

Veiligheidseffecten van geavanceerde rijhulpsystemen (ADAS)

R-2024-16

SWOV



Auteurs



Dr. K.N. de Winkel

Ongevallen **voorkomen**
Letsel **beperken**
Levens **redden**

Documentbeschrijving

Rapportnummer: R-2024-16

Titel: Veiligheidseffecten van geavanceerde rijhulpsystemen (ADAS)

Auteur(s): Dr. K.N. de Winkel

Projectleider: Dr. K.N. de Winkel

Projectnummer SWOV: E24.14

Projectcode opdrachtgever: 31200974

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat

Projectinhoud: Dit rapport gaat in op de vraag wat er bekend is over de impact van geavanceerde rijhulpsystemen op de verkeersveiligheid (in Nederland). Om deze vraag te beantwoorden, is een inventaris gemaakt van ADAS-systemen, synoniemen en acroniemen en is naar relevante kwantitatieve informatie gezocht in wetenschappelijke artikelen en rapporten. De verkregen resultaten zijn gepresenteerd in tabellen met geschatte veiligheidseffecten van individuele ADAS en van ADAS-combinaties.

Aantal pagina's: 51

Fotografen: Andrey Popov (omslag) – Paul Voorham (portret)

Uitgave: SWOV, Den Haag, 2024

**De informatie in deze publicatie is openbaar.
Overname is toegestaan met bronvermelding.**

SWOV – Instituut voor Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid

Henri Faasdreef 312, 2492 JP Den Haag

070 – 317 33 33 – info@swov.nl – www.swov.nl

 [@swov_nl](https://twitter.com/swov_nl) / [@swov](https://twitter.com/swov)  [linkedin.com/company/swov](https://www.linkedin.com/company/swov)

Samenvatting

Rijkswaterstaat vroeg SWOV om onderzoek te doen naar de vraag: wat is de impact van geavanceerde rijhulpsystemen (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS), zoals Lane Keep Assist (LKA), Adaptive Cruise Control (ACC) en Autonomous Emergency Braking (AEB), op verkeersveiligheid? Dat hebben we gedaan door een overzicht te geven van kwantitatieve data over verschillen in ongevallencijfers tussen voertuigen mét en zonder ADAS, grotendeels gebaseerd op daadwerkelijke ongevallencijfers. Het onderzoek dient als input voor de *Monitor Smart Mobility 2025*.

De vraag die centraal staat in dit onderzoek is: *Wat is er bekend over de impact van ADAS op verkeersveiligheid (in Nederland)?* Om deze vraag te beantwoorden, hebben we (1) een inventaris gemaakt van ADAS-systemen, synoniemen en acroniemen. Aan de hand van deze lijst is (2) naar relevante kwantitatieve informatie gezocht in wetenschappelijke artikelen en rapporten. In deze literatuur is gezocht naar cijfers over het aantal ongevallen dat voorkomen kan worden wanneer individuele ADAS in een voertuig aanwezig zijn. Sommige van de gevonden cijfers gelden voor specifieke soorten ongevallen of voor bepaalde groepen slachtoffers. In die gevallen zijn (3) de cijfers gegeneraliseerd door te corrigeren voor het aandeel van dat soort groepen op het totaal. Hiervoor vergeleken we twee correctiemethoden. De zo verkregen cijfers zijn (4) gepresenteerd in tabellen en nader beschouwd in discussie.¹

Er zijn in totaal 27 bronnen geraadpleegd, waaronder 18 wetenschappelijke artikelen en 9 overige rapporten, die respectievelijk goed waren voor 61 en 50 datapunten. We maken onderscheid tussen individuele ADAS en combinaties van ADAS. Individuele ADAS zijn gegroepeerd in de functionele categorieën Longitudinale controle (bijvoorbeeld ACC, AEB), Laterale controle (bijvoorbeeld LKA, Lane Departure Warning, LDW), Monitoring: omgeving, bestuurder en voertuig, en Informatiesystemen. Combinaties van ADAS zijn ingedeeld volgens de automatiseringsniveaus van de Society of Automotive Engineers (SAE).

Onder individuele ADAS zijn de grootste voordelige effecten op ongevallencijfers te zien voor Forward Collision Warning (FCW; mediaan (i.e., de middelste score van de verzamelde cijfers): -12% of -13,2%, afhankelijk van correctiemethode) en Automatic Emergency Braking (AEB; -10,7% of -11,8%), die respectievelijk een bestuurder waarschuwen of ingrijpen bij een dreigende botsing. Op plek drie komen Driver Monitoring Systems (DMS), die (onder andere) vermoeidheid en afleiding monitoren (-10%). In een aantal onderzoeken zijn nadelige effecten gevonden voor individuele ADAS. Adaptive Cruise Control (ACC) en gewone Cruise Control (CC) tonen inconsistente resultaten, waaronder nadelige effecten op het aantal ongevallen.

Combinaties van ADAS die onder het laagste automatiseringsniveau vallen, dat wil zeggen systemen die andere taken vervullen dan uitvoering van longitudinale/laterale controle (SAE Level 0: No Driving Automation – geen aanhoudende automatische longitudinale/laterale controle), presteren in een aantal individuele gevallen iets beter dan de afzonderlijke systemen,



1. Van de belangrijkste bevindingen is een apart overzicht verschenen: Winkel, K.N. de (2024). *Veiligheidseffecten van ADAS samengevat; Overzicht effecten van geavanceerde rijhulpsystemen*, R-2024-16A. SWOV, Den Haag.

hoewel de effecten niet eenvoudig optellen. Ter illustratie, de combinatie van FCW en AEB zorgt voor verbetering van 1% ten opzichte van het beste onderdeel FCW (namelijk -13,1% of -14,4%). Voor hogere automatiseringsniveaus, mét longitudinale en/of laterale controlesystemen (SAE Level 1: Driver Assistance en level 2: Partial Automation) zijn de bevindingen gemengd: voor Level 1 (-11,5% of -12,2%) is een verbetering te zien ten opzichte van Level 0 (-1,4% of -2,0%), maar voor Level 2 is het effect aanzienlijk kleiner dan dat van level 1 (-5,2% of -5,9%).

Samenvattend: hoewel de hoeveelheid beschikbare cijfers, en daarmee de betrouwbaarheid van bevindingen, beperkt is, geven de cijfers die zijn gevonden een overwegend positief beeld van de veiligheidseffecten van individuele ADAS. Voor combinaties van ADAS zijn de effecten wisselend. Hoewel ook verbeteringen van de verkeersveiligheid worden gerapporteerd voor de meeste combinaties, zijn de cijfers minder positief dan voorspeld vanuit theorie. Dit kan enerzijds te maken hebben met systemen die redundant zijn, in de zin dat ze functioneren in dezelfde situaties en dezelfde ongevallen voorkomen, en anderzijds met onvoorziene negatieve effecten. Bestuurders kunnen bijvoorbeeld te veel vertrouwen stellen in de technologie ('overtrust') wat leidt tot onvoldoende aandacht voor de rijtaak, of juist te weinig vertrouwen ('undertrust') wat ertoe leidt dat ze ADAS niet gebruiken, waardoor potentieel voordelige effecten zich niet voordoen.

De resultaten van dit onderzoek dienen als een momentopname te worden gezien: het is aannemelijk dat toekomstige iteraties de huidige beperkingen van ADAS zullen overwinnen en dat de veiligheidsbevorderende effecten verder zullen verbeteren.

Het is aan te bevelen om de effecten van ADAS te blijven monitoren en evalueren in de praktijk, om zo beter inzicht en meer zekerheid te verkrijgen over zowel de voordelen als de mogelijke nadelige effecten.

