers uit beide groepen gerekruteerd. De uiteindelijke steekproef (na datacleaning) bestaat uit 70 deelnemers, 35 per groep. De deelnemers uit de controlegroep werden deels geselecteerd op basis van leeftijd, om aan twee criteria te voldoen: ten eerste moesten de steekproeven van beide groepen vergelijkbaar zijn qua leeftijd, aangezien blinde en slechtziende personen gemiddeld ouder zijn. Ten tweede leek het belangrijk om voornamelijk oudere personen op te nemen, aangezien zij in het bijzonder betrokken zijn bij de problematiek die in dit rapport wordt behandeld. Door te focussen op oudere deelnemers kon in principe een grotere variantie in de resultaten van de gehoortest worden bekomen, wat toelaat robuustere analyses uit te voeren over het verband tussen gehoor en voertuigdetectie. Tabel 2 beschrijft de uiteindelijke steekproef.

	CONTROLEGROEP (N=35)	BLINDE/SLECHTZIENDE PERSONEN (N = 35)
GENDER		
MAN	13	17
VROUW	22	18
LEEFTIJD		
GEMIDDELDE	51,4	54,6
STANDAARDAFWIJKING	15,9	13,2
MIN	24	28
MAX	74	73

4.3.2.2 Gehoortest

Globale resultaten

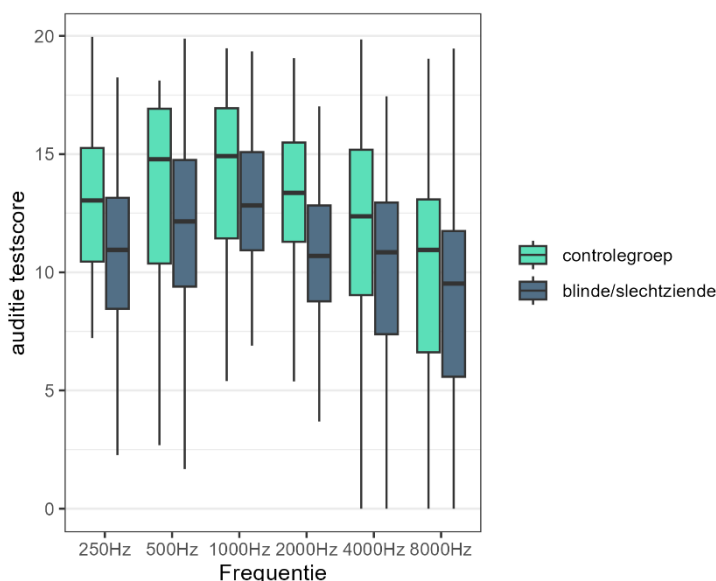
De resultaten van de gehoortest worden uitgedrukt in een score van 0 tot 20. Deze score stemt overeen met het moment (in seconden) waarop de deelnemer op de knop drukte om aan te geven dat hij of zij de toon niet langer hoorde. Hoe hoger de score, hoe beter dus het gehoor voor de geteste frequentie. In zeldzame gevallen werd niet op de knop gedrukt, wat betekent dat de toon helemaal niet werd waargenomen. In dat geval werd een score van 0 toegekend.

De algemene gemiddelde score op de gehoortest bedraagt 10,95 met een standaardafwijking van 4,9. Dit wijst erop dat de test correct was gekalibreerd en noch te gemakkelijk, noch te moeilijk was. De voldoende spreiding in de resultaten suggereert bovendien dat de test in staat is om reële verschillen in auditieve capaciteiten tussen deelnemers te detecteren. Daarnaast verschilden de gemiddelde scores significant naargelang de aangeboden frequentie (ANOVA-resultaten). De hoogste scores werden behaald bij 500 en 1000 Hz, en de laagste bij 4000 en 8000 Hz.

Gehoor en leeftijd

Leeftijd is significant geassocieerd met een daling van de scores op de gehoortest. Dit geldt voor de verschillende geteste frequenties. Volgens de lineaire regressiecoëfficiënt gaat een toename van één jaar in leeftijd gepaard met een daling van 0,15 punten op de testscore ($p < 0,001$). De data tonen echter geen significant interactie-effect tussen leeftijd en frequentie op de testscore. Dit betekent dat de impact van leeftijd op de auditieve capaciteiten niet significant verschilt per frequentie. Op basis van de wetenschappelijke

literatuur (Wasano et al., 2021) zou men eerder verwachten dat de relatie sterker is voor hogere frequenties. Theoretisch neemt het gehoor met de leeftijd af, maar vooral voor hoge frequenties.



Figuur 17 Resultaten van de gehoortest volgens frequentie

Scores van blinde en slechtziende personen

Zoals vermeld in de literatuurstudie bestaat de hypothese dat personen met een visuele beperking een betere auditieve scherpte ontwikkelen. Een hypothese was dan ook dat blinde of slechtziende personen licht betere scores zouden behalen dan de controlegroep op de gehoortest. Dit bleek niet het geval. De controlegroep behaalde zelfs een licht hogere gemiddelde score dan de blinde en slechtziende deelnemers, ook wanneer gecontroleerd werd voor leeftijdseffecten. Figuur 17 toont de verdeling van de scores op de gehoortest per frequentie, waarbij de resultaten van

blinde/slechtziende deelnemers worden vergeleken met die van de controlegroep.

Gehoor en gender

Er werd geen significant verschil vastgesteld tussen mannen en vrouwen op de gehoortest. Mannen behaalden een gemiddelde score van 11,5 en vrouwen van 11,1 ($t = -0,847$, $p > 0,1$).

4.3.2.3 Gemiste passages

Alvorens de afstand tussen de microfoon en het voertuig op het moment van detectie te analyseren, werd eerst gekeken naar de gevallen waarin het voertuig eenvoudigweg niet werd gedetecteerd. Van alle uitgevoerde proeven werden 337 passages van een voertuig niet gedetecteerd, wat overeenkomt met 13,4% van het totaal. Om het effect van de verschillende demografische variabelen en experimentele condities te testen, werden logistische regressiemodellen uitgevoerd om de impact van elke variabele (en mogelijke

interacties) op de kans op een gemiste passage te meten. Aangezien alle deelnemers aan alle condities werden blootgesteld, gaat het om herhaalde metingen. De toegepaste modellen zijn daarom gemengde regressiemodellen.

Demografische variabelen

Eerst werd nagegaan of bepaalde deelnemersprofielen een grotere kans hebben om een naderend voertuig niet te detecteren. Er werd geen significant verschil vastgesteld tussen deelnemers met een visuele beperking en de andere deelnemers. Wel werd een significant verschil vastgesteld met betrekking tot gender: vrouwen hebben een significant hogere kans om een passerend voertuig niet te detecteren dan mannen ($p < 0,05$). De leeftijd van de deelnemers is niet significant gerelateerd aan de kans om het voertuig al dan niet te detecteren. Daarentegen neemt de kans op een gemiste passage significant af naarmate de score op de gehoorstest toeneemt. Met andere woorden: personen met betere auditieve capaciteiten hebben minder kans om een passerend voertuig niet te detecteren.

Vergelijking van de drie voertuigtypes

De opname van een hybride voertuig, dat bij 10 en 20 km/u in elektrische modus rijdt en bij 30 en 50 km/u in verbrandingsmodus, is nuttig om de diversiteit van voertuigen in het verkeer weer te geven, maar maakt de interpretatie van de resultaten minder overzichtelijk. Om deze interpretatie te vereenvoudigen, worden de resultaten eerst toegespitst op het verschil tussen het elektrische voertuig en het voertuig met verbrandingsmotor. In tweede instantie worden de resultaten van het hybride voertuig besproken.

Daarnaast wordt, op basis van de literatuurstudie, verwacht dat verschillen in detecteerbaarheid tussen de drie voertuigen sterk afhangen van de snelheid waarmee zij rijden. Het lijkt daarom relevanter om de resultaten steeds weer te geven in functie van het voertuigtype in samenhang met het effect van snelheid, evenals de interactie tussen beide. Eenvoudige univariate effecten worden hier niet gepresenteerd, aangezien belangrijke interactie-effecten worden verwacht. Bovendien wordt het effect van het omgevingsgeluidsniveau in tweede instantie geïntegreerd in de analyses om de resultaten verder te verfijnen.

Effect van voertuigtype in functie van de snelheid

Figuur 18 vergelijkt de proporties gemiste passages van de drie voertuigen bij de verschillende snelheden. Het interactie-effect tussen voertuigtype en snelheid op de kans om het voertuig te detecteren is statistisch significant ($p = 0,04$). De effecten van snelheid en voertuigtype op de kans op een gemiste passage werden getest met controle voor demografische variabelen, resultaten van de gehoorstest en het omgevingsgeluidsniveau.

De proportie gemiste passages daalt over het algemeen naarmate de snelheid toeneemt, vooral bij lagere snelheden:

- Tussen 10 en 20 km/u daalt de kans om het voertuig te missen significant voor alle drie de voertuigtypes ($p < 0,001$). Deze daling is opvallend bij het elektrische voertuig. De proportie gemiste passages daalt van 32,4% naar slechts 6,7%, terwijl ze voor het voertuig met verbrandingsmotor daalt van 26,7% naar 11,4%.
- Tussen 20 en 30 km/u daalt deze kans significant voor het voertuig met verbrandingsmotor ($p < 0,001$), maar niet voor het elektrische voertuig. Ook voor het hybride voertuig daalt de kans om het voertuig te missen significant ($p < 0,001$).
- Tussen 30 km/u en 50 km/u wordt geen significant verschil vastgesteld in de kans om het voertuig te missen, ongeacht het voertuigtype.

De proportie gemiste passages is relatief vergelijkbaar tussen het elektrische en het voertuig met verbrandingsmotor bij de verschillende snelheden.

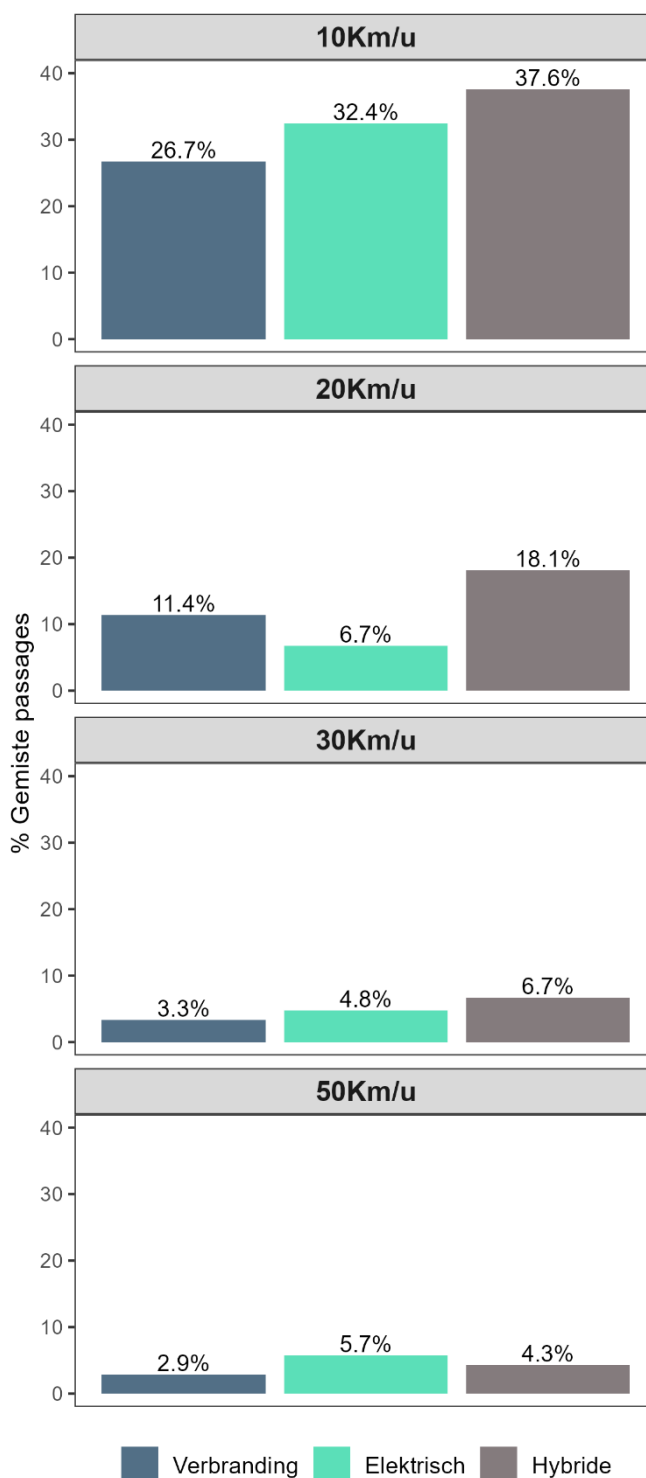
- De kans om het voertuig te missen verschilt niet significant tussen het elektrische en het voertuig met verbrandingsmotor, ongeacht de snelheid.
- Er werd echter een marginaal significant verschil vastgesteld bij 20 km/u ($p = 0,0502$). Het elektrische voertuig werd bij deze snelheid vaker gedetecteerd dan het voertuig met verbrandingsmotor.

Wat het hybride voertuig betreft, lijkt dit bij lagere snelheden moeilijker detecteerbaar dan de andere voertuigen.

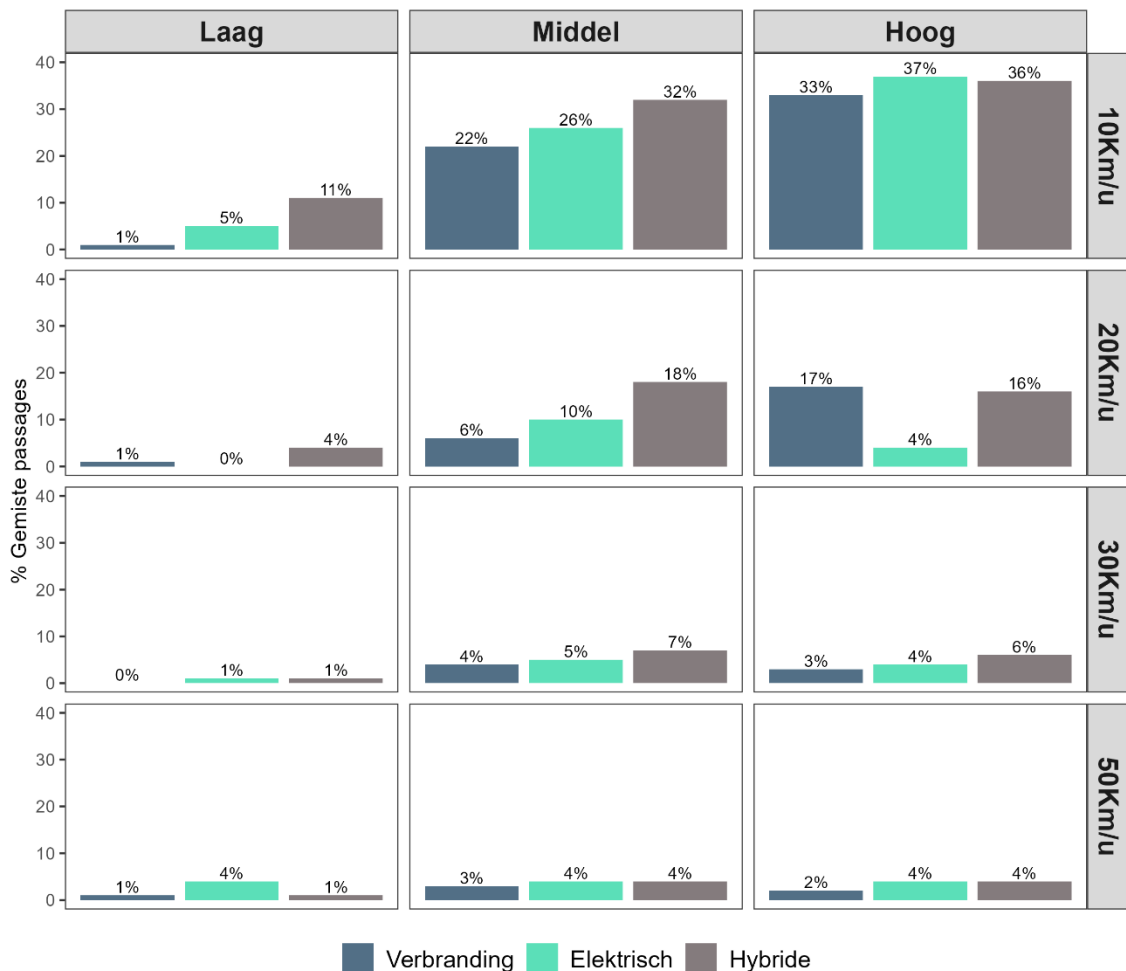
- Bij 10 km/u heeft het hybride voertuig significant meer kans om gemist te worden dan het voertuig met verbrandingsmotor ($p = 0,002$). Er werd geen significant verschil vastgesteld met het elektrische voertuig.
- Bij 20 km/u heeft het hybride voertuig significant meer kans om gemist te worden dan zowel het voertuig met verbrandingsmotor ($p = 0,02$) als het elektrische voertuig ($p < 0,001$).