Summary

Safety effects of advanced driver assistance systems (ADAS)

Rijkswaterstaat asked SWOV to research the road safety impact of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), such as Lane Keep Assist (LKA), Adaptive Cruise Control (ACC) and Autonomous Emergency Braking (AEB). For this purpose, we provided an overview of quantitative data on differences in crash rates between vehicles with and without ADAS, largely based on actual crash rates. The research serves as input for the Monitor Smart Mobility 2025.

The question central to this study is: *What is known about the impact of ADAS on road safety (in the Netherlands)?* To answer this question, we (1) made an inventory of ADAS, synonyms and acronyms. Using this list, we (2) searched for relevant quantitative information in scientific articles and reports. This literature was searched for figures on the number of crashes that could be prevented if individual ADAS were present in a vehicle. Some of the figures found apply to specific types of crashes or to certain groups of casualties. In those cases (3), the figures were generalised by correcting them for the share of these groups to the total. In order to achieve this, we compared two correction methods. The figures thus obtained are (4) presented in tables and considered in more detail in the discussion of the results.

A total of 27 sources were consulted, including 18 scientific articles and 9 reports, accounting for 61 and 50 data points, respectively. We distinguish between individual ADAS and combinations of ADAS. Individual ADAS are grouped into the functional categories Longitudinal control (e.g. ACC, AEB), Lateral control (e.g. LKA, Lane Departure Warning, LDW), Monitoring: environment, driver and vehicle, and Information systems. Combinations of ADAS are classified according to the automation levels of the Society of Automotive Engineers (SAE).

Among individual ADAS, the greatest beneficial effects on crash rates are seen for *Forward Collision Warning* (FCW; median: -12% or -13.2%, depending on correction method) and *Automatic Emergency Braking* (AEB; -10.7% or -11.8%), which respectively warn a driver or intervene in the event of an imminent collision. In third place are *Driver Monitoring Systems* (DMS), which monitor (among other things) fatigue and distraction (-10%). A number of studies have found adverse effects for individual ADAS. *Adaptive Cruise Control* (ACC) and ordinary *Cruise Control* (CC) show inconsistent results, including adverse effects on crash rate.

Combinations of ADAS that in the lowest level of automation, i.e. systems that perform tasks other than execution of longitudinal/lateral control (SAE Level 0: *No Driving Automation* - no sustained automatic longitudinal/lateral control), perform slightly better than the separate systems in some individual cases, although the effects are not simply additive. To illustrate, the combination of FCW and AEB provides a 1% improvement over FCW as the single automated system (i.e. -13.1% or -14.4%). For higher levels of automation, with sustained longitudinal and/or lateral control systems (SAE Level 1: *Driver Assistance* and level 2: *Partial Automation*), the findings are mixed: for Level 1 (-11.5% or -12.2%), an improvement can be seen compared to

Level 0 (-1.4% or -2.0%), but for Level 2, the effect is considerably smaller than that of Level 1 (-5.2% or -5.9%).

In summary, although the number of available figures, and thus the reliability of findings, is limited, the figures that were found present a predominantly positive picture of the safety effects of individual ADAS. For combinations of ADAS, the effects vary. Although road safety improvements are also reported for most combinations, the figures are less positive than theoretically predicted. This may be partly due to systems being redundant, in the sense that they function in the same situations and prevent the same crashes, and partly due to unforeseen adverse effects. For example, drivers may put too much trust in the technology (*overtrust*) leading to insufficient attention to the driving task, or, by contrast, too little trust (*undertrust*) leading to disuse, so that potentially positive effects do not materialise.

The results of this study should be seen as a snapshot: it is likely that future iterations will overcome the current limitations of ADAS and further improve the safety-enhancing effects.

It is recommended to continue monitoring and evaluating the effects of ADAS in practice, in order to gain a better understanding and more certainty about both the benefits and possible adverse effects.

Inhoud

Voorwoord	10
Gebruikte afkortingen	11
1 Inleiding	12
1.1 Achtergrond	12
2 Methode	14
2.1 Literatuuronderzoek	14
2.1.1 Zoekopdracht	15
2.2 Classificatie van individuele ADAS	16
2.3 Combinaties van ADAS	16
2.4 Effecten van ADAS	17
2.4.1 Accuratesse	17
2.4.2 Gedragsadaptatie	18
2.4.3 Randvoorwaarden	18
2.4.4 Technologische gereedheid	18
2.4.5 Veiligheidsimpact	18
3 Individuele ADAS	20
3.1 Longitudinale Controle	20
3.1.1 Cruise Control (CC)	20
3.1.2 Adaptive Cruise Control (ACC)	21
3.1.3 Speed Limit Information Function (SLIF)	21
3.1.4 Intelligent Speed Assistance (ISA)	22
3.1.5 Speed Control Function (SCF)	22
3.1.6 Forward Collision Warning (FCW)	22
3.1.7 Autonomous Emergency Braking (AEB)	23
3.1.8 Rear Automatic Braking (RAB)	23
3.2 Laterale Controle	24
3.2.1 Lane Departure Warning (LDW)	24
3.2.2 Lane Keep Assist (LKA)	24
3.2.3 Emergency Lane Keeping (ELK)	24
3.2.4 Lane Centering (LC)	25
3.2.5 Autonomous Emergency Steering (AES)	25
3.3 Monitoring: omgeving	25
3.3.1 Vulnerable Road User (VRU) Detection	25
3.3.2 Curve Speed Warning (CSW)	26
3.3.3 Road Edge Detection (RED)	26
3.3.4 Traffic Sign Recognition (TSR)	26

3.3.5	Surround Vision (SV)	26
3.3.6	Blind Spot Warning (BSW)	27
3.3.7	Assisted Parking (AP)	27
3.3.8	Rear Collision Warning (RCW)	27
3.4	Monitoring: inzittenden	28
3.4.1	Driver Monitoring Systems (DMS)	28
3.4.2	Alcohol Lock (AL)	28
3.5	Monitoring: voertuig	29
3.5.1	Post-Collision Braking (PCB)	29
3.5.2	Tire Pressure Monitoring System (TPMS)	29
3.5.3	Adaptive Headlights (AH)	29
3.6	Informatiesystemen	30
3.6.1	Navigation Systems (NAV)	30
3.6.2	Traffic Information Systems (TIS)	30
3.7	Overzichtswaergave	30
4	Combinaties van ADAS	34
4.1	SAE Level 0 – combinaties van ADAS	34
4.1.1	LDW×LKA	34
4.1.2	FCW×AEB	35
4.2	SAE Level 1 – laterale óf longitudinale controle	35
4.2.1	Laterale controle	35
4.2.2	Longitudinale controle	35
4.3	SAE Level 2 – laterale én longitudinale controle	36
4.3.1	Automatic Parking (AUP)	36
4.3.2	Partial Driving Automation (L2)	36
4.4	Verwachtingen voor combinaties over ADAS-categorieën	36
4.5	Overzichtswaergave	37
5	Discussie	39
5.1	Individuele ADAS	39
5.2	Combinaties van ADAS	40
5.3	Beperkingen	41
5.4	Conclusies	43
	Literatuur	44
	Bijlage A Zoekopdracht	49

Voorwoord

De afgelopen decennia hebben autofabrikanten diverse geavanceerde rijhulpsystemen (*Advanced Driver Assistance Systems*, ADAS) geïntroduceerd. Dit soort systemen ondersteunt de bestuurder bij het uitvoeren van de rijtaak door hen te informeren, te waarschuwen, in te grijpen in noodsituaties, of door de bestuurder te ontlasten. ADAS hebben tot doel het comfort en de veiligheid van bestuurders en de algehele verkeersveiligheid te verhogen, en een aantal ADAS is inmiddels verplicht gesteld als voorwaarde voor toelating van nieuwe voertuigen. Hoewel ADAS in theorie bijdragen aan verkeersveiligheid, is er tot nog toe geen overzicht van kwantitatieve/ empirische gegevens. Dit rapport is opgesteld op verzoek van Rijkswaterstaat, als input voor de *Monitor Smart Mobility* van 2025. Het doel is om recente kwantitatieve gegevens over de effectiviteit van ADAS te verzamelen en inzichtelijk te maken, om daarmee te voorzien in de behoefte aan een gefundeerde basis voor beleid over ADAS.

De belangrijkste bevindingen zijn opgenomen in een apart overzicht (SWOV-rapport R-2024-16A; De Winkel, 2024), bestaande uit:

- > een begrippenkader;
- > een tabel met inschatting van de veiligheidseffecten van individuele ADAS (overeenkomstig *Tabel 1* van dit rapport); en
- > een tabel met inschatting van de veiligheidseffecten van combinaties van ADAS (overeenkomstig *Tabel 2* van dit rapport).

Gebruikte afkortingen

ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistant Systems
ADS	Automated Driving Systems
AEB	Autonomous Emergency Braking
AES	Autonomous Emergency Steering
AH	Adaptive Headlights
AL	Alcohol Lock
AP	Assisted Parking
BRON	Bestand geRegistreerde Ongevallen Nederland
BSW	Blind Spot Warning
CC	Cruise Control
CSW	Curve Speed Warning
DMS	Driver Monitoring Systems
ELK	Emergency Lane Keeping
FCW	Forward Collision Warning
GPS	Global Positioning System
ISA	Intelligent Speed Assistance
LC	Lane Centering
LDW	Lane Departure Warning
LKA	Lane Keep Assist
MSM	Monitor Smart Mobility
NAV	Navigation systems
ODD	Operational Design Domain
PCB	Post Collision Braking
RAB	Rear Automatic Braking
RCW	Rear Collision Warning
RED	Road Edge Detection
SAE	Society of Automotive Engineers
SCF	Speed Control Function
SLIF	Speed Limit Information Function
SV	Surround Vision
SWOV	Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid
TIS	Traffic Information Systems
TPMS	Tire Pressure Monitoring System
TRL	Technology Readiness Level
TSR	Traffic Sign Recognition
VRU	Vulnerable Road User

1 Inleiding

Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat brengt jaarlijks de Monitor Smart Mobility uit. Deze monitor geeft een overzicht van de laatste ontwikkelingen en toepassingen van slimme mobiliteit. Daarbij gaat het specifiek om personen- en goederenvervoer over de weg met een digitaliserings- en/of automatiseringscomponent. Als input voor de Monitor Smart Mobility van 2025 heeft Rijkswaterstaat SWOV gevraagd de laatste inzichten op het gebied van de veiligheidsimpact van rijhulpsystemen (Advanced Driver Assistance Systems – ADAS) in beeld te brengen. Hierbij wil het ministerie de nadruk leggen op kwantitatief onderbouwde effecten van ADAS. In dit rapport presenteert SWOV een overzicht van beschikbare recente cijfers, die grotendeels zijn gebaseerd op daadwerkelijke ongevallencijfers. De bevindingen worden apart beschreven voor individuele ADAS en voor in de praktijk gebruikte combinaties van systemen. Als bijlage bij het rapport zijn informatiebladen opgesteld met daarin overzichten van de cijfers.

1.1 Achtergrond

Geavanceerde rijhulpsystemen (ADAS), zoals Lane Keeping Assist (LKA) en Adaptive Cruise Control (ACC), zijn opties in steeds meer nieuwe voertuigen, en een aantal systemen is zelfs al verplicht gesteld voor toelating van nieuwe voertuigen (Council of the European Union, 2019)². Het doel van deze systemen is het vergroten van het comfort en de veiligheid van bestuurders en het verhogen van de algehele verkeersveiligheid. ADAS omvatten diverse technologieën die variëren van het informeren of waarschuwen van een bestuurder tot het overnemen van delen van de rijtaak, of zelfs ingrijpen in noodsituaties. De introductie van deze systemen wordt algemeen gezien als een belangrijke stap in richting van hogere niveaus van voertuigautomatisering, met als ultieme vorm autonome voertuigen, zoals gedefinieerd in de automatiseringsniveaus van de Society of Automotive Engineers (SAE International/ISO, 2021).

In de afgelopen jaren zijn onderzoeken verschenen naar de veiligheidseffecten van ADAS. Overzichtsstudies wijzen op een reductie van het aantal en/of de ernst van verkeersongevallen door de implementatie van deze systemen (Cleij, 2021; Insurance Institute for Highway Safety, 2024; Verbond van Verzekeraars, 2024). Specifiek blijkt bijvoorbeeld dat de toepassing van Autonomous Emergency Braking (AEB) kan leiden tot een vermindering van het aantal kopstaartbotsingen met 45%, en in combinatie met Forward Collision Warnings (FCW) zelfs met 55% (Cleij, 2021). Anderzijds toont onderzoek aan dat ook onvoorziene nadelige effecten kunnen optreden: uit door de politie gerapporteerde ongevalgegevens blijkt dat de kans dat voertuigen met zowel FCW als AEB van achteren worden aangereden 20% hoger is dan bij



2. Met de Regulation (EU) 2019/2144 van 27 November 2019 (European Parliament, 2019) zijn voor toelating van nieuwe voertuigen de volgende ADAS verplicht gesteld: Intelligent Speed Assistance (ISA); Advanced Emergency Braking (AEB); Emergency Lane-Keeping (ELK); Driver Drowsiness and Attention Monitoring (DMS); Reversing Detection (SV); Tire Pressure Monitoring System (TPMS); Pedestrian and Cyclist Detection System (VRU); Alcohol Interlock Installation Facilitation (AL).

voertuigen zonder deze systemen. In dit geval staat daar echter tegenover dat deze voertuigen 50% minder vaak betrokken zijn bij kop-staartbotsingen (Cicchino, 2017).

Het doel van het hier gerapporteerd onderzoek was om een overzicht te bieden van de meest recente data en inzichten over de effectiviteit van verschillende individuele ADAS, en om een inschatting te maken van de impact die zulke systemen (mogelijk) hebben op de veiligheid van het Nederlandse verkeerssysteem. Hierbij wordt gebruikgemaakt van data uit diverse recente internationale onderzoeken en de BRON-database, waarin gedetailleerde gegevens over verkeersongevallen in Nederland worden verzameld (Rijkswaterstaat, 2024). Daarnaast wordt aandacht besteed aan de combinatorische effecten van meerdere ADAS binnen één voertuig, om een inschatting te maken hoe hogere niveaus van voertuigautomatisering bijdragen aan de algehele verkeersveiligheid.

2 Methode

Om een inventaris te maken van kwantitatieve kennis over de veiligheidsimpact van ADAS, is een literatuuronderzoek uitgevoerd. Hieronder verstaan we dat bestaande bronnen zijn geraadpleegd. We maken hierbij gebruik van ons bekende bronnen, en zoeken naar aanvullende informatie in databases van wetenschappelijk onderzoek. Complicerende factoren in het huidige onderzoek zijn dat fabrikanten specifieke ADAS verschillende namen geven en dat de veiligheidsimpact op verschillende manieren en binnen verschillende kaders kan worden gekwantificeerd. Om een synthese van cijfers mogelijk te maken, moeten deze complicaties worden opgelost. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe informatie is gezocht (Literatuuronderzoek), welke categorieën van systemen worden aangehouden (Classificatie van individuele ADAS, Combinaties van ADAS), en hoe informatie over veiligheidseffecten is verwerkt (Effecten van ADAS).