Toevoeging van het omgevingsgeluidsniveau

Om deze resultaten verder te verfijnen, werd een uitgebreidere analyse uitgevoerd waarbij het omgevingsgeluidsniveau als predictor werd toegevoegd. Het uitgevoerde logistische regressiemodel test de interactie-effecten tussen het omgevingsgeluidsniveau en de twee andere experimentele condities (voertuigtype en snelheid). Figuur 19 toont de verkregen resultaten.



Figuur 18 Proportie gemiste passages volgens voertuigtype en snelheid



Figuur 19 Drievoudige interactie (voertuigtype, snelheid, geluidsniveau) op de proportie gemiste passages

Bij hogere snelheden (30 en 50 km/u) zijn de proporties gemiste passages laag en hangen ze niet af van het voertuigtype noch van het omgevingsgeluidsniveau.

Het omgevingsgeluidsniveau lijkt daarentegen een belangrijke impact te hebben op de proportie gemiste passages voor alle voertuigtypes, en in het bijzonder bij lagere snelheden:

- Bij 10 km/u stijgen de proporties, die in de rustige conditie tussen 1 en 16% liggen, tot ongeveer 50% in de sterk lawaaijige conditie. De kans om het voertuig te missen neemt significant toe tussen het lage en het middelmatige geluidsniveau voor alle voertuigen ($p < 0,001$). Ze neemt ook toe tussen het middelmatige en het hoge geluidsniveau voor het voertuig met verbrandingsmotor ($p = 0,03$) en het elektrische voertuig ($p = 0,03$).
- Bij 50 km/u blijven deze proporties daarentegen vergelijkbaar (onder 6%). Er werd geen significant verschil vastgesteld.

Bij een laag omgevingsgeluidsniveau worden over het algemeen weinig gemiste passages vastgesteld:

- De kans om het voertuig al dan niet te detecteren verschilt niet significant tussen het voertuig met verbrandingsmotor en het elektrische voertuig bij een laag geluidsniveau, ongeacht de snelheid.
- Het hybride voertuig vertoont een marginaal hogere kans om gemist te worden dan het elektrische voertuig ($p = 0,09$) en een significant hogere kans dan voertuig met verbrandingsmotor ($p = 0,012$).

Het effect van de voertuigsnelheid is aanwezig wanneer het omgevingsgeluidsniveau middelmatig of hoog is:

- De proportie gemiste passages is significant groter ($p < 0,01$) bij 10 km/u dan bij 20 km/u, zowel bij een middelmatig als bij een hoog geluidsniveau, voor alle voertuigtypes.
- In deze condities vertonen het elektrische en het voertuig met verbrandingsmotorgelijke resultaten, met uitzondering van de conditie waarbij het voertuig 20 km/u reed in een sterk lawaaijige

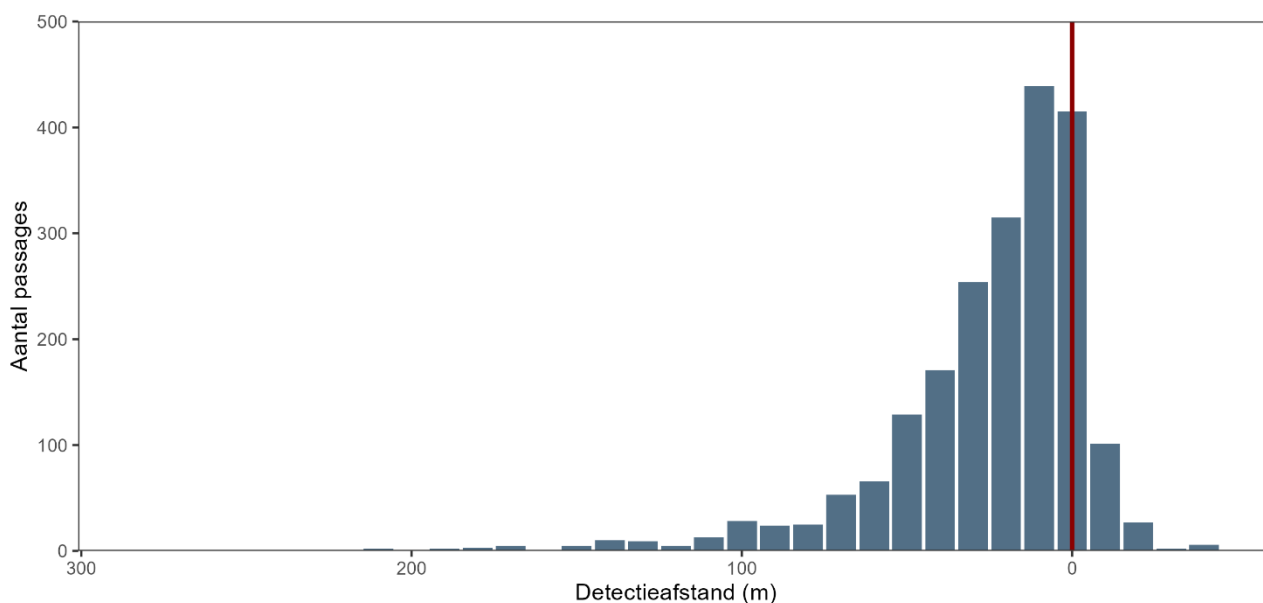
omgeving. In dat geval had het elektrische voertuig significant meer kans om gedetecteerd te worden dan het voertuig met verbrandingsmotor ($p = 0,0012$).

Tabellen met de significante verschillen zijn opgenomen in bijlage. Deze tabellen geven een meer globaal overzicht van de verschillen die in de resultaten van deze studie werden vastgesteld.

4.3.2.4 Detectieafstand van het voertuig

In dit deel worden de resultaten gepresenteerd voor de gevallen waarin het voertuig effectief werd gedetecteerd, met focus op de positie van het voertuig op het moment van detectie. De gebruikte maat is de afstand tussen de microfoon en het voertuig op het moment van detectie, hier afgekort als 'DTA' (Distance To Arrival). Deze maat wordt berekend door het tijdsverschil tussen het moment van detectie en het moment waarop het voertuig ter hoogte van de microfoon komt te vermenigvuldigen met de voertuigsnelheid. Gemiddeld werd het voertuig gedetecteerd wanneer het zich op 25 meter van de microfoon bevond.

Figuur 20 toont de verdeling van de positie van het voertuig, uitgedrukt in resterende tijd tot aankomst, op het moment van detectie. De verkregen verdeling is geen normale verdeling, maar vertoont een negatieve scheefheid. Deze vorm is niet verrassend gezien het type experiment: men verwacht hogere waarden aan de linkerzijde van de curve dan aan de rechterzijde. Een normaliteitstest ('skewness', R-package 'moments') bevestigde dit met een waarde van 2,22, wat zeer hoog is (de richtwaarde ligt tussen -1 en 1). Daarnaast wijst ook het relatief grote verschil tussen de mediaan (2,4) en het gemiddelde (3,5) op een niet-normale verdeling. Aangezien de verdere analyses een normale verdeling vereisen, werden deze uitgevoerd op een klassieke transformatie van de DTA-variabele (vierkantswortel-transformatie, gevolgd door standaardisatie). De normaliteitsscore van de getransformeerde variabele bedraagt 0,44, wat aanvaardbaar is.



Figuur 20 Verdeling van de resterende tijd vóór aankomst van het voertuig op het moment van detectie

Demografische variabelen

De demografische variabelen werden opgenomen in een lineair regressiemodel om na te gaan of een van deze variabelen samenhangt met een snellere detectie van de geteste voertuigen.

- Gender en groep (blind/slechtziend of controlegroep) hebben geen significant effect op de detectieafstand. Leeftijd en score op de gehoortest vertonen elk afzonderlijk wel een significant effect op het detectiemoment.
- Zoals verwacht is leeftijd geassocieerd met een latere detectie ($p < 0,05$), terwijl een hogere score op de gehoortest samenhangt met een vroegere detectie ($p < 0,05$). Wanneer beide variabelen samen in een regressiemodel worden opgenomen om het detectiemoment te voorspellen, verdwijnt het significante effect van leeftijd ten voordele van dat van de gehoorscore ($p < 0,01$). Dit wijst op een volledige mediatie van het effect van leeftijd via gehoor op de detectie van voertuigen. Met andere

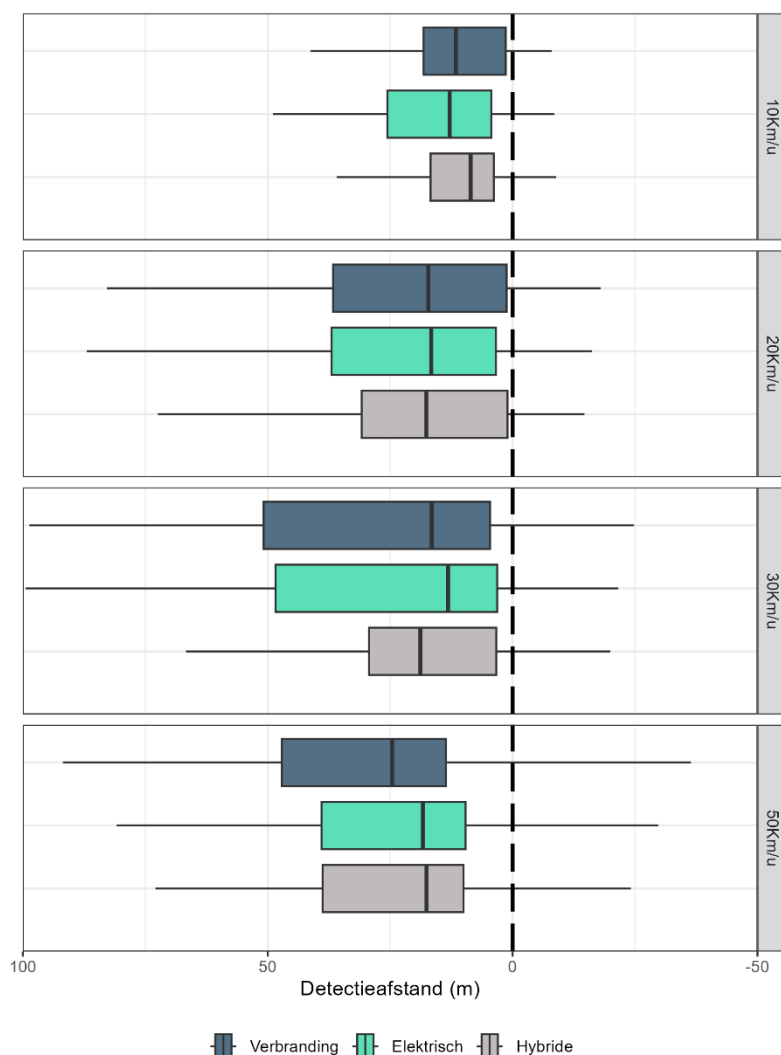
woorden, de latere detectie bij oudere personen lijkt uitsluitend te verklaren door hun verminderde gehoorcapaciteiten, en niet door bijvoorbeeld een langere reactietijd.

Effect van voertuigtype in functie van de snelheid

Net zoals bij de proportie gemiste passages wordt eerst het interactie-effect tussen voertuigtype en snelheid geanalyseerd, alvorens deze resultaten te verfijnen met inbegrip van het omgevingsgeluidsniveau. Figuur 21 toont de gemiddelde afstanden tussen het voertuig en de microfoon op het moment van detectie. Hoe meer naar links de balk (box) zich bevindt, hoe groter de detectieafstand. De figuur geeft dus schematisch de positie van het voertuig weer ten opzichte van de microfoon op het moment van detectie.

De detectieafstand neemt over het algemeen toe naarmate de voertuigsnelheid stijgt:

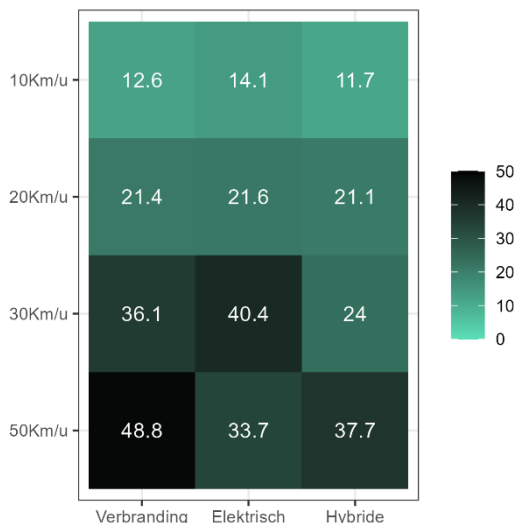
- Dat is het geval voor het voertuig met verbrandingsmotor: de verschillen in detectieafstand zijn allemaal significant tussen de verschillende snelheidsniveaus ($p < 0,001$).
- Dat geldt ook voor het elektrische voertuig tot en met 30 km/u. De gemiddelde detectieafstand voor het elektrische voertuig is groter bij 30 km/u dan bij 50 km/u. Het verschil tussen beide is marginaal significant ($p = 0,053$).
- Voor het hybride voertuig is het verschil tussen 20 en 30 km/u slechts marginaal ($p = 0,07$). De andere verschillen zijn statistisch significant ($p < 0,001$).



Figuur 21 Detectieafstanden in functie van snelheid en voertuigtype

De variatie in detectieafstanden binnen eenzelfde conditie neemt eveneens toe naarmate de snelheid stijgt:

- De standaardafwijking van de detectieafstanden neemt geleidelijk toe in functie van de voertuigsnelheid.
- Tabel 3 toont de standaardafwijking per voertuig en per snelheid.



Tabel 3 Standaardafwijking van de detectieafstanden per voertuig en per snelheid

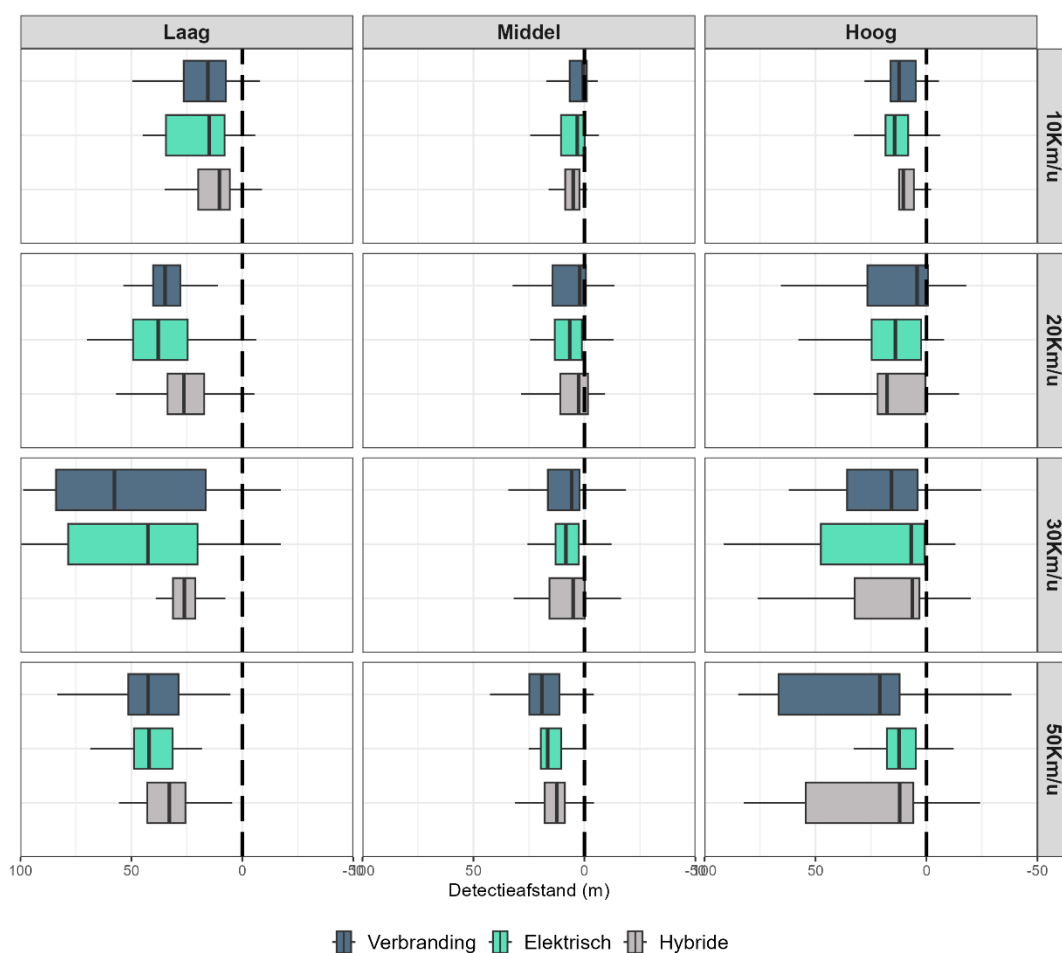
Het elektrische voertuig en het voertuig met verbrandingsmotor vertonen gelijkaardige resultaten.

- Met uitzondering van 50 km/u is er geen significant verschil tussen beide voertuigen.
- Bij 50 km/u wordt het voertuig met verbrandingsmotor op een significant grotere gemiddelde afstand gedetecteerd dan het elektrische voertuig ($p < 0,001$).
- Wat het hybride voertuig betreft: bij 10 km/u wordt het op kortere afstanden gedetecteerd dan de twee andere voertuigen ($p < 0,01$). En bij 50 km/u wordt het op kortere afstanden gedetecteerd dan het voertuig met verbrandingsmotor ($p < 0,001$), maar er is geen significant verschil met het elektrische voertuig.

Toevoeging van het omgevingsgeluidsniveau

Over het algemeen zijn de detectieafstanden groter in een weinig lawaaierige omgeving.

- De afstanden zijn significant groter voor het elektrische en het voertuig met verbrandingsmotor in de rustige omgeving dan in de matig lawaaierige en sterk lawaaierige omgeving ($p < 0,001$), met uitzondering van het voertuig met verbrandingsmotor bij 50 km/u.
- Voor het hybride voertuig is het verschil tussen het lage geluidsniveau en de twee andere niveaus significant bij 10 km/u ($p < 0,001$) en bij 20 km/u ($p = 0,002$).
- De afstanden verschillen niet significant tussen het middelmatige en het hoge geluidsniveau, met uitzondering van het elektrische voertuig bij 30 km/u, dat op significant grotere afstand wordt gedetecteerd in de sterk lawaaierige omgeving dan in de matig lawaaierige omgeving, wat indruist tegen de verwachtingen.



Figuur 22 Gemiddelde detectieafstanden in functie van de snelheid

De daling in detecteerbaarheid van het elektrische voertuig tussen 30 en 50 km/u is zichtbaar in de sterk lawaaierige omgeving ($p = 0,0011$) en in de rustige omgeving ($p < 0,001$).

De verschillen tussen het elektrische en het voertuig met verbrandingsmotor doen zich bijna uitsluitend voor in de sterk lawaaierige omgeving.

- Bij 20 en 30 km/u wordt het elektrische voertuig op grotere afstand gedetecteerd dan het voertuig met verbrandingsmotor, maar dit verschil is statistisch marginaal ($p = 0,07$ bij 20 km/u en $p = 0,055$ bij 30 km/u).
- Bij 50 km/u wordt het elektrische voertuig op significant kortere afstand gedetecteerd dan het voertuig met verbrandingsmotor ($p < 0,001$).
- Dat is eveneens het geval bij 50 km/u in een matig lawaaierige omgeving ($p = 0,0014$). Dit is het enige verschil tussen het elektrische en het voertuig met verbrandingsmotor in rustige of matig lawaaierige omgevingen.

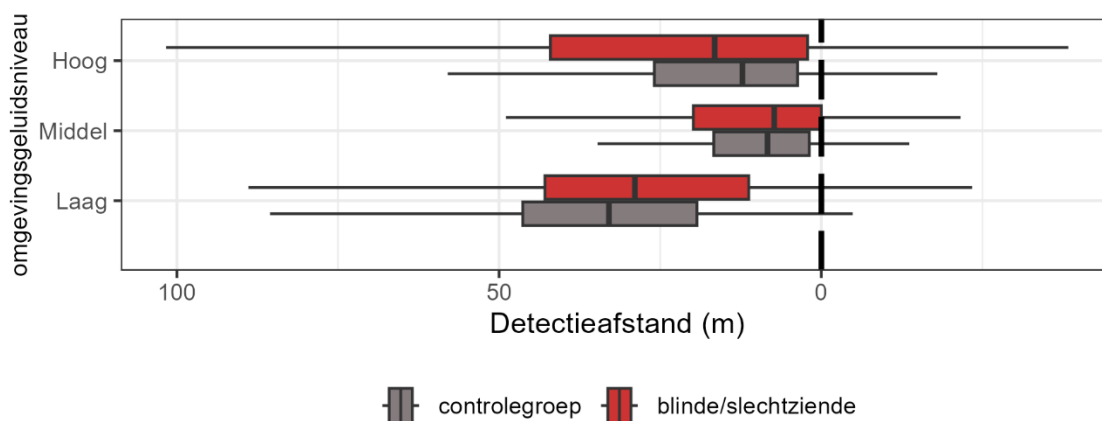
Het hybride voertuig wordt op kortere afstand gedetecteerd in een rustige omgeving:

- De detectieafstand is significant kleiner dan voor de twee andere voertuigen, ongeacht de snelheid ($p < 0,05$).
- Dit is niet het geval bij de andere geluidsniveaus. De verschillen zijn niet significant, behalve in vergelijking met het elektrische voertuig bij 30 km/u ($p = 0,006$).

Tabellen met de significante verschillen zijn opgenomen in bijlage. Deze tabellen geven een meer globaal overzicht van de verschillen die in de resultaten van deze studie werden vastgesteld.

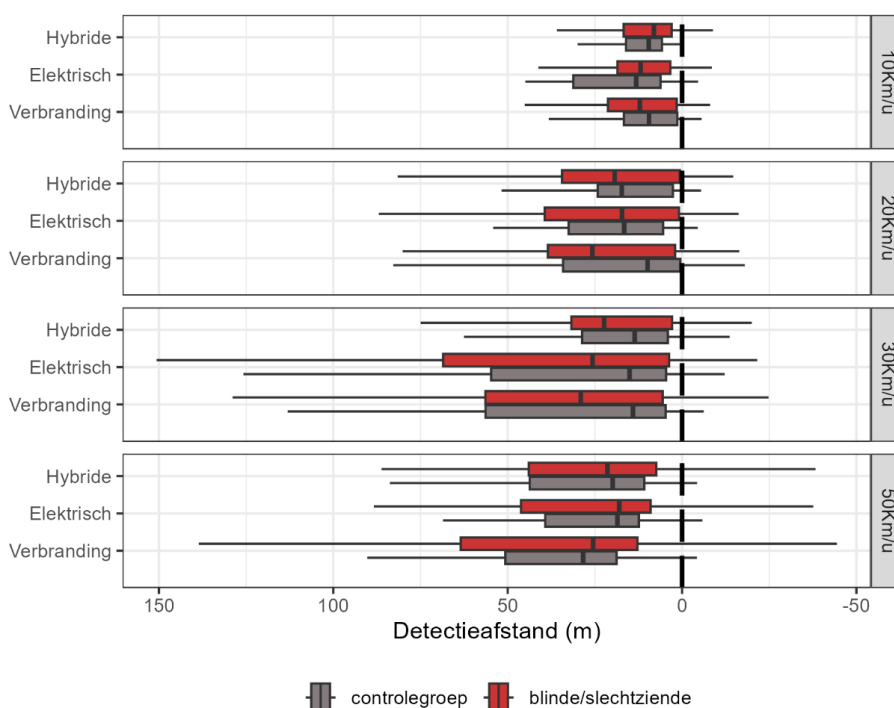
4.3.2.5 Blinden/slechtzienden en detectie

Aanvullende analyses werden uitgevoerd om na te gaan of blinde of slechtziende personen in bepaalde specifieke condities betere resultaten behalen dan de controlegroep. Deze analyses werden telkens uitgevoerd met controle voor het effect van de gehoorscore. De resultaten van beide groepen zijn gelijkaardig wanneer de voertuigsnelheid varieert. Er blijkt echter een significant interactie-effect te zijn ($p < 0,001$) tussen groep en omgevingsgeluidsniveau. Bij lage geluidsniveaus detecteerde de controlegroep het voertuig gemiddeld op grotere afstand dan de blinde/slechtziende personen (dit verschil is niet significant). Bij hogere geluidsniveaus keert deze tendens zich om, en detecteren blinde/slechtziende personen het voertuig op grotere afstand. Bij een zeer hoog geluidsniveau is dit verschil statistisch significant ($p < 0,05$). Figuur 23 toont de gemiddelde waarden die voor elke groep werden verkregen.



Figuur 23 Gemiddelde detectieafstanden per geluidsniveau – vergelijking tussen blinden/slechtzienden en controlegroep

Figuur 24 toont de gemiddelde detectieafstanden per voertuigtype. Bij 20 km/u detecteerden blinde/slechtziende personen het voertuig met verbrandingsmotor op significant grotere afstand dan de controlegroep ($p < 0,05$). Er werden geen andere significante verschillen vastgesteld. Op basis van Figuur 24 zou het evenwel kunnen dat blinde of slechtziende personen in het algemeen beter presteren dan de controlegroep, in het bijzonder bij het detecteren van voertuigen met verbrandingsmotoren, maar dat de hoge variantie in de resultaten dit niet statistisch zichtbaar maakt.



Figuur 24 Gemiddelde detectieafstanden per voertuigtype – vergelijking tussen blinden/slechtzienden en controlegroep

4.3.2.6 Gehoorscores per frequentie en detectie

Een van de doelstellingen van deze studie is het formuleren van aanbevelingen met betrekking tot de ontwikkeling van het AVAS-systeem. Een interessante piste is na te gaan of de detectieafstand beïnvloed wordt door auditieve capaciteiten binnen een specifieke frequentieband. Indien dat het geval is, zou dit erop wijzen dat deze frequentieband een belangrijke rol speelt in de detectie van voertuigen, en dat een AVAS-systeem zich onder meer op die band zou moeten richten. De bekomen resultaten tonen geen significante relatie tussen de gehoorscores per frequentie en de detectieafstand of de kans om het voertuig al dan niet te horen. In toekomstig onderzoek zou het interessant kunnen zijn om een mogelijke correlatie te testen tussen het geluidsvermogen dat voertuigen produceren binnen verschillende frequentiebanden en de detectieafstand. Helaas omvat deze experimentele opzet slechts drie verschillende voertuigen, wat onvoldoende variatie biedt voor robuuste statistische analyses.

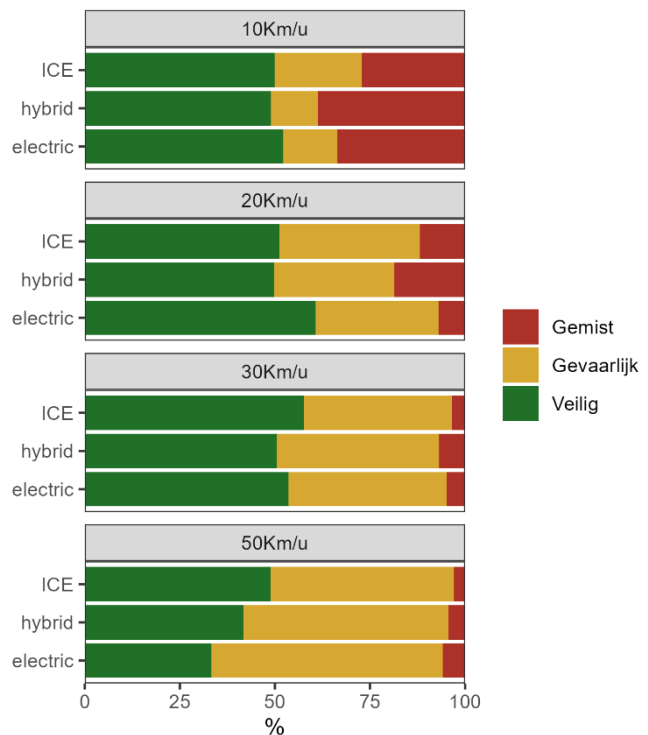
4.3.2.7 Objectieve veiligheid

Detectieafstand en remafstand

In de literatuurstudie hebben we de algemene daling van het geluidsvermogen van voertuigen besproken, evenals de algemene risico's die daarmee gepaard kunnen gaan, los van het type voertuig. Het doel van deze sectie is na te gaan of de in dit experiment gemeten detectieafstanden volstaan om een persoon in staat te stellen veilig te blijven wanneer uitsluitend het geluid als informatiebron wordt gebruikt. Daartoe hebben we de benodigde remafstand van het voertuig geraamd aan de hand van een formule die hiervoor vaak wordt toegepast. Rekening houdend met een gemiddelde reactietijd van één seconde en een gemiddelde remcoëfficiënt op een droog wegdek, bekomen we dat een voertuig dat 10 km/u rijdt, kan stoppen binnen een afstand van 3,3 m. Bij 20 km/u bedraagt die afstand 7,6 m, bij 30 km/u 12,9 m en bij 50 km/u 26,4 m. De resultaten die hierna worden gepresenteerd, zijn gebaseerd op de gemeten detectieafstanden en vergelijken deze met de afstand die het voertuig nodig heeft om tot stilstand te komen. Wanneer een voertuig wordt gedetecteerd op een afstand die kleiner is dan de remafstand, wordt dit als potentieel gevaarlijk beschouwd. Het is belangrijk te benadrukken dat deze berekeningen uitgaan van ideale omstandigheden. Tal van factoren kunnen de remafstand in werkelijkheid vergroten (afleiding van de bestuurder, weersomstandigheden, bandenspanning ...).

Figuur 25 en Figuur 26 delen de proeven op in drie categorieën: proeven waarbij het voertuig niet werd gedetecteerd, proeven waarbij het voertuig te laat werd gedetecteerd en proeven waarbij het voertuig op voldoende afstand werd gedetecteerd zodat de bestuurder kon stoppen. De balken geven de proporties van deze verschillende categorieën weer in functie van de experimentele condities. In Figuur 25 zien we de proporties gemiste, gevaarlijke en veilige proeven in functie van het type voertuig en de snelheid, ongeacht het omgevingsgeluidsniveau.

- We kunnen vaststellen dat het aandeel voldoende vroege detecties slechts rond de 50% ligt. Deze proportie blijft relatief stabiel tussen de verschillende voertuigtypes en snelheidsniveaus. De proportie lijkt licht lager wanneer het voertuig 50 km/u rijdt. Dit hangt waarschijnlijk samen met het feit dat de detectieafstanden slechts beperkt verbeteren bij 30 km/u, terwijl de remafstand aanzienlijk groter is.
- De proportie gemiste passages daalt naarmate de snelheid toeneemt. Dit is een vaststelling die we eerder al hebben gemaakt. Een belangrijke bijkomende

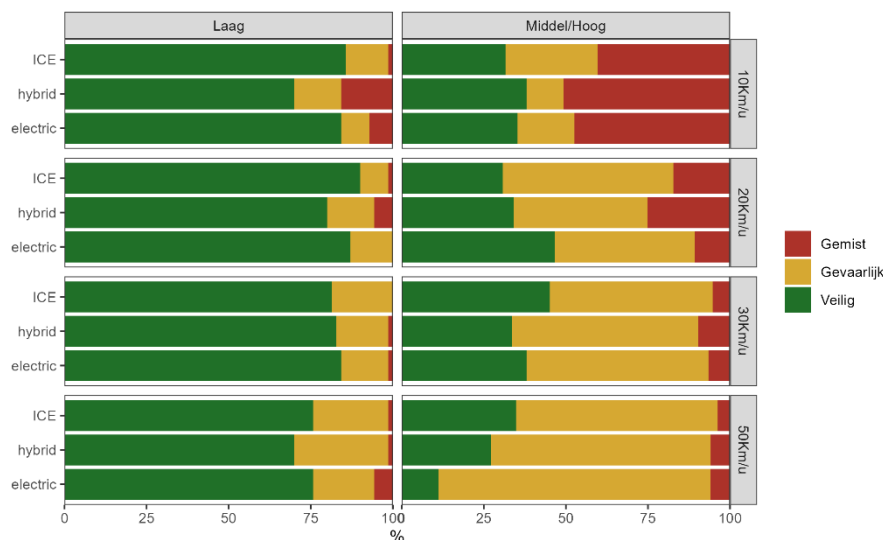


Figuur 25 Proporties veilige en gevaarlijke detecties in functie van de snelheid

vaststelling uit deze figuur is dat, hoewel er bij hogere snelheden meer gevallen zijn waarin het voertuig wordt gedetecteerd, een groot deel van deze detecties te laat gebeurt om de veiligheid van voetgangers te garanderen. Het aandeel 'veilige' proeven blijft immers stabiel, terwijl het aandeel 'gevaarlijke' proeven toeneemt naarmate de snelheid van het voertuig stijgt.

Figuur 26 is vergelijkbaar met de vorige, met dat verschil dat hier de resultaten worden vergeleken in functie van het omgevingsgeluid.