2.1 Literatuuronderzoek

Dit onderzoek is gebaseerd op bestaande literatuur. Hiervoor is zowel 'grijze' literatuur (bijvoorbeeld onderzoeksrapporten van private instellingen) als 'witte' literatuur (wetenschappelijke artikelen) geraadpleegd. Het voornaamste criterium voor het opnemen van bronnen is dat deze direct een, bij voorkeur cijfermatige, inschatting geven van de impact van één of meerdere ADAS op verkeersveiligheid. Bij de selectie van bronnen ligt de nadruk op evaluaties van 'censusdata'. Hiermee verwijzen we naar gegevens die zijn verkregen uit volledige of grote populaties, zoals gegevens van overheden of instanties zoals verzekeraars, die niet zijn verzameld in gecontroleerde omgevingen, maar in de praktijk. Een aantal resultaten is afkomstig uit simulatiestudies. Dit soort studies is voornamelijk waardevol wanneer data uit de praktijk niet beschikbaar zijn. Hierbij dient te worden opgemerkt dat simulaties vaak zeer gunstige aannames doen, en daarmee een rooskleurig beeld neigen te schetsen.

Grijze literatuur omvat rapporten en publicaties die niet door traditionele uitgevers zijn gepubliceerd, maar toch waardevolle informatie kunnen bevatten. Dit kunnen onderzoeksrapporten zijn die zijn opgesteld in opdracht van nationale en internationale (Europese) overheden, onderzoeksbureaus of private instanties. In de inventaris van grijze literatuur zijn rapporten opgenomen die zijn aangedragen door de opdrachtgever en andere belanghebbenden, evenals rapporten die bekend zijn uit eerder onderzoek van SWOV of samenwerkingsverbanden. Het dient te worden genoemd dat grijze literatuur niet altijd peer-reviewed is, wat kan leiden tot variaties in kwaliteit en betrouwbaarheid van de informatie.

Witte literatuur bestaat uit peer-reviewed wetenschappelijke artikelen die zijn gepubliceerd in erkende wetenschappelijke tijdschriften. Dit zijn verslagen van onderzoek die zijn beoordeeld op kwaliteit door onafhankelijke onderzoekers uit het betreffende vakgebied, wat de betrouwbaarheid en academische waarde verhoogt. Voor dit onderzoek is gezocht in SCOPUS. SCOPUS is een door Elsevier beheerde database van wetenschappelijke artikelen. Deze database kan, gegeven (betaalde) toegang, worden doorzocht door middel van zoektermen en filters. Er bestaan diverse

andere databases, zoals Google Scholar en Web of Science. Deze vielen af om verschillende redenen: resultaten van Google zijn niet transparant, dat wil zeggen niet consistent tussen herhalingen, en de resultaten kunnen niet zonder meer worden geëxporteerd. Voor andere databases bleek bijvoorbeeld de zoek-string te lang of is toegang alleen mogelijk tegen betaling.

Naast aangedragen grijze literatuur en door de zoekopdracht gevonden witte literatuur zijn, wanneer relevant, studies opgenomen waar in deze literatuur naar wordt verwezen.

In totaal zijn 27 bronnen met bruikbare informatie over de veiligheidsimpact van ADAS gevonden, met 111 observaties voor (combinaties) van systemen. Negen van deze bronnen, die gezamenlijk 50 datapunten opleverden, kwamen uit de grijze literatuur; de overige 18 bronnen, die 61 datapunten opleverden, vallen onder de witte literatuur. Van de 111 observaties zijn er 77 verkregen door vergelijking van ongevallencijfers tussen voertuigen met en zonder ADAS, en 34 afgeleid uit andersoortige analyses.

2.1.1 Zoekopdracht

De zoekopdracht is iteratief aangescherpt, door opname van extra termen voor veiligheidssystemen en verkeersveiligheid en door specifiek in (combinaties van) bepaalde velden te zoeken. Dit had tot doel het aantal resultaten zoveel mogelijk te beperken tot alleen de relevante. De uiteindelijke zoekopdracht had de volgende vorm:

(safety OR “crash” OR “collision” OR “rate” OR “risk” OR “effectiveness”) AND
 (“Advanced Driver Assistance Systems” OR ...) OR (...) ...

Door middel van “OR ...” is elk systeem dat wordt genoemd in de gepresenteerde taxonomie van ADAS opgenomen; de systemen, onder hun Engelse naam, zijn ingevuld op de plaats van “...”, met telkens een inclusieve OR daartussen. Voor elk systeem zijn synoniemen en acroniemen opgenomen. Voor de naamgeving houden we het ADAS-woordenboek van de ADAS Alliantie aan³. De complete zoek-string beslaat meerdere pagina’s en is daarom opgenomen als bijlage (Bijlage A).

Gezocht werd in *Article title*. Omdat dit onderzoek een update is van eerder onderzoek uit 2019 (Vlakveld, 2019), beperken we ons tot artikelen die zijn verschenen sinds, en inclusief, 2019. Dit is doorgevoerd in de zoekopdracht als filter.

Dit leverde een set op van 201 studies. Van deze studies zijn de abstracts beoordeeld op relevantie. Als criterium werd gehanteerd dat studies een directe inschatting moesten geven van de impact op veiligheid van ten minste één ADAS, en dat het een ADAS betreft dat daadwerkelijk op de markt is; bij voorkeur op basis van ongevallendata. Studies naar de implementatie van nieuwe algoritmen of technologieën werden buiten beschouwing gelaten, omdat dat doorgaans geen systemen betreft die op de markt zijn, en inschattingen van impact op veiligheid worden gemaakt voor ideale omstandigheden.

Na toepassing van de selectiecriteria en evaluatie van de inhoud van individuele studies reesterden er tien studies die bruikbare informatie opleverden. In een aantal onderzoeken werd verwezen naar andere onderzoeken met bruikbare informatie. Uit zulke verwijzingen zijn acht aanvullende bronnen gehaald.



3. <https://dmi-ecosysteem.nl/groepen/automatische-voertuigen/documents/folders/819/>

2.2 Classificatie van individuele ADAS

Voor de classificatie van systemen baseren we ons op de voorloper van dit rapport (Vlakveld, 2019) en de Monitor Smart Mobility 2024 (MSM, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2024)). Het rapport van Vlakveld (2019) onderscheidt *longitudinale controle*, *laterale controle*, *gecombineerde longitudinale en laterale controle*, *monitoren staat van de bestuurder* en *ondersteuning bij bijzondere manoeuvres*; in de MSM 2024 wordt de categorie *gecombineerde longitudinale en laterale controle* weggelaten. Een vergelijkbare categorisatie kan worden afgeleid door allereerst een onderscheid te maken tussen individuele ADAS en combinaties van ADAS. Vervolgens kunnen individuele ADAS worden gecategoriseerd op basis van de beïnvloede aspecten van de rijtaak.

Individuele ADAS groeperen we als volgt:

1. **Longitudinale controle** omvat systemen die voor-/achterwaartse beweging van het voertuig monitoren en/of beïnvloeden, zoals Cruise Control en Autonomous Emergency Braking.
2. **Laterale controle** omvat systemen die zijwaartse beweging van het voertuig monitoren en/of beïnvloeden, zoals Lane Departure Warning en Lane Centering.
3. **Monitoring** gaat over systemen die de driehoek ‘mens, voertuig, machine’ monitoren, en de bestuurder daarover informeren of erop acteren;
 - **omgeving** omvat systemen die eigenschappen van de omgeving of andere weggebruikers in de omgeving monitoren, zoals Blind Spot Monitoring Systemen;
 - **inzittenden** betreft systemen die de eigenschappen van de bestuurder monitoren die zijn of haar rijvaardigheid beïnvloeden, zoals vermoeidheidsdetectie;
 - **voertuig** betreft systemen die de staat van het voertuig monitoren, zoals een bandenspanningscontrolesysteem.
4. **Informatiesystemen** zijn systemen die de bestuurder van informatie voorzien die niet direct betrekking hebben op de rijtaak, maar die de veiligheid indirect kunnen beïnvloeden. Zo kan een navigatiesysteem bestuurders helpen onnodig omrijden en daaruit ontstane risico's te vermijden.

Het voornaamste onderscheid tussen de categorieën is dus controle (uitvoering) of monitoring. Informatiesystemen zouden ook onder de noemer monitoring kunnen worden geschaard.

Een tweede classificatiemethode is op basis van de modus, of het karakter, van systemen (Vlakveld, 2019). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen 1) systemen die puur *informerend* van aard zijn; 2) systemen die *waarschuwend* van aard zijn, waarbij het onderscheid ten opzichte van informerende systemen zit in een hoge urgentie van de geboden informatie en gebruik van modaliteiten om de aandacht van de bestuurder te trekken, zoals geluidssignalen; 3) systemen die *ingrijpen* in noodsituaties en autonoom handelen om ongevallen te voorkomen; en 4) *comfort-verhogende* systemen, die niet-urgente taken van de bestuurder kunnen overnemen om de bestuurder te ontlasten. Informatie over de modus wordt opgenomen in de overzichtswaarschuwend van systemen.

2.3 Combinaties van ADAS

In het huidige onderzoek worden 28 individuele systemen beschouwd. Met dit aantal systemen zijn zo'n 270 miljoen unieke combinaties mogelijk ($2^n - 1$). Een aantal van deze systemen (*Driver Monitoring Systems*, DMS; *Adaptive Headlights*, AH) zou bovendien nog verder uitgesplitst kunnen worden naar subtype, wat het aantal mogelijke combinaties nog verder doet toenemen (ter vergelijking, het wereldwijde aantal auto's is geschat op 1.47 miljard (Stumpf, 2023)). Het is daarom niet mogelijk elke combinatie apart te beschouwen. De Society of Automotive Engineers (SAE) heeft een classificatiesysteem opgesteld van zes automatiseringsniveaus, of *levels* (SAE

International/ISO, 2021). Deze automatiseringsniveaus hebben betrekking op wat *Automated Driving Systems* (ADS) wordt genoemd. De gelijkenis tussen de termen en acroniemen is potentieel verwarrend. Ruwweg kan worden gesteld dat ADAS *assisteren* maar de bestuurder is verantwoordelijk, en dat ADS *automatiseren*, waarbij de verantwoordelijkheid naar de fabrikant verschuift. De SAE-niveaus reiken van niveau 0 (*No Driving Automation*) tot niveau 5 (*Full Driving Automation*). Bij niveau 0 hebben voertuigen geen systemen die aanhoudend longitudinale of laterale controle kunnen uitoefenen. Hiermee vallen systemen die ingrijpen in noodsituaties, zoals AEB, onder niveau 0. In niveau 1 is het voertuig in staat de longitudinale óf laterale controle uit te voeren in plaats van de bestuurder, mits deze continu monitort. In niveau 2 neemt het systeem longitudinale én laterale controle over, ook mits de bestuurder continu monitort. In de hogere niveaus neemt het voertuig in steeds meer omstandigheden de controle van het voertuig volledig over en is monitoring niet continu noodzakelijk. In het huidige wagenpark zijn alleen systemen tot niveau 2 te vinden. Hogere niveaus zullen steeds meer ADAS naadloos moeten integreren om de rijtaak veilig uit te voeren. In de volgende paragraaf beschouwen we een aantal veelvoorkomende combinaties per automatiseringsniveaus van de SAE in detail.

2.4 Effecten van ADAS

In de voorganger van dit rapport (Vlakveld, 2019) werd voor ieder ADAS een inschatting gegeven van een vijftal eigenschappen:

1. *de accuratesse*: de proportie van correcte (positieve en negatieve) classificaties op alle classificaties;
2. *gedragsadaptatie*: invloed van het systeem op gedrag van een bestuurder;
3. *randvoorwaarden*: omstandigheden waaronder het systeem functioneert;
4. *technologische gereedheid*: mate waarin een technologie klaar is voor de markt;
5. *veiligheidsimpact*: een inschatting of een systeem een positief, geen, of een negatief effect heeft op verkeersveiligheid.

In het huidige onderzoek ligt de nadruk op het aanvullen van deze bevindingen met kwantitatieve gegevens. Andere gegevens worden grotendeels overgenomen uit het rapport van Vlakveld (2019). Technologische gereedheid wordt in dit rapport niet meer beoordeeld, wat wordt toegelicht in *Paragraaf 2.4.4*. Eerst wordt nu voor elke eigenschap beschreven hoe de eigenschappen worden beoordeeld.

2.4.1 Accuratesse

Afhankelijk van de (beoogde) functionaliteit van een systeem kunnen de prestaties op verschillende manieren worden gekwantificeerd. Voor een *Lane Centering* systeem kan bijvoorbeeld de variatie in positie ten opzichte van de gewenste positie worden becijferd. Voor de meeste ADAS geldt echter dat ze beslissingen moeten nemen: wordt aan een bepaalde conditie voldaan of niet? Ter illustratie: varianten van *Intelligent Speed Assist* (ISA) moeten beslissen of een bestuurder te hard rijdt; varianten van *Lane Keep Assist* (LKA) of een voertuig wegbelijning overschrijdt; en *Driver Monitoring Systems* (DMS) of een bestuurder al dan niet afgeleid, vermoeid of onder invloed is. Het maken van zulke beslissingen wordt *classificatie* genoemd. Hierbij zijn er twee mogelijke staten van de werkelijkheid (iets is waar of niet), en twee mogelijke beslissingen van een systeem over de werkelijkheid. Het systeem kan dus correct beslissen dat iets waar is (*hit*), of onwaar (*correct rejection*); of incorrect beslissen dat iets waar is (*false alarm*) of onwaar (*miss*) (Green & Swets, 1966). De accuratesse van een systeem kan worden gedefinieerd als de proportie correcte beslissingen.

Cijfers over de accuratesse van systemen zijn schaars. Voor enkele door de EU verplicht gestelde ADAS zijn wel prestatie-eisen gespecificeerd. Zo moet voor het verkrijgen van type-goedkeuring in een nieuw voertuig, Intelligent Speed Assist (ISA) voor 90% van de gereden afstand op 80% van

de wegen functioneel zijn (European Commission, 2021b); moet *Emergency Lane Keeping* (ELK) functioneren bij snelheden tussen 70-130 km/uur en vier tests succesvol doorstaan (European Commission, 2021c); en moeten DMS actief zijn bij snelheden boven 70 km/uur en systemen moeten worden getest met minstens 10 proefpersonen, waarbij ten minste één hit of miss wordt waargenomen en de som van het aantal hits en misses minstens 10 bedraagt (European Commission, 2021a). Hoewel de herkomst van de testprotocollen niet helder is, worden er concrete eisen gesteld die waarborgen dat systemen minstens functioneel zijn. Door de schaarsheid van cijfers wordt een grove inschatting gemaakt van accuratesse op basis van de gevoeligheid van een inschatting van systemen voor *false alarms*.

2.4.2 Gedragsadaptatie

De aanwezigheid van systemen kan gedrag van een bestuurder positief of negatief beïnvloeden. Voorbeelden van negatieve effecten zijn dat bestuurders ten onrechte denken dat een systeem actief is en verzaken aspecten van de rijtaak uit te voeren; meer risico's nemen of een systeem gebruiken buiten de beoogde context door een verkeerd beeld van de mogelijkheden van automatisering (*misuse*); of een systeem uitschakelen omdat het als vervelend of gevaarlijk wordt beschouwd (*disuse*). Ten grondslag hieraan ligt de mate van vertrouwen in een systeem. Wanneer er sprake is van te weinig vertrouwen in, of wantrouwen van, een systeem wordt dit *undertrust* genoemd; wanneer er sprake is van te veel vertrouwen in een systeem wordt dit *overtrust* genoemd. Beide extremen kunnen ongewenste effecten hebben op de beoogde functionaliteit van ADAS (Parasuraman & Riley, 1997). Ook zijn positieve effecten mogelijk; systemen die aspecten van de rijtaak over kunnen nemen wanneer dat niet strikt noodzakelijk is, kunnen werklast en daaruit voortkomende vermoeidheid beperken, en daarmee de verkeersveiligheid vergroten.