- We zien dat in een lawaaiëring omgeving de proportie testen waarbij het voertuig voldoende vroeg werd gedetecteerd nog verder daalt tot slechts 1 op 3 (33,8%). Bij 50 km/u bedraagt dit zelfs nog maar 1 op 4 (24,4%).



Figuur 26 Proporties veilige en gevaarlijke detecties in functie van snelheid en omgevingsgeluid

4.3.2.8 Subjectieve veiligheid

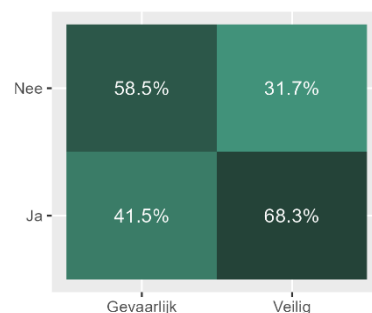
Tijdens het experiment werd aan de deelnemers na elke detectie gevraagd te beoordelen of het voertuig effectief nog de tijd zou hebben gehad om tot stilstand te komen vóór het hen zou bereiken. Door hun antwoord te vergelijken met de berekende inschatting (zie bovenstaande formule), kan worden nagegaan of zij op basis van louter auditieve informatie correct kunnen inschatten of een situatie veilig is of niet.

Een dergelijke inschatting moet zo accuraat mogelijk zijn om de veiligheid van voetgangers te waarborgen, in het bijzonder wanneer zij moeten beslissen of ze al dan niet oversteken. De onderstaande figuren tonen het aantal antwoorden 'Ja' (het voertuig had kunnen stoppen) en 'Nee' (het voertuig had niet kunnen stoppen) in verhouding tot de objectieve situatie (veilig indien het voertuig effectief had kunnen stoppen, gevaarlijk indien niet).

Proportie correcte antwoorden

Op basis van Tabel 4, die de proporties weergeeft, blijkt dat de meerderheid van de antwoorden correct is, maar dat er toch een relatief hoog aandeel foutieve antwoorden voorkomt.

- Wanneer het voertuig voldoende vroeg werd gedetecteerd zodat de bestuurder kon stoppen, maakten de deelnemers in 31,7% van de gevallen een fout. Dit zijn situaties waarin de deelnemers hun eigen vermogen om het voertuig tijdig te detecteren onderschatten; dit vormt dus niet noodzakelijk een direct veiligheidsrisico.
- Omgekeerd, wanneer het voertuig op een onvoldoende afstand werd gedetecteerd, was 41,5% van de antwoorden fout. Dit relatief hoge percentage is zorgwekkend, aangezien dit potentieel gevaarlijke situaties betreft die kunnen leiden tot een risicovolle beslissing om over te steken.



Tabel 4 Proportie antwoorden

Statistische toetsen

Om na te gaan in welke mate deelnemers correct konden inschatten of het voertuig nog had kunnen stoppen, werden statistische analyses uitgevoerd. Daarbij werd gebruikgemaakt van lineaire regressiemodellen met herhaalde metingen. Het doel van deze analyse was om statistisch te toetsen of de kans dat deelnemers 'Nee' antwoorden toeneemt naarmate de afstand tussen hen en het voertuig op het moment van detectie kleiner wordt. Daarnaast werden interactie-effecten getest om na te gaan of de kwaliteit van de antwoorden afhangt van de groep (controlegroep of blinden/slechtzienden) of van de experimentele conditie (voertuigtype, snelheid, omgevingsgeluid).

- Het basismodel toont aan dat de proportie 'Nee'-antwoorden significant toeneemt naarmate de detectieafstand kleiner wordt ($p < 0,001$).

Impact van voertuigtype en snelheid op de antwoorden van de deelnemers

De mate waarin deelnemers correct inschatten of het voertuig had kunnen stoppen, lijkt afhankelijk van de snelheid en het voertuigtype:

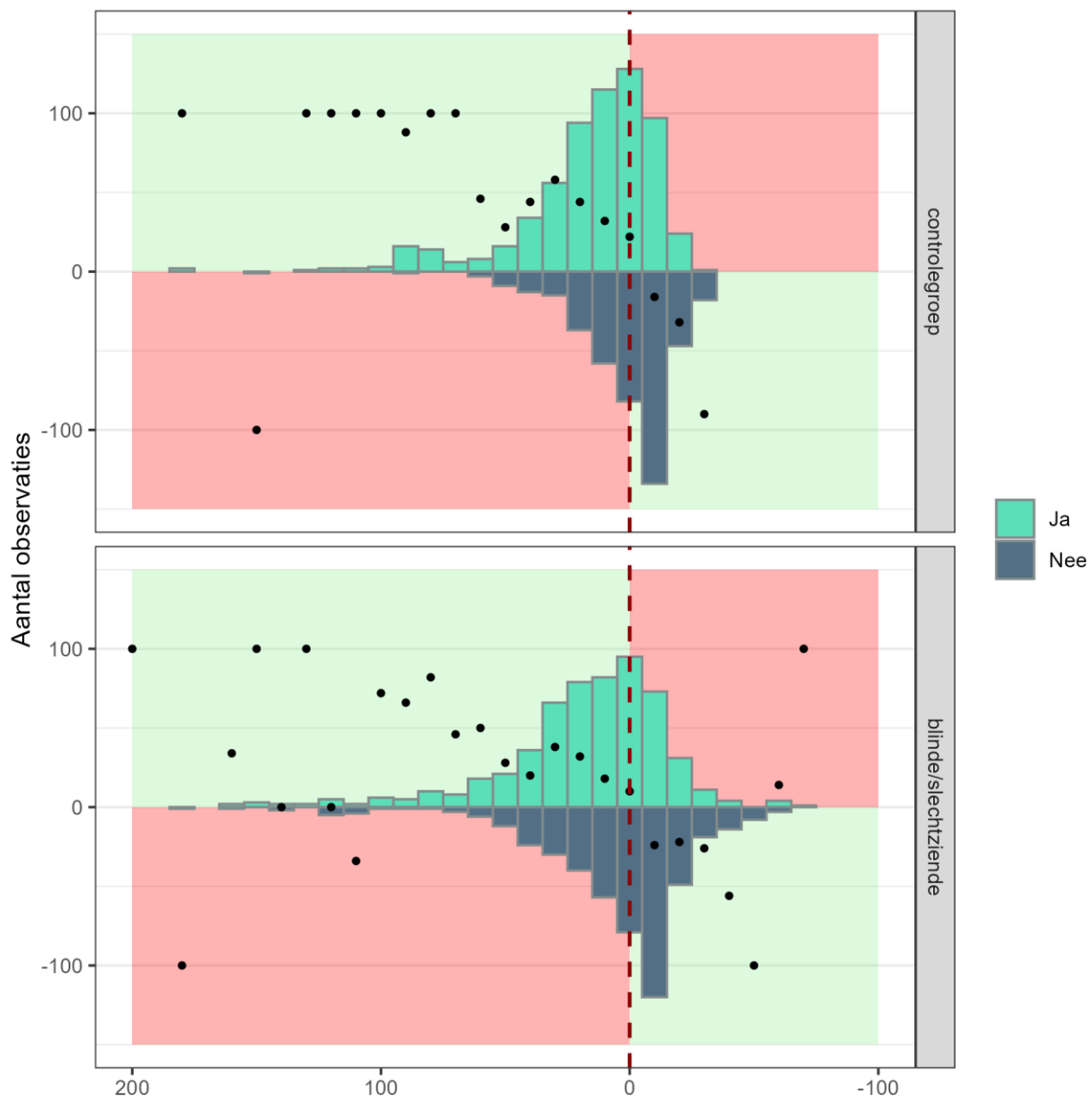
- Bij middelmatige snelheden (20 en 30 km/u) was de relatie tussen detectieafstand en de kans op een 'Nee'-antwoord significant voor alle voertuigen ($p < 0,05$).
- Bij lage snelheid (10 km/u) werd deze relatie niet vastgesteld voor het elektrische en het hybride voertuig; ze was wel significant voor het voertuig met verbrandingsmotor ($p < 0,001$).
- Bij hoge snelheid (50 km/u) was deze relatie niet significant voor het voertuig met verbrandingsmotor, maar wel voor het elektrische voertuig ($p < 0,001$) en het hybride voertuig ($p < 0,01$).

Impact van voertuigtype en omgevingsgeluid op de antwoorden van de deelnemers

Bij lage en middelmatige geluidsniveaus was de relatie tussen detectieafstand en de kans op een 'Nee'-antwoord significant voor alle voertuigen ($p < 0,05$). Bij een hoog geluidsniveau was deze relatie significant voor het elektrische voertuig ($p < 0,001$), maar niet significant voor het voertuig met verbrandingsmotor ($p = 0,55$). Voor het hybride voertuig was de relatie marginaal significant ($p = 0,066$).

Vergelijking van de experimentele groepen

Figuur 27 geeft het aantal 'Ja'- en 'Nee'-antwoorden weer in functie van de positie van het voertuig op het moment van detectie. De positie '0' komt overeen met het punt waarop het voertuig precies de benodigde afstand zou hebben gehad om tot stilstand te komen ter hoogte van de deelnemer. Links van dit punt werden voertuigen voldoende vroeg gedetecteerd en was het correcte antwoord dus 'Ja'. Rechts van dit punt werd het voertuig op een te korte afstand gedetecteerd om nog te kunnen stoppen en was het correcte antwoord 'Nee'. De zwarte punten geven de verhouding tussen beide antwoorden weer. Een waarde van 100 betekent dat alle deelnemers 'Ja' antwoordden; een waarde van -100 betekent dat alle deelnemers 'Nee' antwoordden; een waarde van 0 betekent dat er evenveel 'Ja'- als 'Nee'-antwoorden waren. De antwoorden werden afzonderlijk weergegeven voor elke groep (controlegroep en blinden/slechtzienden).



Figuur 27 Aantallen en proporties 'Ja'- versus 'Nee'-antwoorden in functie van de positie van het voertuig op het moment van detectie

De antwoorden lijken minder accuraat bij blinden/slechtzienden.

- Het interactie-effect tussen detectieafstand en experimentele groep is significant: de relatie tussen detectieafstand en de kans om 'Nee' te antwoorden is significant minder sterk bij blinden/slechtzienden dan bij de controlegroep ($p < 0,001$). Deze relatie blijft echter significant voor beide groepen ($p < 0,001$).
- Op basis van Figuur 27 lijkt het erop dat blinden/slechtzienden enkele zeldzame fouten hebben gemaakt bij extreme afstanden, wat een sterke invloed kan hebben op het lineaire regressiemodel en mogelijk het waargenomen interactie-effect verklaart. Mogelijke verklaringen voor deze fouten bij extreme afstanden worden besproken in de sectie 'Bespreking van de resultaten'.
- Een bijkomend regressiemodel werd getest waarbij de extreme afstandswaarden met zeer weinig observaties werden verwijderd ($-60 < \text{afstand} < 100$). In dat geval is het interactie-effect met de experimentele groep slechts marginaal significant ($p = 0,053$).

4.4 Bespreking van de resultaten

4.4.1 Detecteerbaarheid

Factoren die de detecteerbaarheid beïnvloeden

In lijn met wat in de literatuurstudie werd besproken, hebben de snelheid van het voertuig en het omgevingsgeluid een zeer grote impact op het vermogen van een voetganger om een voertuig auditief te detecteren.

In een rustige omgeving werden quasi alle voertuigen gedetecteerd en waren de detectieafstanden in de meerderheid van de gevallen voldoende om het voertuig te laten stoppen, zelfs bij hogere snelheden (75% bij 50 km/u).

In een stedelijke omgeving met meer achtergrondgeluid heeft de snelheid van het voertuig een grotere invloed op de detecteerbaarheid. De metingen van de akoestische kenmerken van de verschillende voertuigen tonen aan dat het geluidsniveau sterk toeneemt met de snelheid. Voertuigen die aan lagere snelheden rijden, worden vaker gemist en wanneer ze worden gedetecteerd, zijn de detectieafstanden kleiner.

Bij hogere snelheden (30 en 50 km/u) wordt het uitgestraalde geluidsniveau voldoende hoog om ondanks het omgevingsgeluid te worden gedetecteerd. Het aandeel gemiste passages blijft bij deze snelheden laag, ongeacht het geluidsniveau. De detectieafstanden zijn ook iets groter, maar niet voldoende om de veel langere remafstanden bij hogere snelheden te compenseren. Dit leidt ertoe dat in de meerderheid van de gevallen de detectieafstand niet volstaat om het voertuig te laten stoppen (75% bij 50 km/u).

Het AVAS-systeem

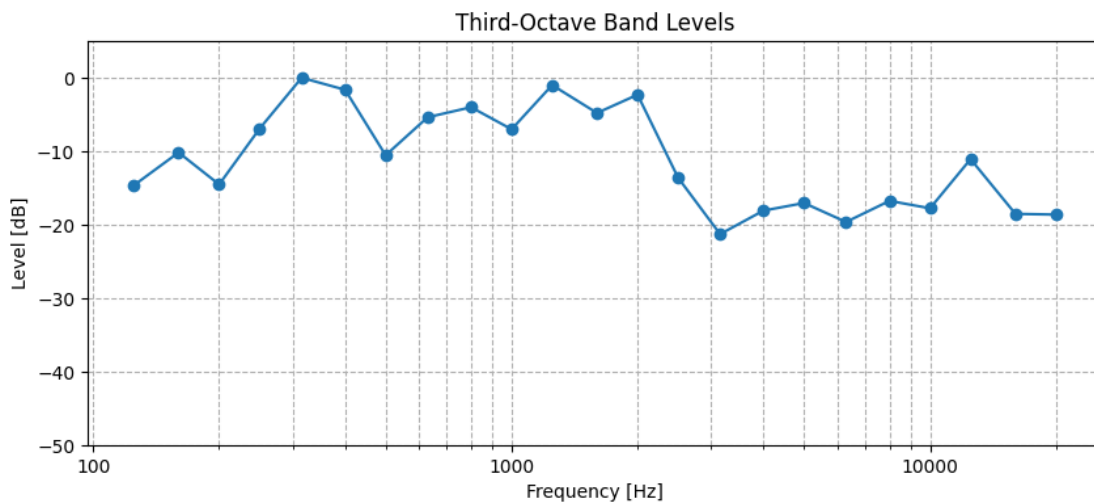
De deelnemers in het kwalitatieve luik gaven aan dat elektrische en hybride voertuigen een algemeen gevoel van stress veroorzaken. Volgens hen worden stille voertuigen niet op voldoende afstand gedetecteerd om hun eigen veiligheid te waarborgen. Bij de bespreking van het AVAS-systeem bleek dat de meeste deelnemers, zelfs wanneer zij op de hoogte waren van het bestaan ervan, het systeem als ontoereikend beschouwden. De voornaamste kritiek betreft het feit dat het geproduceerde geluid niet krachtig genoeg is en gemakkelijk overstemd wordt in een lawaaijige omgeving.

Wat de vergelijking tussen voertuigtypes bij 10 en 20 km/u betreft (wanneer het AVAS-systeem actief is), lijken de resultaten aan te tonen dat het AVAS-systeem effectief is. Er werd in het algemeen geen groot verschil vastgesteld tussen het elektrische voertuig en het voertuig met verbrandingsmotor. Het aandeel gemiste passages en de detectieafstanden zijn vergelijkbaar. Het lijkt er dus op dat de aanwezigheid van AVAS het elektrische voertuig even detecteerbaar maakt als een voertuig met verbrandingsmotor.