2.4.3 Randvoorwaarden

Systemen functioneren doorgaans alleen onder bepaalde omstandigheden; een op ultrasone sensoren gebaseerd *Blind Spot Monitoring System* (BSMS) functioneert bijvoorbeeld bij lage snelheden en met een bereik tot enkele meters (De Winkel, Doumen & Jansen, 2023); baanassistentiesystemen die gebruikmaken van camerabeelden functioneren alleen wanneer de beeldkwaliteit en het zicht niet worden belemmerd. Dit soort randvoorwaarden komt voort uit de interactie tussen het bereik van sensoren en de omgeving, en vormt het *Operational Design Domain* (ODD) van systemen. Het ODD van bepaalde typen systemen kan variëren, afhankelijk van hoe deze zijn geïmplementeerd.

2.4.4 Technologische gereedheid

Onder technologische gereedheid verstaan we de staat van ontwikkeling van een technologie: staat deze nog in de kinderschoenen, of is de techniek geperfectioneerd? Deze staat is bepalend voor de afweging of een bepaalde technologie actief gepromoot dient te worden. Om deze staat te kwantificeren heeft de NASA de *Technology Readiness Level* (TRL)-schaal voorgesteld. Deze schaal beslaat 9 niveaus, die variëren tussen 'fundamenteel onderzoek' (basisprincipes functionaliteit zijn bekend), en 'opschalen en vermarkten' (bewezen effectief) (Mankins, 1995). Omdat de scope van dit onderzoek ADAS omvat die al deel uitmaken van het wagenpark, is de TRL minimaal 8 ('compleet en operationeel') en maximaal 9. Daarom biedt beschouwing van de TRL weinig aanvullende informatie; de afweging of een systeem actief moet worden gepromoot is afhankelijk van de waargenomen veiligheidsimpact. Daarom is besloten technologische gereedheid voor dit onderzoek buiten beschouwing te laten.

2.4.5 Veiligheidsimpact

We operationaliseren veiligheidsimpact in dit onderzoek als het waargenomen verschil in ongevalsfrequentie tussen voertuigen met en zonder ADAS. Een x-percentag positief betekent een groter aantal ongevallen voor voertuigen met een bepaalde ADAS, oftewel een nadelig effect; een negatief percentage betekent een kleiner aantal ongevallen, oftewel een voordelig

effect. Niet alle bekende ADAS worden in de gevonden bronnen behandeld. Dat betekent dat niet voor alle systemen data beschikbaar zijn om een inschatting te maken van de impact van het systeem op verkeersveiligheid. Ook zijn niet alle resultaten direct te interpreteren als impact op *algehele* verkeersveiligheid. Sommige studies geven bijvoorbeeld aan dat een bepaald percentage van specifieke typen ongevallen voorkomen kan worden. Dit soort cijfers moet worden afgezet tegen het aantal of het percentage van dat soort ongevallen op het totaal.

Bijkomende complicaties in het uitvoeren van correcties zijn dat veiligheidscijfers verschillende externe omstandigheden reflecteren, omdat ze bijvoorbeeld afkomstig zijn uit internationaal onderzoek, en dat categorisaties en classificaties worden gedaan op basis van verschillende criteria.

Het is echter niet mogelijk systemen te vergelijken zonder gemeenschappelijke maat.

We generaliseren gevonden cijfers daarom, wanneer mogelijk, aan de hand van beschikbare kennis over het aandeel van specifieke categorieën ongevallen en bestuurders. We maken daarvoor gebruik van twee bronnen:

- In Nederland worden ongevallen door de politie geregistreerd in het Bestand geRegistreerde Ongevallen Nederland (BRON; Rijkswaterstaat, 2024)), waarbij allerlei eigenschappen worden opgetekend. Specifiek maken we gebruik van cijfers over het type ongeval, het aandeel ongevallen per niveau van ernst, het aandeel oudere bestuurders, en het aandeel personen-/bestelauto's en bussen/vrachtauto's op het totale aantal voertuigen. De registratiegraad van verschillende van deze cijfers is in Nederland na 2009 helaas op meerdere fronten verslechterd. Dit komt door een wijziging in de 'Aanwijzing verkeersongevallen', waarin door het Openbaar Ministerie het protocol omtrent registratie ongevallen gegeven wordt (Vis et al., 2011). Voor generalisatie van specifieke cijfers naar het totaal zijn daarom cijfers uit BRON van 1987 tot en met 2009 gebruikt. Voor elk van de categorisaties bleek de ratio van de leden van de betreffende categorie vrijwel constant over de tijd. Voor de correcties gebruiken we daarom het gemiddelde aandeel van elk lid over de tijd.
- Amerikaans onderzoek (Wang, 2019) geeft cijfers over groepen van ongevalstypen die voorkomen kunnen worden door specifieke ADAS, en hun aandeel op het totaal. Deze cijfers kunnen worden verbonden aan de ADAS die in het huidige onderzoek worden beschouwd.

De analyse liet zien dat verschillen tussen bevindingen door correctie op basis van deze twee bronnen, daar waar beide beschikbaar waren, dusdanig klein zijn dat conclusies over de relatieve impact van verschillende systemen er niet door worden beïnvloed.

Tot slot dient nogmaals te worden benadrukt dat de hoeveelheid beschikbare data om een geïnformeerde vergelijking van de veiligheidsimpact van ADAS te kunnen maken beperkt is, en daarom dat de zekerheid van de bevindingen beperkt is.

3 Individuele ADAS

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de verschillende Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) die momenteel in auto's voorkomen en van hun impact op verkeersveiligheid. Het hoofdstuk behandelt zowel longitudinale als laterale controlesystemen, evenals monitoring-technologieën die de omgeving, inzittenden en staat van het voertuig bewaken. Er wordt ingegaan op systemen die *informerend* van aard zijn, zoals navigatie- en verkeersinformatie-systemen die de bestuurder helpen geïnformeerde beslissingen te nemen; op *waarschuwend*e systemen, zoals rijstrookassistentie en botsingswaarschuwingen, die de bestuurder attenderen op potentiële gevaren; op *ingrijpende* systemen, zoals noodremsystemen en automatische snelheidsbegrenzers, die actief ingrijpen om ongelukken te voorkomen; en tot slot worden *comfort-verhogende* systemen besproken, zoals Adaptive Cruise Control en parkeerhulpen, die de rijervaring aangenamer maken door bepaalde taken geheel over te nemen. Het hoofdstuk biedt informatie over de werking, toepassingsdomeinen, en de veiligheidsimpact van deze systemen, gebaseerd op onderzoeksresultaten en ongevallendata. We sluiten het hoofdstuk af met een overzichtstabel (*Tabel 1*) van de (geschatte) verandering in het aantal ongevallen voor individuele ADAS.

3.1 Longitudinale Controle

3.1.1 Cruise Control (CC)

Cruise Control (CC) is een systeem dat de snelheid van een voertuig automatisch handhaaft zonder dat het gaspedaal hoeft te worden ingedrukt, op een door de bestuurder ingestelde snelheid. Het systeem werkt tegenwoordig via een elektronische module die de brandstoftoevoer reguleert, maar al vroeg in de twintigste eeuw werden voertuigen voorzien van mechanische implementaties (zoals de *Wilson-Pitcher* uit 1901). Andere namen voor CC zijn *Automatic Cruise Control* en *Speed Control*.

CC is bedoeld voor gebruik op lange, rechte wegen onder stabiele verkeersomstandigheden, zoals autosnelwegen (i.e., het *Operationeel Design Domain* of Operationeel Domein). De bedoelde functionaliteit kan nagenoeg feilloos worden gehaald. Het systeem is voornamelijk comfort-bevorderend, doordat het de noodzaak om constant het gaspedaal te bedienen wegneemt. Hierdoor zou het ook vermoeidheid bij bestuurders kunnen beperken, en als zodanig ook verkeersveiligheid bevorderen (Kampen, 1996). Omdat het systeem de bestuurder een aspect van de rijtaak uit handen neemt, kan het echter ook afleiding in de hand werken, met een mogelijk negatief effect op de verkeersveiligheid (De Winter et al., 2014).

In de geraadpleegde literatuur kwam één bron voor waar de impact op daadwerkelijke verkeersveiligheid is geëvalueerd aan de hand van ongevallendata (*Tabel 1*). Hieruit bleek dat CC een negatief effect heeft op de verkeersveiligheid: na controle voor andere factoren bleek het risico op ongevallen 12% hoger onder voertuigen met CC dan zonder (Verbond van Verzekeraars, 2024).

3.1.2 Adaptive Cruise Control (ACC)

Adaptive Cruise Control (ACC) is een geavanceerde vorm van Cruise Control die naast het behouden van een vooraf ingestelde snelheid, ook automatisch de afstand tot voorliggers reguleert door gebruik te maken van radar- of LiDAR-sensoren (Laser Imaging Detection And Ranging). Het systeem past de snelheid van het voertuig aan om een veilige afstand te bewaren. Een andere naam voor het systeem is *Dynamic Cruise Control*.

Het operationeel domein van het systeem beslaat net als bij CC hoofdzakelijk autosnelwegen, en in sommige gevallen ook filerijden. Net als CC is ACC comfort-bevorderend omdat het de noodzaak om het gaspedaal te bedienen wegneemt. Door automatisch afstand tot de voorganger te behouden kan het ook de veiligheid vergroten. Het is echter geen vereiste dat ACC stationaire of traag bewegende objecten detecteren (ISO, 2018), en bovendien zijn deze systemen feilbaar. Ook blijkt dat gebruikers in de meeste gevallen niet bekend zijn met beperkingen van het systeem, wat tot overtrust leidt (Moeckli et al., 2015). Overmatig vertrouwen kan bestuurders verleiden tot afleiding, wat bij falen van het systeem of in situaties buiten het operationeel domein daarom juist ongevallen zou kunnen veroorzaken (De Winter et al., 2014; Hoedemaeker & Brookhuis, 1998).

Uit microsimulatie-onderzoek, waar verkeer onder verschillende omstandigheden wordt gesimuleerd door middel van wiskundige modellen, komt naar voren dat ACC het risico op conflictsituaties kan verminderen. De gerapporteerde effectgroottes onder simulatiestudies variëren: onder uitzonderlijke omstandigheden, zoals bij evacuaties, zou een penetratiegraad van 25% tot 49.7% van ongevallen kunnen voorkomen (Rahman, Hasan & Zaki, 2021); een andere studie vindt echter een reductie van 4,4% bij een penetratiegraad van 80% (Aleksa et al., 2024). Onder de resultaten van de literatuurstudie was één onderzoek dat de impact van ACC bepaalt aan de hand van daadwerkelijke ongevalldata, waarbij werd gecontroleerd voor andere factoren. Uit dit onderzoek bleek dat ACC een negatief effect heeft op de verkeersveiligheid, namelijk een 8% hoger risico (Verbond van Verzekeraars, 2024).

De middelste score van de verzamelde cijfers (i.e., de mediaan), met eventuele correctie voor het aandeel specifieke ongevallen, is 1,8%. Dit duidt op een licht *negatief* effect van ACC op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*); wanneer alleen de beschikbare cijfers uit de praktijk worden beschouwd ligt dit cijfer hoger (8%, (Verbond van Verzekeraars, 2024)).

3.1.3 Speed Limit Information Function (SLIF)

Een Speed Limit Information Function (SLIF) is een niet-dwingende variant van *Intelligent Speed Assist* (ISA). Het gebruikt camera's en kaartdata om de geldende snelheidslimieten te detecteren en aan de bestuurder te communiceren. Het waarschuwt de bestuurder als de snelheid van het voertuig de limiet overschrijdt. Andere namen voor SLIF zijn *Speed Limit Alert*, *Speed Limit Display*, *Advisory ISA* en *Automated Section Speed Control*.

Het systeem kan worden ingezet onder verschillende omstandigheden: snelwegen, stadsverkeer en wegen met verschillende snelheidslimieten. Voorwaarde voor goed functioneren is dat gebruikte kaartdata recent en compleet zijn en dat camerasystemen verkeersinformatie feilloos aflezen uit verkeersborden. De EU heeft als ondergrens gesteld dat de snelheidslimiet op 80% van de wegen, 90% van de tijd moet functioneren (Council of the European Union, 2019). SLIF kan helpen om snelheidsgerelateerde ongevallen te verminderen door bestuurders te waarschuwen wanneer zij snelheidslimieten overschrijden. Er zijn risico's van zowel *overtrust* als *undertrust*: bestuurders zouden, respectievelijk, blind kunnen vertrouwen op systemen en zelf minder aandacht aan de omgeving geven, of systemen uitschakelen wanneer deze als opdringerig worden beschouwd en/of vaak vals alarm slaan.

Eén studie in de geraadpleegde literatuur gaf cijfers over de impact op de verkeersveiligheid: Doecke et al. (2021) leiden uit een analyse van ongevallen af dat een reductie van 3,5% op alle ongevallen (in Australië) mogelijk zou zijn als voertuigen zouden worden voorzien van SLIF.

De (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers liggen tussen -3,5% en -3,7%, wat duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*).

3.1.4 Intelligent Speed Assistance (ISA)

Intelligent Speed Assistance (ISA) gaat een stap verder dan SLIF, door niet alleen over snelheidslimieten te informeren, maar ook actief de snelheid te beperken als de bestuurder deze overschrijdt. In het geval van ISA kan de bestuurder deze beperking negeren, bijvoorbeeld door het gaspedaal verder in te drukken. Net als bij SLIF gebruikt het systeem kaartdata en/of camera's om snelheidslimieten te detecteren, en het systeem heeft hetzelfde operationeel domein en dezelfde randvoorwaarden en gedragseffecten. Andere voorkomende namen voor dit systeem zijn *Intelligent Speed Adaptation*, *Speed Limit Assist* en *Supportive ISA*. Studies tonen aan dat ISA een aanzienlijke vermindering van het aantal snelheidsovertredingen oplevert, en daarmee het aantal snelheidsgerelateerde ongevallen reduceert: (Doecke et al., 2021) rapporteren een theoretische reductie van 5,2% op het totale aantal ongevallen. Een micro-simulatiestudie noemt een afname van 8% bij een penetratiegraad van 95% (Aleksa et al., 2024).

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers is -6,6%, wat duidt op een, theoretisch, positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*).