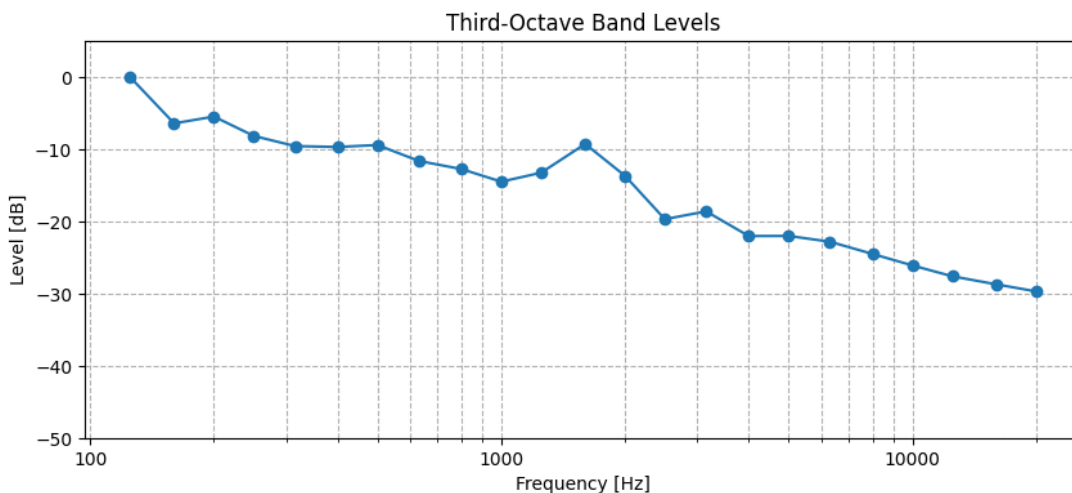
Dat geldt minder voor het AVAS-systeem van het hybride voertuig. Dit voertuig werd vaker gemist dan de andere en de detectieafstanden waren kleiner dan bij de twee andere voertuigen, vooral in de rustige omgeving. In middelmatig en sterk lawaaijige omgevingen zijn de resultaten van het hybride voertuig vergelijkbaar met die van de andere twee. Dit zou erop kunnen wijzen dat het AVAS-systeem van het hybride voertuig niet per se minder effectief is dan dat van het elektrische voertuig, maar dat het minder herkenbaar is, waardoor deelnemers meer tijd nodig hadden om het geluid als dat van een voertuig te identificeren. De akoestische metingen tonen bovendien aan dat het geluidsniveau van twee verschillende AVAS-systemen onderling sterk kan verschillen. Het is moeilijk vast te stellen of de minder goede resultaten van het hybride voertuig te wijten zijn aan zijn akoestische eigenschappen, aan de aard van het geluid dat minder herkenbaar zou zijn, of aan andere factoren.

Een opvallende vaststelling is het zeer lage aandeel gemiste passages voor het elektrische voertuig bij 20 km/u in de sterk lawaaijige omgeving. In dezelfde omstandigheden werd het voertuig met verbrandingsmotor in 17% van de gevallen gemist en het hybride voertuig in 16%. Het is mogelijk dat het AVAS-systeem van het elektrische voertuig specifieke akoestische kenmerken heeft die het beter doen onderscheiden van het omgevingsgeluid. Op basis van de literatuurstudie en de resultaten van deze studie luidt de hypothese dat frequenties rond 1000 Hz overeenkomen met het rolgeluid en daardoor gemakkelijk worden overstemd. De frequentiemetingen in het eerste experiment bevestigen deze hypothese. Frequenties die de detectie bevorderen, zouden zich eerder in iets lagere banden (ongeveer 500 Hz) en hogere banden tot 5000 Hz bevinden. Op basis van Figuur 28 en Figuur 29 kan worden verondersteld dat de frequenties rond 500 Hz en

2000 Hz, die sterker aanwezig zijn bij het elektrische voertuig, hebben bijgedragen tot een betere detecteerbaarheid.



Figuur 28 Frequentiespectrum, elektrisch voertuig – 20 km/u



Figuur 29 Frequentiespectrum, hybride voertuig – 20 km/u

Vergelijking tussen voertuigen bij 30 en 50 km/u

In sommige gevallen was de detectieafstand kleiner bij 50 dan bij 30 km/u. Dit kan op verschillende manieren worden verklaard:

- Bij 50 km/u heeft een kleine variatie in het moment waarop de deelnemer op de knop drukt een grotere impact dan bij 30 km/u. Kortere afstanden kunnen dus deels het gevolg zijn van de reactietijd van de deelnemers.
- Het geluidsniveau van een voertuig bij 50 km/u is hoger dan bij 30 km/u. Theoretisch zou een voertuig dus op grotere afstand detecteerbaar moeten zijn bij 50 km/u. Echter, bij deze snelheid neemt het waargenomen geluidsniveau veel geleidelijker toe naarmate het voertuig nadert. Het geluid wordt eerst zeer zwak en vanop grote afstand waargenomen en stijgt vervolgens progressief. Het is dus mogelijk dat het moment waarop de deelnemer beseft dat het om een voertuig gaat, wordt uitgesteld omdat het geluidsniveau slechts langzaam toeneemt. De deelnemer kan meer twijfelen of het waargenomen geluid daadwerkelijk van een voertuig afkomstig is.

Beide verklaringen zijn coherent met het feit dat de spreiding in detectieafstanden bij 50 km/u zeer groot is.

Het elektrische voertuig bij 50 km/u lijkt later te zijn gedetecteerd dan de andere voertuigen, en ook later dan hetzelfde voertuig bij 30 km/u. Een mogelijke verklaring ligt in het experimentele design. De meeste voertuigen

passeerden de microfoon ongeveer 20 seconden na het begin van de geluidsopname, maar er werd bewust variatie ingebouwd om het moment van passage niet voorspelbaar te maken. Bij het elektrische voertuig aan 50 km/u passeerde het voertuig het vroegst (ongeveer na 16 seconden). Het is mogelijk dat deelnemers verrast werden door deze iets vroegere passage in vergelijking met de andere geluidsfragmenten.

Bij 30 en 50 km/u, wanneer het hybride voertuig in verbrandingsmodus reed, waren de detectieafstanden kleiner dan bij het voertuig met verbrandingsmotor. De experimentele omstandigheden bieden geen duidelijke verklaring voor dit verschil. Een mogelijke hypothese is dat de geluidssignatuur van de verbrandingsmotor van het hybride voertuig specifieke kenmerken heeft die de detectie bemoeilijken. Ook kan men zich afvragen of er een mogelijke interferentie (wind, achtergrondgeluid...) aanwezig was op de geluidsopname, of dat verschillen in voertuigkenmerken (gewicht, type banden...) een rol hebben gespeeld.

Blinden en slechthoorders

De voorafgaande hypothesen waren dat blinden en slechthoorders zowel bij de gehoortest als bij de detectie van voertuigen betere resultaten zouden behalen dan de controlegroep. Wat de gehoorscore betreft tonen de resultaten eerder het tegenovergestelde. Dit kan mogelijk te maken hebben met auditieve beperkingen. Gecombineerde gehoor- en visuele beperkingen ("Dual Sensory Impairment") komen relatief vaak voor en kunnen verschillende oorzaken hebben (aangeboren aandoeningen, ongevallen...), maar een frequente oorzaak is leeftijd (Bright et al., 2023; Schneider et al., 2011). Het is ook mogelijk dat de betere resultaten van blinden en slechthoorders bij bepaalde auditieve testen in de wetenschappelijke literatuur eerder te wijten zijn aan een efficiëntere verwerking van auditieve stimuli dan aan een betere perceptie op zich. Wat de detectieafstanden en het aandeel gemiste passages betreft, werden geen significante verschillen vastgesteld tussen beide groepen in de globale resultaten. Dit kan samenhangen met de grote variantie in detectieafstanden. Wanneer men echter meer in detail kijkt, blijkt dat blinden en slechthoorders voertuigen op grotere afstand detecteerden bij een hoog geluidsniveau, terwijl er bij lagere geluidsniveaus geen significant verschil was. Een mogelijke verklaring is dat blinden en slechthoorders, door hun grotere ervaring, beter in staat zijn om gebruik te maken van de 'gaten' in het omgevingsgeluid, dat wil zeggen de korte momenten waarop het achtergrondgeluid tijdelijk afneemt om een naderend voertuig te detecteren. Deze interpretatie sluit aan bij het werk van Guth et al. (2005), dat suggereert dat deze strategie vaak wordt toegepast door personen met een visuele beperking.

Bij de testen aan 20 km/u behaalden blinden en slechthoorders ook licht betere scores dan de controlegroep voor de detectie van het voertuig met verbrandingsmotor, terwijl de resultaten voor de andere voertuigen quasi identiek waren. Het is aannemelijk dat blinden en slechthoorders vooral gewend zijn aan het detecteren van voertuigen met verbrandingsmotor, aangezien deze het meest voorkomen in het verkeer. Zij zijn dus als het ware 'experts' in deze specifieke taak. De geluiden van AVAS-systemen zijn daarentegen relatief nieuw en variëren sterk naargelang het merk, wat de herkenning kan bemoeilijken. Dit kan gedeeltelijk verklaren waarom de geïnterviewde personen unaniem aangeven dat het AVAS-systeem ontoereikend is, terwijl de experimentele resultaten dit niet volledig bevestigen.

4.4.2 Veiligheidsafstanden

Zoals hierboven vermeld, wijst het experimentele luik van dit rapport op een algemeen tekort aan detecteerbaarheid van voertuigen op basis van geluid. Deze resultaten lijken uitgesprokener dan in andere studies ter zake (Garay-Vega, Hastings, Pollard, Zuschlag, Stearns, et al., 2010; Hastings et al., 2011). Een mogelijke verklaring is dat de geciteerde studies grotendeels dateren van meerdere jaren geleden. Zoals eerder toegelicht, moedigen regelgeving en klanteneisen constructeurs aan om het geluidsniveau van voertuigen te beperken. In de praktijk is het gemiddelde geluidsniveau van voertuigen dan ook gedaald. De resultaten van deze studie suggereren dat we een algemeen geluidsniveau bereiken dat niet wezenlijk verschilt tussen voertuigtypes, maar dat mogelijk te laag wordt om een voldoende vroege detectie te garanderen, vooral rekening houdend met de geluidsvervuiling in stedelijke omgevingen. Zoals blijkt uit de resultaten, werd het voertuig slechts in de helft van de gevallen op voldoende afstand gedetecteerd om het voertuig te laten stoppen vóór het de persoon bereikt. Wanneer enkel de passages in een middelmatig of sterk lawaaierige omgeving worden beschouwd – geluidsomgevingen die in reële omstandigheden werden opgenomen – daalt dit aandeel tot slechts één op drie.

Bovendien werden de remafstanden berekend op basis van optimale omstandigheden: een droog wegdek, goed werkende remmen, en zowel bestuurder als voetganger die aandachtig zijn. In werkelijkheid zijn deze

omstandigheden zelden allemaal tegelijk vervuld. Men mag dus verwachten dat het aandeel laattijdige detecties in de praktijk nog hoger ligt.

4.4.3 Auditieve capaciteiten en geluidsfrequenties

De resultaten van de gehoortest vertoonden relatief grote verschillen tussen de deelnemers, wat een noodzakelijke voorwaarde is om een mogelijk effect van auditieve capaciteiten op de detectie van voertuigen te kunnen analyseren. Vooreerst werd een negatieve relatie vastgesteld tussen auditieve capaciteiten en leeftijd. De gehoorcapaciteiten leken echter op vergelijkbare wijze af te nemen met de leeftijd over alle frequentieniveaus heen, terwijl op basis van de literatuur verwacht werd dat deze relatie vooral uitgesproken zou zijn bij hogere frequenties. Bovendien waren de globale gehoorscores het best bij de middelfrequenties, wat in lijn ligt met de verwachtingen.

Een belangrijke vaststelling is dat oudere deelnemers voertuigen significant later detecteren dan jongere deelnemers, maar dat deze relatie uitsluitend lijkt te worden verklaard door de lagere auditieve capaciteiten van ouderen. Het feit dat de relatie tussen leeftijd en detectieafstand verdwijnt wanneer gecontroleerd wordt voor auditieve capaciteiten wijst erop dat er geen bijkomende leeftijdsgebonden effecten zouden zijn (zoals een langere reactietijd...). Toch moet rekening worden gehouden met het feit dat mensen zich in reële situaties vaak trager verplaatsen, of bijvoorbeeld sterk uiteenlopende gehoorcapaciteiten per oor hebben, wat de detectieafstand kan beïnvloeden afhankelijk van de zijde waaruit het voertuig nadert. Het is dan ook belangrijk om de problematiek rond stille voertuigen bij oudere personen niet uitsluitend te reduceren tot auditieve capaciteiten.

Er werd getracht na te gaan of detectieafstanden verband hielden met auditieve capaciteiten op specifieke frequenties. Het doel was te bepalen of bepaalde frequenties die door het voertuig worden uitgezonden een grotere rol spelen in de detecteerbaarheid. In tegenstelling tot wat op basis van de wetenschappelijke literatuur werd verwacht, werd geen significante relatie vastgesteld voor één van de geteste frequenties. Dit is vermoedelijk te wijten aan het beperkte aantal voertuigen binnen de gehanteerde methodologie. Er werden immers slechts 12 geluidsfragmenten gebruikt (3 voertuigen x 4 snelheden). De variatie in frequentiekenmerken was waarschijnlijk onvoldoende om een statistisch significant effect vast te stellen. Daarnaast zouden toekomstige studies de detectieafstand moeten onderzoeken in functie van het geluidsniveau dat het voertuig uitzendt binnen specifieke frequentiebanden, in plaats van de auditieve capaciteiten van de deelnemers als predictor te gebruiken. Dat vergt echter ook dat een groter aantal voertuigen in het onderzoek wordt opgenomen.

4.4.4 Subjectieve veiligheid

Na elke detectie werd aan de deelnemers gevraagd in te schatten of het voertuig effectief tijd zou hebben gehad om te stoppen vóór het hen zou bereiken. Het beantwoorden van deze vraag veronderstelt enerzijds een inschatting van de positie van het voertuig op het moment van detectie, en anderzijds een inschatting van de benodigde stopafstand. In besprekingen na het experiment gaven verschillende deelnemers aan dat deze taak zeer moeilijk was. De resultaten bevestigden dit. Hoewel de meerderheid van de antwoorden correct was, werd een aanzienlijk aantal fouten gemaakt. Wanneer het voertuig te laat werd gedetecteerd om nog te kunnen stoppen, maakten deelnemers in 41,5% van de gevallen een foutieve inschatting (zij antwoordden 'ja'). Dergelijke 'false positives' zouden in een reële verkeerssituatie gevaarlijk kunnen zijn, aangezien een persoon de rijbaan zou kunnen betreden terwijl de afstand tot het voertuig ontoereikend is.

Verdere analyses maakten het mogelijk om te bepalen onder welke omstandigheden deelnemers meer moeite hadden om correct in te schatten of het voertuig nog zou kunnen stoppen. Ten eerste blijkt omgevingslawaaï de taak complexer te maken. Ten tweede leken deelnemers bij lage snelheden het voertuig met verbrandingsmotor beter te kunnen inschatten dan het elektrische en hybride voertuig. Dit kan samenhangen met het feit dat deelnemers meer vertrouwd zijn met het geluid van traditionele voertuigen dan met het geluid van het AVAS-systeem.

Ten slotte wijzen de resultaten erop dat blinden en slechthzienden meer moeite hebben om correct te beoordelen of het voertuig nog kon stoppen. In het bijzonder werden enkele grote inschattingsfouten vastgesteld bij blinde of slechthziende deelnemers, die 'ja' antwoordden terwijl het voertuig al ruimschoots voorbij het punt was waarop stoppen nog mogelijk was. Deze gevallen deden zich uitsluitend voor in lawaaierige omgevingen. Een mogelijke verklaring is dat blinden en slechthzienden in deze specifieke gevallen

werden afgeleid door andere auditieve elementen in het geluidsfragment die voor de controlegroep minder storend waren (bv. stemmen, rateltickers...).

4.5 Beperkingen

Deze studie kent een aantal beperkingen en verbeterpunten die hier worden toegelicht.

Vooreerst, hoewel het experimentele design zo realistisch mogelijk werd opgezet, blijft het moeilijk om in te schatten in welke mate de resultaten uit een laboratoriumopstelling met hoofdteléfono kunnen worden veralgemeend naar reële omstandigheden op de openbare weg. Onze hypothese is dat bepaalde effecten mogelijk werden onderschat, in het bijzonder interactie-effecten tussen het voertuiggeluid en het omgevingsgeluid, aangezien de lawaaierige omgevingen afkomstig waren van afzonderlijke geluidsopnames die nadien werden samengevoegd. Niettemin menen wij dat de voorgestelde situatie realistisch blijft en dat de grote meerderheid van de resultaten betrouwbaar is.

Daarnaast moet worden benadrukt dat de problematiek van stille voertuigen sterk contextafhankelijk is. Geluid is een fysisch fenomeen dat zeer gevoelig is voor talrijke factoren (aard van het omgevingsgeluid, materialen die het geluid produceren zoals type wegdek of banden, maar ook de topografische configuratie van de omgeving). Het is onmogelijk om via één experiment alle mogelijke situaties te omvatten waarmee een persoon op de openbare weg geconfronteerd kan worden. Bovendien vertonen de gebruikte geluidsfragmenten onvermijdelijk specifieke kenmerken. Er werd gewerkt met een beperkt aantal voertuigen en geluidsomgevingen, en het is waarschijnlijk dat bepaalde specifieke eigenschappen van deze fragmenten invloed hebben gehad op de resultaten. Reproductie van dit type onderzoek is dan ook noodzakelijk om de hier gepresenteerde bevindingen te bevestigen. Niettemin sluiten de meeste resultaten aan bij wat op basis van de bestaande wetenschappelijke literatuur werd verwacht, wat het vertrouwen in de validiteit van de bevindingen versterkt. Toekomstig onderzoek zou dezelfde voertuigmodellen met verschillende aandrijvingen moeten vergelijken om het aantal beïnvloedende parameters te beperken.

De in deze studie onderzochte configuraties vertegenwoordigen bovendien slechts een deel van de situaties die een risico kunnen vormen voor kwetsbare weggebruikers. Deze studie focust op de situatie van een voetganger die een rijbaan oversteeft. De resultaten en interpretaties zijn van toepassing op deze context, hoewel er andere situaties bestaan waarin geluid een belangrijke rol speelt in de mobiliteit van kwetsbare weggebruikers (bv. conflicten met elektrische steps). In gedeelde ruimtes kunnen kwetsbare weggebruikers bijvoorbeeld gemakkelijk worden verrast door een voertuig dat van achteren nadert. Ook fietsers maken gebruik van voertuiggeluid om potentiële gevaren rondom zich waar te nemen zonder het hoofd te moeten draaien. Elk van deze situaties heeft specifieke kenmerken die niet binnen één enkele studie kunnen worden behandeld.

De uitgevoerde gehoortest is een verkorte en aangepaste versie van een bestaande test. Het doel was niet om een medisch oordeel te vellen over de auditieve capaciteiten van de deelnemer, maar om mogelijke zwaktes te detecteren en de validiteit van het experiment te waarborgen. De resultaten worden gebruikt als een globale schatting van de auditieve capaciteiten. De waargenomen variantie suggereert bovendien dat de test adequaat gekalibreerd was en geschikt voor gebruik in de analyses.

In een eerste versie van het experiment (uitgevoerd bij vijf blinde of slechtziende personen die niet tot de uiteindelijke steekproef behoren) werden niet aan de deelnemers gevraagd of het voertuig nog kon stoppen, maar luidde de vraag of zij op het moment van detectie zouden oversteken. In gesprekken achteraf bleek dat deze formulering een aanzienlijke vertekening introduceerde door persoonlijkheidskenmerken. Sommige deelnemers gaven aan altijd 'nee' te antwoorden omdat zij nooit zouden oversteken zodra zij een voertuig hoorden. Daarom werd de vraag herformuleerd om persoonlijkheidsgebonden bias zoveel mogelijk te beperken. Niettemin kan niet worden uitgesloten dat deze vertekening in mindere mate toch aanwezig bleef.

5 Conclusie

De risico's verbonden aan het stille karakter van elektrische en hybride voertuigen werden uitgebreid onderzocht en gedocumenteerd op het moment dat deze voertuigen gangbaar werden op de openbare weg. Deze studies tonen aan dat dergelijke voertuigen merkbaar minder geluid produceren, later worden gedetecteerd en moeilijker te lokaliseren zijn dan voertuigen met verbrandingsmotor, maar uitsluitend bij lage snelheden. Dit verschil verdwijnt boven een bepaalde snelheidsgrens (rond 30 km/u). De mogelijkheid voor een voetganger om een voertuig via geluid te detecteren hangt echter af van talrijke factoren, zoals het omgevingsgeluid, het type wegdek, de bandenspanning, de leeftijd van de voetganger, de topografie van de omgeving, en de positie en het traject van het voertuig ten opzichte van de voetganger. Afhankelijk van deze factoren kunnen voertuigen in het algemeen, maar in het bijzonder elektrische voertuigen, te laat worden gedetecteerd om kwetsbare weggebruikers in staat te stellen veilig te blijven, of zelfs helemaal niet worden waargenomen.

Deze bevindingen worden ondersteund door de bezorgdheden die werden geuit door de bevroegde blinde en slechtziende personen. Hoewel geen ernstige ongevallen werden gemeld (waarschijnlijk omdat elektrische voertuigen vooral bij lage snelheid moeilijk detecteerbaar zijn), bevestigden alle respondenten dat elektrische wagens een bron van stress vormen. Blinde en slechtziende personen worden regelmatig verrast door elektrische voertuigen die niet tijdig konden worden opgemerkt. Ook ongevallenstatistieken met stille voertuigen, hoewel beperkt in aantal, wijzen in dezelfde richting. Bovendien blijken deze voertuigen vaker betrokken te zijn bij ongevallen met kwetsbare weggebruikers.

Als antwoord op deze vaststellingen werd voornamelijk gekozen voor het toevoegen van een extra geluidsbron (via een luidspreker aan de voorzijde van het voertuig) om het gebrek aan motorgeluid te compenseren. Dit systeem staat bekend als 'AVAS' (Acoustic Vehicle Alerting System). In Europa is de installatie van een AVAS-systeem verplicht op alle nieuwe stille voertuigen sinds 2019. Het geproduceerde geluid moet voldoen aan een minimaal geluidsniveau tussen 0 en 20 km/u, inclusief bij het achteruitrijden. Talrijke studies hebben de effectiviteit van AVAS positief geëvalueerd en aangetoond dat het systeem het verschil in detecteerbaarheid met voertuigen met verbrandingsmotor reduceert of zelfs volledig wegneemt. Toch blijft duidelijk dat het AVAS-systeem nog beperkingen kent. De bevroegde blinde en slechtziende personen staan over het algemeen kritisch tegenover AVAS en wijzen in het bijzonder op het te lage geluidsvolume.

De experimenten in deze studie steunen op een beperkte steekproef van voertuigen en deelnemers, waardoor de conclusies met de nodige omzichtigheid moeten worden geïnterpreteerd. Niettemin bevestigen de resultaten in grote lijnen de effectiviteit van het AVAS-systeem. De elektrische en hybride voertuigen vertonen qua geluidsvermogen en detecteerbaarheid vergelijkbare resultaten als voertuigen met verbrandingsmotor, ook bij lage snelheden. Sommige bevindingen suggereren echter dat niet alle AVAS-systemen even performant zijn. Door de variatie in geluid, afhankelijk van de constructeur, vertonen bepaalde systemen akoestische kenmerken die hen effectiever lijken te maken dan andere. Vandaag draait de kernvraag dan ook niet langer om de relevantie van AVAS als dusdanig, maar om de concrete invulling ervan: welke vorm biedt het beste evenwicht tussen effectiviteit en geluidsbepijking. Toekomstig onderzoek moet verder uitklaren hoe AVAS optimaal kan worden geïntegreerd in het bestaande geluidslandschap en tegelijk detecteerbaar blijft zonder te leiden tot een algemene verhoging van het geluidsniveau. Gericht bijdragen vanuit disciplines zoals geluidsengeenieur en psychoakoestiek, met een groter aantal voertuigen en geluidsdesigns, kunnen hierbij waardevolle inzichten bieden.

Blinde en slechtziende personen behaalden globaal geen betere resultaten dan personen met een functioneel gezichtsvermogen. Toch lijkt de expertise die zij ontwikkelen door zich op geluid te oriënteren hen iets beter in staat te stellen voertuigen te detecteren bij hogere niveaus van omgevingslawaai. Zij zijn vermoedelijk beter in staat om verschillende geluidsbronnen van elkaar te onderscheiden. Daarnaast blijken zij zich comfortabeler te voelen bij het detecteren van voertuigen met verbrandingsmotor dan de controlegroep, maar niet noodzakelijk bij andere voertuigtypen. Hun kritiek op het AVAS-systeem kan dus gedeeltelijk voortkomen uit de moeilijkheid om dit geluid te herkennen en spontaan te associëren met een voertuig.

Ondanks de aanwezigheid van AVAS op de geteste voertuigen blijven de proporties niet-gedetecteerde voertuigen in de tests en de detectieafstanden relatief hoog. De tests werden uitgevoerd bij verschillende geluidsniveaus die overeenkomen met reële stedelijke situaties. In veel gevallen werden voertuigen niet tijdig gedetecteerd om de veiligheid van kwetsbare weggebruikers te waarborgen. Dit geldt echter in gelijke mate voor elektrische en hybride voertuigen met AVAS als voor voertuigen met verbrandingsmotor.

Op basis van deze resultaten lijkt het erop dat het geluidsniveau van voertuigen met verbrandingsmotoren in de loop der jaren is afgenomen (in overeenstemming met de regelgeving en consumentenverwachtingen), terwijl het omgevingsgeluid niet in dezelfde mate is gedaald. Hierdoor wordt het voor kwetsbare weggebruikers gevaarlijk om uitsluitend op geluid te vertrouwen. Blinde en slechtziende personen lijken weliswaar beter in staat om voertuigen te detecteren bij verhoogd omgevingslawaaï (waarschijnlijk door training), maar blijven algemeen kwetsbaar binnen deze problematiek. Bovendien detecteren personen met verminderde auditieve capaciteiten, al dan niet leeftijdsgebonden, voertuigen op aanzienlijk kortere afstand, wat hen bijzonder gevoelig maakt voor gevaarlijke situaties. Om de risico's, in het bijzonder voor de meest kwetsbare weggebruikers, te beperken, beveelt deze studie aan een verdere optimalisering van het reeds aanwezige akoestische waarschuwingssysteem op stille voertuigen. Deze evolutie omvat verschillende elementen: de gelijkmaking van het gebruikte geluid, een verhoging van het minimale geluidsniveau (binnen redelijke grenzen om bijkomende geluidsoverlast te vermijden) en een gerichte focus op frequenties die de detecteerbaarheid van deze voertuigen het meest verbeteren.

6 Aanbevelingen

6.1 AVAS

AVAS vormt vandaag het voornaamste antwoord op de problematiek van stille voertuigen. Op basis van de resultaten van deze studie en de bestaande wetenschappelijke kennis blijkt dat AVAS in het algemeen zijn effectiviteit heeft aangetoond. Het systeem vermindert immers, en in sommige gevallen neutraliseert het zelfs, het verschil in detecteerbaarheid tussen stille voertuigen en voertuigen met verbrandingsmotor (Berge, 2018; Hastings et al., 2011; M. Roan et al., 2017). Toch is duidelijk dat AVAS in zijn huidige vorm nog beperkingen vertoont en dat er op verschillende vlakken ruimte is voor verdere optimalisering.

AVAS bij stilstand

De verplichte activering van het AVAS-systeem bij stilstand (wanneer het voertuig ingeschakeld is en de versnellingspook niet in 'neutraal' staat) wordt momenteel op Europees niveau besproken. Op basis van de interviews met blinde en slechtziende personen zou deze maatregel een wezenlijke verbetering betekenen ten opzichte van het huidige AVAS-systeem. Een groot deel van de negatieve ervaringen die door de deelnemers werden beschreven, betreft situaties waarin een voertuig plots in beweging kwam en met hen in aanraking kwam. Wanneer AVAS pas wordt geactiveerd op het moment dat het voertuig effectief begint te rijden, laat dit onvoldoende reactietijd om een aanrijding te vermijden. Hoewel het doorgaans om lichte contacten gaat zonder fysieke gevolgen, dragen ze sterk bij tot het onveiligheidsgevoel bij blinde en slechtziende personen.

Snelheidsbereik van activering

Een voorstel dat momenteel op Europees niveau wordt besproken, betreft het uitbreiden van het snelheidsbereik waarin AVAS verplicht actief moet zijn, van 20 naar 30 km/u als bovengrens. De resultaten hierover zijn gemengd. Sommige studies geven aan dat het geluidsniveau van een elektrisch voertuig vanaf 20 km/u quasi vergelijkbaar is met dat van een voertuig met verbrandingsmotor. Andere studies vermelden een hogere snelheidsdrempel. In het experiment binnen deze studie was AVAS niet actief bij 30 km/u. Het is dan ook moeilijk om exact in te schatten in welke mate AVAS bij 30 km/u de detecteerbaarheid zou verbeteren. Anderzijds blijkt uit onze resultaten dat het aandeel voertuigen dat bij 30 km/u volledig onopgemerkt blijft, relatief laag is (ongeveer 5%). Toch blijft er een aanzienlijke proportie detecties die te laat plaatsvinden om het voertuig nog te laten stoppen. Het toevoegen van een bijkomende geluidsbron kan de detecteerbaarheid enkel verbeteren, maar de impact zal vermoedelijk beperkter zijn dan bij lagere snelheden, aangezien het rolgeluid bij 30 km/u reeds substantieel is. Een mogelijke piste is om het AVAS-volume te laten toenemen in functie van de snelheid van het voertuig. Dit kan echter leiden tot een aanzienlijke toename van geluidsoverlast in stedelijke gebieden, zeker waar de snelheidslimiet op 30 km/u is vastgelegd.

Geluidsdesign

Een terugkerende kritiek in de interviews met blinde en slechtziende personen betreft de grote variatie in kunstmatige geluiden die aan stille voertuigen worden toegevoegd. Het kost hen soms tijd om te herkennen dat het om een voertuiggerelateerd geluid gaat, omdat ze niet allemaal gekend zijn. Blinde en slechtziende personen lijken unaniem te pleiten voor een uniformisering van het AVAS-geluid, ook tussen verschillende constructeurs van stille voertuigen. Indien alle stille voertuigen een gelijkaardig geluid zouden produceren, zou dit blinde en slechtziende personen, maar ook andere weggebruikers, toelaten om dit specifieke geluid spontaan met een voertuig te associëren en automatische reacties te ontwikkelen. Het zou hen eveneens helpen om beter in te schatten hoe het geluid evolueert in functie van afstand en snelheid.

Een uniforme geluid zou bovendien toelaten om constructeurs te verplichten een AVAS-systeem te installeren waarvan de akoestische eigenschappen in de eerste plaats zijn afgestemd op effectiviteit. De huidige wetenschappelijke literatuur tracht immers te bepalen welke akoestische kenmerken het meest bevorderlijk zijn voor detecteerbaarheid, met een minimale bijkomende geluidshinder. Recente studies identificeren bijvoorbeeld frequentiebereiken die zich onderscheiden van het verkeerslawaai en die gemakkelijk waarneembaar zijn voor het menselijk oor, ook bij oudere personen. Het is daarom aangewezen om inzichten uit de fysica en de psychoakoestiek expliciet te integreren in het geluidsdesign van toekomstige AVAS-systemen. Minstens zou een verfijning van de regelgeving, met een expliciete nadruk op te versterken frequentiebanden (2–5 kHz), reeds een stap vooruit betekenen richting verbeterde effectiviteit.

Geluidshinder

Elke optimalisering van AVAS moet steeds worden afgewogen tegen de bijkomende geluidsoverlast die zij kan veroorzaken. Een algemene verhoging van het AVAS-volume is geen duurzame oplossing. De voorstellen die momenteel binnen UNECE worden besproken (amendementenreeks nr. 3) gaan trouwens in de richting van een verlaging van de maximaal toegelaten geluidsniveaus voor AVAS. De verdere ontwikkeling van AVAS moet passen binnen een bredere doelstelling om transportgerelateerde geluidsoverlast te reduceren. Bovendien zou een algemene daling van het omgevingsgeluid ook de effectiviteit van AVAS verhogen, aangezien uit deze studie blijkt dat omgevingslawaai de belangrijkste hinderpaal vormt voor de detectie van stille voertuigen.

In dit kader is het des te belangrijker om kennis uit de psychoakoestiek te benutten. Die kan helpen om een evenwicht te vinden tussen geluiden die enerzijds effectief en detecteerbaar zijn, maar anderzijds niet onaangenaam, schel of storend zijn en geen escalatie van geluid in de openbare ruimte veroorzaken. Adaptieve AVAS-systemen (waarbij het geluidsniveau wordt afgestemd op het omgevingsgeluid) vormen een piste die momenteel in de literatuur wordt onderzocht en die potentieel een belangrijke vooruitgang kan betekenen, mits een zorgvuldige afstemming.

Voordelen van akoestische oplossingen

In de interviews stonden alle deelnemers positief tegenover het AVAS-systeem. Geluidsgebaseerde oplossingen sluiten aan bij strategieën die blinde en slechtziende personen ontwikkelen om zich autonoom op de openbare weg te verplaatsen. Geluid is voor hen essentieel en dient niet enkel om aanrijdingen te vermijden. Het vormt een algemene informatiebron met talrijke functies: de omgeving mentaal in kaart brengen, zich oriënteren en veilig verplaatsen.

6.2 Sensibilisering

6.2.1 Sensibilisering van bestuurders

Uit de bevindingen van deze studie blijkt dat stille voertuigen specifieke kenmerken hebben die een aangepaste rijstijl vereisen in vergelijking met traditionelere voertuigen. Verschillende studies onderzochten de ervaring van bestuurders van elektrische voertuigen (Pardo & Misdariis, 2017). Zo bevroeg Hoogeveen (2010) bestuurders vóór, tijdens en na een testperiode van zes maanden met stille voertuigen. Daaruit bleek dat bestuurders hun rijgedrag aanpasten door risicosituaties beter te identificeren, zoals het verlaten van een parkeerplaats. Resultaten uit een specifieke bevraging bij bestuurders van elektrische voertuigen (Cocron et al., 2011) tonen aan dat twee derde van hen hun rijstijl aanpassen ten opzichte van een voertuig met verbrandingsmotor. Gelijkaardige bevindingen kwamen naar voren in een studie van Vias institute uit 2024 (Feys et al., 2024), waarin 68% van de respondenten aangaf een rustiger rijstijl te hanteren.

Een verhoogde sensibilisering van bestuurders van elektrische voertuigen over risicosituaties en over de aanwezigheid van blinde en slechtziende personen op de openbare weg kan dus bijdragen tot een betere bescherming van kwetsbare weggebruikers. Het zou bijvoorbeeld aangewezen zijn om specifieke elementen rond stille voertuigen op te nemen in de examens voor het rijbewijs.

6.2.2 Sensibilisering rond kwetsbare weggebruikers

Een van de geïnterviewde blinde personen organiseert regelmatig sensibiliseringssessies rond de uitdagingen waarmee blinde en slechtziende personen worden geconfronteerd. Deze persoon getuigde over de impact van dergelijke initiatieven en het effect dat hij of zij waarneemt bij deelnemers. Ook de Brailleliga plaatst sensibilisering jaarlijks bij haar prioritaire acties. Deze studie onderstreept het belang van het verder stimuleren van dergelijke sensibiliseringsinitiatieven, in het bijzonder binnen het domein van mobiliteit. De verkeersveiligheid kan enkel gebaat gaan bij een grotere bewustwording bij bestuurders van de diversiteit aan personen die zich op de openbare weg bevinden. Personen met een beperking: visueel, auditief, motorisch, cognitief, verplaatsen zich dagelijks en moeten volwaardig worden meegenomen in de manier waarop een voertuig wordt bestuurd, ongeacht of het stil of niet-stil is.

6.3 Snelheid in stedelijke zones

De resultaten van deze studie tonen aan dat voertuigen die 50 km/u rijden in stedelijke gebieden in de meerderheid van de gevallen op een te korte afstand worden waargenomen om nog tijdig tot stilstand te

kunnen komen. Detectie van voertuigen door kwetsbare weggebruikers gebeurt vaak auditief, hetzij omdat het voertuig zich buiten het gezichtsveld bevindt, hetzij omdat de persoon een visuele beperking heeft. Deze bevindingen vormen een bijkomend argument voor een snelheidsbeperking tot 30 km/u in een stedelijke context. Een dergelijke maatregel heeft een dubbel voordeel: enerzijds verkleint zij de remafstand die nodig is om een voertuig tot stilstand te brengen, waardoor kwetsbare weggebruikers een voertuig later kunnen detecteren zonder dat dit meteen onveilig wordt; anderzijds draagt zij bij tot een vermindering van de verkeersgerelateerde geluidsoverlast, wat een belangrijke impact heeft op de detectieafstanden.

6.4 Rateltickers

De resultaten benadrukken eveneens het belang van verkeerslichten uitgerust met een akoestisch signaal, in het bijzonder op grote stedelijke assen waar de snelheidslimiet 50 km/u blijft. Zoals aangegeven in de wetenschappelijke literatuur en bevestigd in het kwalitatieve luik van deze studie, doen problematische situaties met stille voertuigen zich vooral voor bij het oversteken van de rijbaan, in het bijzonder voor blinde en slechtziende personen. De complexiteit van dergelijke oversteekbewegingen neemt sterk toe aan kruispunten, waar voertuigen uit verschillende richtingen kunnen komen en geluidsbronnen zich vermengen. Volgens een bevraging van de Brailleliga uit 2023¹⁴, beschouwt 82,7% van de bevroegde blinde en slechtziende personen rateltickers als nuttig. Ook de deelnemers aan deze studie benadrukken de meerwaarde ervan en geven aan dat zij in hun trajectplanning bewust kiezen voor routes met akoestische signalisatie. Sommige kruispunten – bijvoorbeeld met meerdere, niet-gesynchroniseerde rijstroken of conflictvrije regelingen – zijn bijzonder moeilijk te interpreteren. Rateltickers lijken in dergelijke situaties een reële impact te hebben op het beperken van risico's voor blinde en slechtziende personen. De geïnterviewde deelnemers zijn dan ook voorstander van een ruimere toepassing van deze systemen.

6.5 Reductie van het globale geluidsniveau

De conclusies van deze studie moeten worden bekeken in het licht van de huidige geluidsniveaus op de openbare weg en de algemene geluidsoverlast. Stedelijke gebieden, ook in België, kampen met een hoge mate van geluidshinder, met directe negatieve gevolgen voor de gezondheid van bewoners. Geluidsoverlast heeft bovendien een directe en negatieve invloed op de verkeersveiligheid. Deze studie toont aan dat hoge omgevingsgeluidsniveaus de detectie van naderende voertuigen bemoeilijken voor kwetsbare weggebruikers, en in het bijzonder voor blinde en slechtziende personen. Het is daarom noodzakelijk om de huidige Europese oplossingen – die vaak gebaseerd zijn op het toevoegen van geluidsbronnen, zoals AVAS – af te wegen tegen beleidsmaatregelen die gericht zijn op het verminderen van het algemene omgevingsgeluid.

Hoewel AVAS-systemen effectief lijken in het reduceren van de risico's van stille voertuigen, is het tegelijk noodzakelijk om hun geluidsproductie te begrenzen en een evenwicht te zoeken om een escalatie van geluid in de openbare ruimte te vermijden. Een algemene daling van het geluidsniveau in de publieke ruimte zou bovendien de effectiviteit van dergelijke systemen verhogen. De elektrificatie van het wagenpark zou in principe moeten bijdragen tot een lager globaal geluidsniveau. Wegverkeer is echter niet de enige bron van omgevingsgeluid (denk aan vliegtuigen, bouwwerkzaamheden, sirenes ...). In de toekomst zouden deze andere bronnen het verkeersgeluid, dat op zich afneemt, relatief sterker kunnen maskeren, waardoor de auditieve informatie voor kwetsbare weggebruikers nog verder beperkt wordt.

6.6 Andere technologische oplossingen

6.6.1 Noodremassistentie

Nieuwe of recent ontwikkelde technologieën beogen het verminderen van aanrijdingen met kwetsbare weggebruikers. Een voorbeeld is de automatische noodrem, dit systeem kan botsingen vermijden, zelfs wanneer een kwetsbare weggebruiker het voertuig niet tijdig heeft gedetecteerd. Enkele geïnterviewde blinde personen vermeldten dit als een mogelijke oplossing en staan er positief tegenover.

¹⁴ <https://www.braille.be/nl/magazine/je-de-weg-terug-meester-maken>

6.6.2 V2P-systemen

Nieuwe technologische oplossingen zijn in ontwikkeling om kwetsbare weggebruikers vooraf te waarschuwen bij een dreigend aanrijdingsrisico. 'V2P' (Vehicle to Pedestrian) maakt gebruik van communicatie tussen een voertuig en een smartphone om een voetganger te waarschuwen dat een voertuig zich in zijn of haar richting begeeft. Dit systeem bevindt zich nog in ontwikkeling en werd reeds in enkele pilootstudies getest (Certad et al., 2025; Zhenyu et al., 2015). De primaire doelgroep van V2P-systemen zijn voetgangers met verdeelde aandacht (bijvoorbeeld door het gebruik van oortjes of een smartphone), maar dergelijke systemen kunnen ook relevant zijn voor blinde en slechtziende personen.

6.6.3 Beperkingen van technologische oplossingen

Deze systemen, die bedoeld zijn om dreigende aanrijdingen te vermijden, blijven een "laatste redmiddel" wanneer een risicosituatie niet tijdig kon worden voorkomen. Ze mogen preventieve maatregelen niet vervangen. Het inzetten van dit type technologie is in feite een noodoplossing zodra er al een ongevalsrisico is ontstaan. De prioriteit moet daarom liggen bij het voorkomen van risicosituaties stroomopwaarts, en dit vergt in de eerste plaats een aanpassing van het gedrag van weggebruikers.

7 Referenties

- Ashmead, D. H., Guth, D., Wall, R. S., Long, R. G., & Ponchillia, P. E. (2005). Street Crossing by Sighted and Blind Pedestrians at a Modern Roundabout. *Journal of Transportation Engineering*, 131(11), 812-821. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:11\(812\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:11(812))
- Ashmead, D. H., Wall, R. S., Ebinger, K. A., Eaton, S. B., Snook-Hill, M.-M., & Yang, X. (1998). Spatial Hearing in Children with Visual Disabilities. *Perception*, 27(1), 105-122. <https://doi.org/10.1068/p270105>
- Barton, B. K., Heath, G. E., & Lew, R. (2016). Detection and Direction Determination of Approaching Vehicle Noises Among Older Adults. *The International Journal of Aging and Human Development*, 82(2-3), 229-250. <https://doi.org/10.1177/0091415016632348>
- Barton, B. K., Ulrich, T. A., & Lew, R. (2012). Auditory detection and localization of approaching vehicles. *Accident Analysis & Prevention*, 49, 347-353. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.11.024>
- Berge, T. (2018). Experience and Perception of AVAS on Electric Vehicles in Norway. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 258(7), 233-243.
- Berge, T., & Haukland, F. (2019, september 30). *The concept of adaptive AVAS - results from a small test program* [Text]. Institute of Noise Control Engineering. <https://ince.publisher.ingentaconnect.com/contentone/ince/incecp/2019/00000259/00000009/art00056>
- Bright, T., Ramke, J., Zhang, J. H., Kitema, G. F., Safi, S., Mdala, S., Yoshizaki, M., Brennan-Jones, C. G., Mactaggart, I., & Gordon, I. (2023). Prevalence and impact of combined vision and hearing (dual sensory) impairment: A scoping review. *PLOS global public health*, 3(5), e0001905.
- Cai, Y. (2024a). Pedestrian auditory perception of approaching vehicles from behind in shared space: The impact of quietness of electric vehicles. *Transportation Research Procedia*, 78, 594-601. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.074>
- Cai, Y. (2024b). Pedestrian auditory perception of approaching vehicles from behind in shared space: The impact of quietness of electric vehicles. *Transportation Research Procedia*, 78, 594-601. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.074>
- Certad, N., Re, E. D., Varughese, J., & Olaverri-Monreal, C. (2025). *V2P Collision Warnings for Distracted Pedestrians: A Comparative Study with Traditional Auditory Alerts* (No. arXiv:2504.13906). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.13906>
- Cocron, P., Bühler, F., Franke, T., Neumann, I., & Krems, J. F. (2011). The silence of electric vehicles—blessing or curse. *Proceedings of the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 1-14. https://www.academia.edu/download/66468869/The_silence_of_electric_vehicles__blessi20210421-22626-1wdv3rx.pdf
- Dove, G., Fernando, A., Hertz, K., Kim, J., Rizzo, J.-R., Seiple, W. H., & Nov, O. (2022). Digital Technologies in Orientation and Mobility Instruction for People Who are Blind or Have Low Vision. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 6(CSCW2), 1-25. <https://doi.org/10.1145/3555622>
- Emerson, R. W., Kim, D. S., & Naghshineh, K. (2013). *Blind pedestrians and the impact of quieter vehicles on mobility decisions*.
- Emerson, R. W., Kim, D. S., Naghshineh, K., Pliskow, J., & Myers, K. (2011). Examining the Impact of “Quiet” Vehicles on the Performance of Orientation and Mobility Tasks by Pedestrians who are Blind. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 105(11), 745-759. <https://doi.org/10.1177/0145482X1110501104>
- Emerson, R. W., & Sauerburger, D. (2008). Detecting Approaching Vehicles at Streets with No Traffic Control. *Journal of visual impairment & blindness*, 102(12), 747.
- Feys, M., Nathan De Vos, & Freya Sloomans. (2024). *Étude sur l’impact des voitures électriques sur la sécurité routière en Belgique*.
- Garay-Vega, L., Hastings, A., Pollard, J. K., Zuschlag, M., & Stearns, M. (2010). *Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians: Phase 1*. United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety

- Garay-Vega, L., Hastings, A., Pollard, J. K., Zuschlag, M., Stearns, M. (Mary D.), & John A. Volpe National Transportation Systems Center (U.S.). (2010). *Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians: Phase 1*. (No. DOT HS 811 304). <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/9474>
- Gates, G. A., & Mills, J. H. (2005). Presbycusis. *The Lancet*, 366(9491), 1111-1120. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)67423-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)67423-5)
- Glaeser, K.-P., Marx, T., & Schmidt, E. (2012). *Sound detection of electric vehicles by blind or visually impaired persons*.
- Guth, D. A., Hill, E. W., & Rieser, J. J. (1989). Tests of Blind Pedestrians' Use of Traffic Sounds for Street-crossing Alignment. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 83(9), 461-468. <https://doi.org/10.1177/0145482X8908300910>
- Guth, D., Ashmead, D., Long, R., Wall, R., & Ponchillia, P. (2005). Blind and Sighted Pedestrians' Judgments of Gaps in Traffic at Roundabouts. *Human Factors*, 47(2), 314-331. <https://doi.org/10.1518/0018720054679533>
- Hartmann, W. M. (1999). How We Localize Sound. *Physics Today*, 52(11), 24-29.
- Hassan, S. E. (2012). Are Normally Sighted, Visually Impaired, and Blind Pedestrians Accurate and Reliable at Making Street Crossing Decisions? *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 53(6), 2593-2600. <https://doi.org/10.1167/iovs.11-9340>
- Hastings, A., Pollard, J. K., Garay-Vega, L., Stearns, M. (Mary D.), & Guthy, C. (2011). *Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians, Phase 2: Development of Potential Specifications for Vehicle Countermeasure Sounds*. (No. DOT-VNTSC-NHTSA-11-04). <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/9475>
- Hoogeveen, L. V. J. (2010). Road traffic safety of silent electric vehicles. *Onderzoeksthesis, Universiteit Utrecht*.
- Iversen, L. M., Marbjerg, G., & Bendtsen, H. (2013). *Noise from electric vehicles – 'state-of-the-art' literature survey*.
- Kim, D. S., Emerson, R. W., Naghshineh, K., Pliskow, J., & Myers, K. (2012). Vehicle surge detection and pathway discrimination by pedestrians who are blind: Effect of adding an alert sound to hybrid electric vehicles on performance. *The British journal of visual impairment*, 30(2), 61-78. <https://doi.org/10.1177/0264619612443950>
- Kolarik, A. J., Cirstea, S., Pardhan, S., & Moore, B. C. J. (2014). A summary of research investigating echolocation abilities of blind and sighted humans. *Hearing Research*, 310, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2014.01.010>
- Konet, H., Sato, M., Schiller, T., Christensen, A., Tabata, T., & Kanuma, T. (2011). Development of Approaching Vehicle Sound for Pedestrians (VSP) for Quiet Electric Vehicles. *SAE International Journal of Engines*, 4(1), 1217-1224.
- Kujala, T., Alho, K., Huottilainen, M., Ilmoniemi, R. J., Lehtokoski, A., Leinonen, A., Rinne, T., Salonen, O., Sinkkonen, J., Standertskjöld-Nordenstam, C. -G., & Näätänen, R. (1997). Electrophysiological evidence for cross-modal plasticity in humans with early- and late-onset blindness. *Psychophysiology*, 34(2), 213-216. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb02134.x>
- Leclerc, C., Saint-Amour, D., Lavoie, M. E., Lassonde, M., & Lepore, F. (2000). Brain functional reorganization in early blind humans revealed by auditory event-related potentials. *Neuroreport*, 11(3), 545-550.
- Lessard, N., Paré, M., Lepore, F., & Lassonde, M. (1998). Early-blind human subjects localize sound sources better than sighted subjects. *Nature*, 395(6699), 278-280. <https://doi.org/10.1038/26228>
- Liu, S., Fitzharris, M., Oxley, J., & Edwards, C. (2018). *The impact of electric/hybrid vehicles and bicycles on pedestrians who are blind or have low vision* (Australia) [Report]. Vision Australia. <https://apo.org.au/node/197121>
- Martinez-Carranza, J., & Rascon, C. (2020). A Review on Auditory Perception for Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*, 20(24), 7276. <https://doi.org/10.3390/s20247276>

- Matijevic, D., & Popovic, V. (2017). Overview of modern contributions in vehicle noise and vibration refinement with special emphasis on diagnostics. *FME Transaction*, 45(3), 448-458. <https://doi.org/10.5937/fmet1703448M>
- McDonald, J. J., Teder-Sälejärvi, W. A., & Hillyard, S. A. (2000). Involuntary orienting to sound improves visual perception. *Nature*, 407(6806), 906-908. <https://doi.org/10.1038/35038085>
- Mendonça, C., Freitas, E., Ferreira, J. P., Raimundo, I. D., & Santos, J. A. (2013). Noise abatement and traffic safety: The trade-off of quieter engines and pavements on vehicle detection. *Accident Analysis & Prevention*, 51, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.10.018>
- Münzel, T., Sørensen, M., & Daiber, A. (2021). Transportation noise pollution and cardiovascular disease. *Nature Reviews Cardiology*, 18(9), 619-636. <https://doi.org/10.1038/s41569-021-00532-5>
- OMS. (2019). *Rapport mondial sur la vision*. <https://www.who.int/fr/publications/i/item/9789241516570>
- OMS. (2020). *Rapport mondial sur l'audition*. https://www.google.com/search?q=oms+rapport+sur+l%27audition&rlz=1C1GCEA_enBE1124BE1124&oq=oms+rapport+sur+l%27audition&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIICAEQABgWGB4yBwgCEAAAY7wUyCg gDEAAAYogQYiQUyBwgEEAAAY7wUyBwgFEAAAY7wXSAQg2ODYzajBqMagCALACAA&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- Oxley, J. A., Ihlen, E., Fildes, B. N., Charlton, J. L., & Day, R. H. (2005). Crossing roads safely: An experimental study of age differences in gap selection by pedestrians. *Accident Analysis & Prevention*, 37(5), 962-971. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.04.017>
- Pardo, L.-F., & Misdariis, N. (2017). Le silence du véhicule électrique – Problèmes et solutions. *Acoustique et Techniques : trimestriel d'information des professionnels de l'acoustique*. <https://hal.science/hal-01708880>
- Paré, S., Bleau, M., Djerourou, I., Malotau, V., Kupers, R., & Ptito, M. (2021). Spatial navigation with horizontally spatialized sounds in early and late blind individuals. *PLOS ONE*, 16(2), e0247448. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247448>
- Pliskow, J., Naghshineh, K., Emerson, R. W., Kim, D., & Myers, K. (2011). *Detection of Hybrid and Quiet Vehicles by Blind and Visually Impaired Pedestrians* (SAE Technical Paper Nos. 2011-01-1725). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1725>
- Roan, M. J., Neurauter, L., Tech, V., Moore, D., & Glaser, D. (2017). *Assessing the Ability of Pedestrians to Safely Hear Approaching Electric Vehicles*.
- Roan, M., Neurauter, M. L., Moore, D., & Glaser, D. (2017). Electric Vehicle Detectability: A Methods-Based Approach to Assess Artificial Noise Impact on the Ability of Pedestrians to Safely Detect Approaching Electric Vehicles. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 1(2), Article 2017-01-1762. <https://doi.org/10.4271/2017-01-1762>
- Roberts, I., Norton, R., Jackson, R., Dunn, R., & Hassall, I. (1995). Effect of environmental factors on risk of injury of child pedestrians by motor vehicles: A case-control study. *BMJ: British Medical Journal*, 310(6972), 91-94. <https://doi.org/10.1136/bmj.310.6972.91>
- Schneider, J. M., Gopinath, B., McMahon, C. M., Leeder, S. R., Mitchell, P., & Wang, J. J. (2011). Dual Sensory Impairment in Older Age. *Journal of Aging and Health*, 23(8), 1309-1324. <https://doi.org/10.1177/0898264311408418>
- Sivaraj, D., Dutta, S., Hemanth Kumar, S., & Venkata Sai Jogarao, D. (2023). Design of Adaptive Artificial Vehicle Acoustic System (AVAS) for an Electric Vehicle. In S. Dwivedi, S. Singh, M. Tiwari, & A. Shrivastava (Eds.), *Flexible Electronics for Electric Vehicles* (pp. 559-567). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0588-9_55
- Soares, F., Silva, E., Pereira, F., Silva, C., Sousa, E., & Freitas, E. (2020). The Influence of Noise Emitted by Vehicles on Pedestrian Crossing Decision-Making: A Study in a Virtual Environment. *Applied Sciences*, 10(8), 2913. <https://doi.org/10.3390/app10082913>

- Soares, F., Silva, E., Pereira, F., Silva, C., Sousa, E., & Freitas, E. (2021). To cross or not to cross: Impact of visual and auditory cues on pedestrians' crossing decision-making. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 82, 202-220. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.08.014>
- Stansfeld, S. A., & Matheson, M. P. (2003). Noise pollution: Non-auditory effects on health. *British Medical Bulletin*, 68(1), 243-257. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg033>
- Steinbach, L., Atamer, S., & Altinsoy, E. (2017). Evaluation of electric vehicle sounds, new concepts regarding speed-dependency and prediction of the warning effect. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 30(1), 040006. <https://doi.org/10.1121/2.0000567>
- Stelling-Kończak, A., Hagenzieker, M., Commandeur, J. J., Agterberg, M. J., & van Wee, B. (2016). Auditory localisation of conventional and electric cars: Laboratory results and implications for cycling safety. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 41, 227-242.
- van Blokland, G., & Peeters, B. (2009). *Modeling the noise emission of road vehicles and results of recent experiments*.
- Wall Emerson, R., Kim, D. S., Naghshineh, K., Pliskow, J., & Myers, K. (2013). Detection of Quiet Vehicles by Blind Pedestrians. *Journal of Transportation Engineering*, 139(1), 50-56. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000478](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000478)
- Wall, R. S., Ashmead, D. H., Bentzen, B. L., & Barlow, J. (2004). Directional guidance from audible pedestrian signals for street crossing. *Ergonomics*, 47(12), 1318-1338. <https://doi.org/10.1080/00140130410001712609>
- Wasano, K., Kaga, K., & Ogawa, K. (2021). Patterns of hearing changes in women and men from denarians to nonagenarians. *The Lancet Regional Health - Western Pacific*, 9, 100131. <https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2021.100131>
- Wiener, W. R., Lawson, G., Naghshineh, K., Brown, J., Bischoff, A., & Toth, A. (1997). The Use of Traffic Sounds to Make Street Crossings by Persons who are Visually Impaired. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 91(5), 435-445. <https://doi.org/10.1177/0145482X9709100504>
- Wu, J., Austin, R., & Chen, C.-L. (2011). *Incidence Rates of Pedestrian And Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles: An Update* (No. HS-811 526). Article HS-811 526. <https://trid.trb.org/View/1128262>
- Yamauchi, K. (2014). *A discussion on the problem of quietness of hybrid and electric vehicles and additional warning sound for these vehicles*.
- Yamauchi, K., Sano, T., Hasegawa, S., Tamura, F., & Takeda, Y. (2014). *Detectability and hearing impression of additional warning sounds for electric or hybrid vehicles*.
- Zhenyu, L., Lin, P., Konglin, Z., & Lin, Z. (2015). Design and evaluation of V2X communication system for vehicle and pedestrian safety. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 22(6), 18-26. [https://doi.org/10.1016/S1005-8885\(15\)60689-6](https://doi.org/10.1016/S1005-8885(15)60689-6)
- 1998 Agreement on UN Global Technical Regulations (UN GTRs). (1998). Geraadpleegd op 22 april 2024, op <https://unece.org/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29glob/globale.pdf>
- E/ECE/TRANS/505/Rev.3. (2017, Oktober 20). *Agreement*. Geraadpleegd op 22 april 2024, op <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2017/E-ECE-TRANS-505-Rev.3e.pdf>
- UNECE. (s.d.). *Working Party on Noise and Tyres - Introduction*. Geraadpleegd op 22 april 2024, op UNECE: <https://unece.org/transportvehicle-regulations/working-party-noise-and-tyres-introduction>
- UNECE. (s.d.). *WP.29 - Introduction*. Geraadpleegd op 22 april 2024, op UNECE: <https://unece.org/wp29-introduction>
- Verordening (EU) Nr. 540/2014 van het Europees Parlement en de Raad van 16 april 2014. (2014, mei 27). Consulté le April 24, 2024, op <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0540>

Verordening EU Nr.540/2014 van het Europees Parlement en de Raad van 16 april 2014, bijlage VIII. (2014, mei). *Publicatieblad van de Europese Unie*. Geraadpleegd op 22 april 2024, op <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0540>

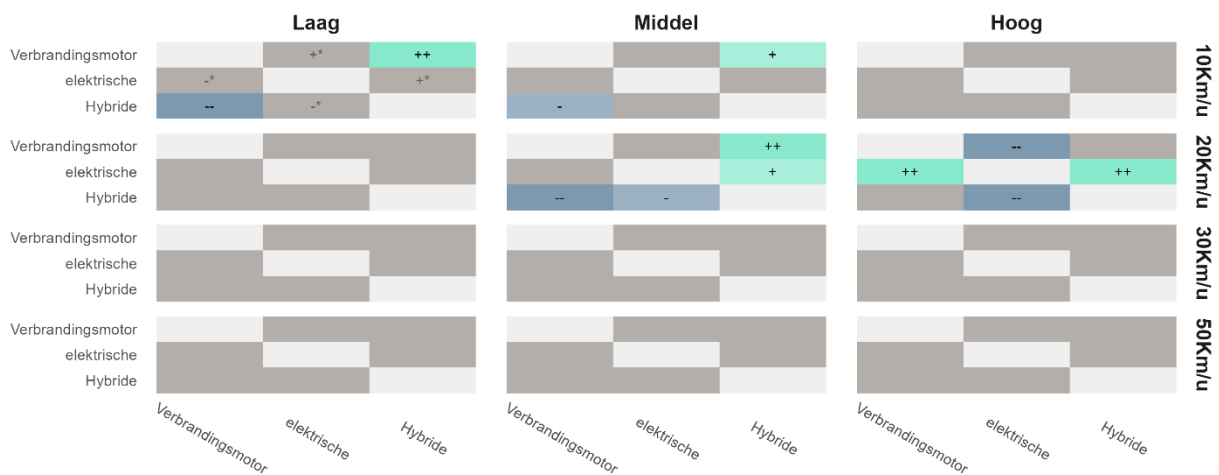
Working paper No. QRTV-01-02. (2010, February 15). *Terms of Reference and Rules of Procedure for the GRB informal group on Quiet Road Transport Vehicles (QRTV)*. Geraadpleegd op 22 april 2024, op <https://unece.org/DAM/trans/doc/2010/wp29grb/QRTV-01-02e.pdf>

8 Bijlage

Experimentele studie – significante verschillen

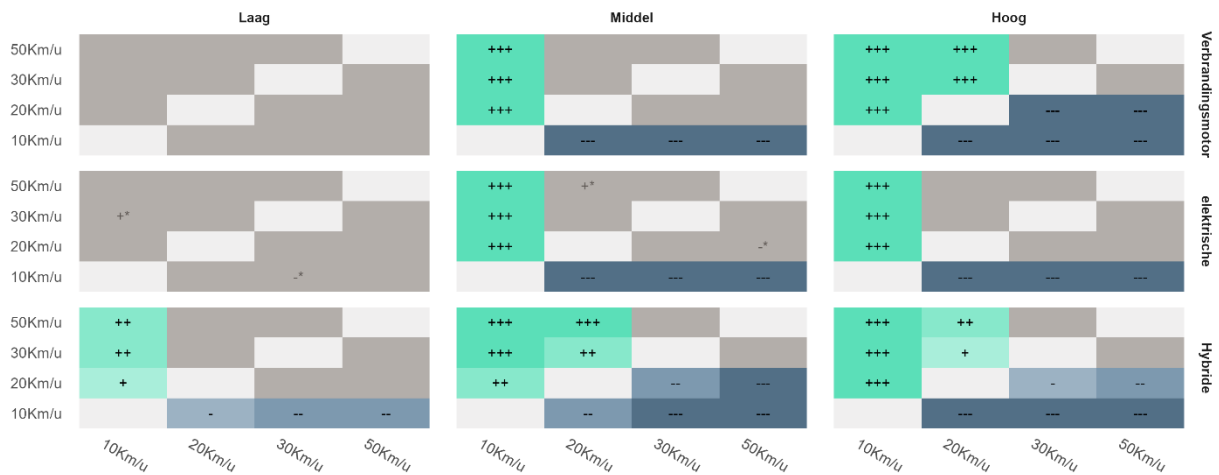
- +++ / --- : $p < 0,001$
- ++ / -- : $p < 0,01$
- + / - : $p < 0,05$
- +* / -* : $p < 0,1$ (marginaal verschil)

Proportie gemiste passages – vergelijking per type voertuig



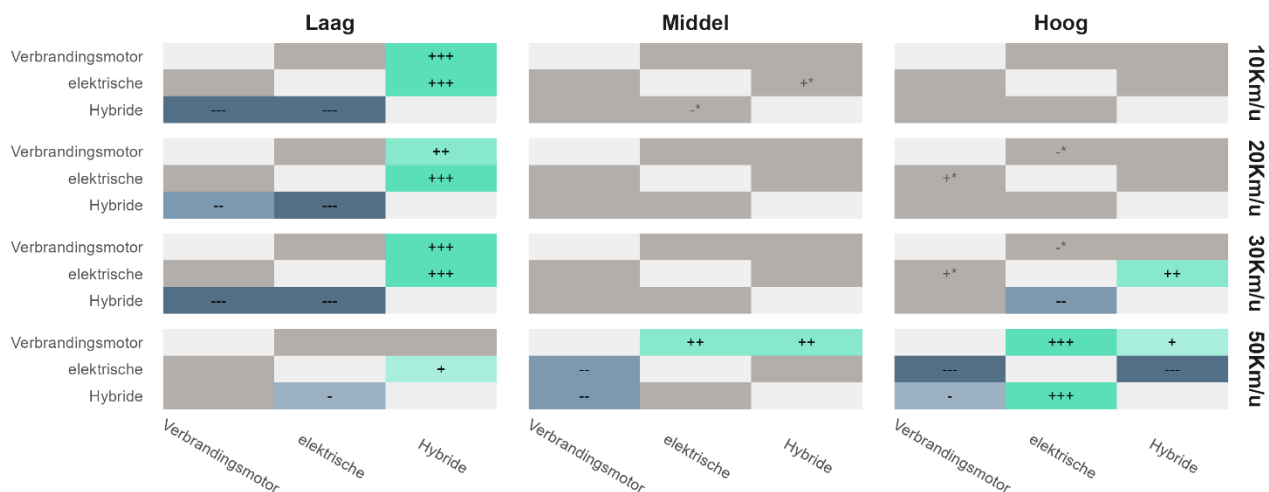
Een positief verschil duidt op een grotere kans om het voertuig te detecteren (betere detecteerbaarheid).

Proportie gemiste passages – vergelijking per snelheid



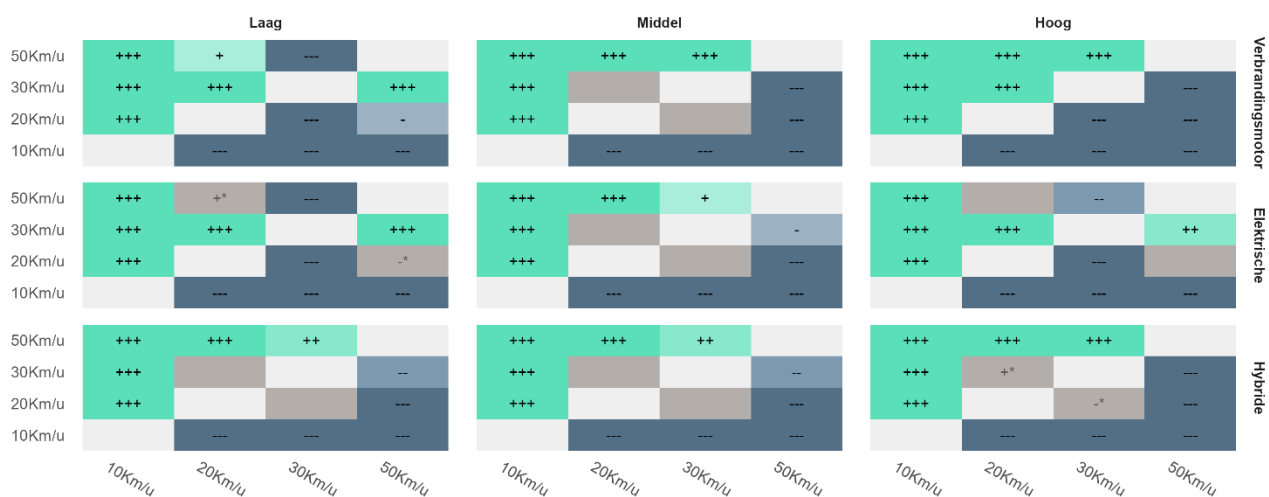
Een positief verschil duidt op een grotere kans om het voertuig te detecteren (betere detecteerbaarheid).

Detectieafstanden – vergelijking per type voertuig



Een positief verschil duidt op een grotere detectieafstand (betere detecteerbaarheid).

Detectieafstanden – vergelijking per snelheid



Een positief verschil duidt op een grotere detectieafstand (betere detecteerbaarheid).



Vias institute

Haachtsesteenweg 1405
1130 Brussel

+32 2 244 15 11

info@vias.be

www.vias.be