3.1.5 Speed Control Function (SCF)

De Speed Control Function (SCF) is de overtreffende trap van ISA. Dit systeem beperkt de maximale snelheid van het voertuig tot een gegeven limiet, waardoor snelheidsovertredingen voorkomen kunnen worden. Bestuurders kunnen deze limiet niet overschrijden door extra gas te geven (zoals bij ISA). Net als bij SLIF en ISA gebruikt het systeem kaartdata en/of camera's om snelheidslimieten te detecteren, en ook het operationeel domein is hetzelfde. Andere namen voor het systeem zijn *Speed Limiter*, *Speed Governing* en *Limiting ISA*. Studies suggereren dat SCF het sterkste veiligheidsbevorderende effect heeft van de drie varianten van ISA. Doecke et al. (2021) noemen een theoretische reductie van 6,9% van ongevallen in Australië. Dit percentage komt nagenoeg overeen met een schatting van het aantal ongevallen veroorzaakt door snelheidsovertredingen in de VS, van 7% (De Winkel, Christoph & Van Nes, 2024).

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers is -7%, wat duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*). Ten opzichte van de andere varianten van dit systeem (SLIF, ISA) heeft SCF, als meest dwingende systeem, in ieder geval in theorie het sterkste positieve effect op de verkeersveiligheid. In de praktijk kunnen gevallen waarin, bijvoorbeeld, verkeersborden verkeerd worden uitgelezen of kaarten verouderd zijn de voordelige effecten verkleinen.

3.1.6 Forward Collision Warning (FCW)

Het Forward Collision Warning-systeem (FCW) waarschuwt de bestuurder als er een dreigende botsing met een voorligger wordt gedetecteerd. FCW gebruikt camera's, radar of LiDAR om de weg en andere weggebruikers voor het voertuig te monitoren. Het systeem geeft meestal een akoestische of visuele waarschuwing, en is inzetbaar op snelwegen en in stadsomgevingen. Er zijn varianten die gericht zijn op kruisend verkeer. Andere namen voor FCW zijn *Forward Collision Alert* en *Front Collision Warning*.

De accuratesse van FCW is afhankelijk van de kwaliteit van gebruikte sensoren en omgevingsomstandigheden. FCW kan tot minder oplettendheid leiden als bestuurders te veel op het systeem vertrouwen (Maltz & Shinar, 2004). Bij een hoge frequentie van *false alarms* zouden gebruikers het systeem kunnen deactiveren. Het is echter onwaarschijnlijk dat er een grote gedragsadaptie is door dit systeem omdat het alleen actief zou moeten zijn in (zeldzame) noodsituaties.

Het is aangetoond dat FCW, in de praktijk, effectief is in het verminderen van (kop-staart) botsingen. Het Verbond van Verzekeraars (2024) noemt een afname van 32% van het aantal ongevallen, waarbij gecontroleerd werd voor andere factoren. Bevindingen uit andere studies zijn redelijk consistent met deze bevinding, met effectschattingen variërend tussen 16 en 45% reductie in ongevallen (Aukema et al., 2023; Leslie et al., 2021; Yue et al., 2019). De variatie is ten dele te wijten aan de gebruikte techniek: systemen die gebruikmaken van alleen een camera zijn inferieur aan systemen die (ook) radar gebruiken (Leslie et al., 2021). Hierbij dient te worden opgemerkt dat in deze andere studies specifiek wordt gekeken naar de impact op een bepaald type, of een aantal typen, ongevallen. Het effect op het totale aantal ongevallen is dan proportioneel aan het aandeel van dat soort ongevallen op het totaal.

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers ligt tussen -13,2% en -12,0%, afhankelijk van de gekozen correctie. Dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*).

3.1.7 Autonomous Emergency Braking (AEB)

Autonomous Emergency Braking (AEB) detecteert een dreigende botsing met een voertuig, voetganger of ander obstakel en remt automatisch het voertuig af om een aanrijding te voorkomen of de ernst ervan te verminderen. Het kan daarmee worden gezien als overtreffende trap van FCW. Het systeem gebruikt meestal radar, camera's of een combinatie van beide. Andere namen voor dit systeem zijn *Automatic Emergency Braking* en *Auto Brake*. AEB heeft dezelfde accuratesse, gedragseffecten en operationeel domein als FCW. Er is een goede vertegenwoordiging van AEB in de literatuur, en deze studies tonen vrij consistent aan dat AEB een van de meest veiligheidsbevorderende ADAS is. Ongevallendata van het Verbond Van Verzekeraars duidt op een afname van 14% ongevallen door AEB (Verbond van Verzekeraars, 2024). Andere studies kijken doorgaans naar het effect op specifieke typen ongevallen (e.g., kop-staart, ongevallen veroorzaakt door oudere bestuurders, ongevallen op kruispunten), met afnames variërend tussen 15% en 65%. Wanneer deze cijfers worden gegeneraliseerd naar het totaal, aan de hand van schattingen van het aandeel specifieke ongevallen resulteert dit in afnames tussen zo'n 6% en 15% van het aantal ongevallen (Fujiwara & Takechi, 2022; Hu et al., 2022; Insurance Institute for Highway Safety, 2023; Leslie et al., 2021; Masello et al., 2022; Newstead, Budd & Stephens, 2020; Spicer et al., 2021; Yue et al., 2019). De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers ligt tussen -11,8% en -10,7%, afhankelijk van de gekozen correctie. Dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*).

3.1.8 Rear Automatic Braking (RAB)

Rear Automatic Braking (RAB) detecteert obstakels of (kwetsbare) weggebruikers achter het voertuig bij achteruitrijden en remt automatisch om een aanrijding te voorkomen. Het kan daarmee worden gezien als overtreffende trap van Rear Cross-Traffic Alert (RCTA – zie sectie 3.3.8) en achterwaartse implementatie van AEB. Het systeem maakt gebruik van camera's en ultrasone sensoren. Dit type systeem is ook bekend als *Reverse Automatic Braking*, *Rear Emergency Braking* of *Rear Automatic Braking*. Het gebruikelijk operationeel domein beslaat bijvoorbeeld parkeerterreinen en andere situaties waar achteruitrijden vereist is en functioneert bij lage snelheden. Ook hier wordt accuratesse beperkt door functionaliteit van sensoren en omgevingsfactoren. Onderzoek toont aan dat RAB een hoge effectiviteit heeft in het voorkomen van achteruitrijd-ongevallen: tussen 78% (Insurance Institute for Highway Safety, 2023) en 82% (Leslie et al., 2021). Omdat dit type ongeval echter maar een klein deel uitmaakt van het totale aantal ongevallen is de algehele impact beperkt. Afhankelijk van de gekozen correctie ligt de mediaan van de effecten tussen -1,2% en -2,1% (*Tabel 1*).

3.2 Laterale Controle

3.2.1 Lane Departure Warning (LDW)

Lane Departure Warning (LDW) waarschuwt de bestuurder met visuele of akoestische signalen wanneer het voertuig onbedoeld de rijstrook dreigt te verlaten. Het systeem maakt gebruik van camera's om de rijstrookmarkeringen te detecteren, het voert geen actieve stuurcorrecties uit. Andere namen voor dit systeem zijn *Lane Departure Alert*, *Lane Exit Warning*. LDW werkt alleen op wegen met duidelijke rijstrookmarkeringen. Regulering van de EU stelt dat LDW moet functioneren bij snelheden tussen 65-130km/uur, het operationeel domein omvat autowegen en autosnelwegen (European Commission, 2021c).

LDW kan effectief zijn in het verminderen van ongevallen veroorzaakt door bijvoorbeeld vermoeidheid of afleiding van de bestuurder. Wanneer het systeem overmatig gevoelig is en veel *false alarms* produceert, kunnen bestuurders het systeem als irritant beschouwen en uitschakelen. Omdat het systeem echter alleen actief zou moeten zijn in ongebruikelijke situaties, is de verwachte gedragsadaptatie minimaal.

Cijfers van het Verbond Van Verzekeraars zijn positief over de verkeersveiligheidsimpact van LDW; een afname van 15% van het aantal ongevallen (Verbond van Verzekeraars, 2024). Cijfers specifiek voor ongevallen veroorzaakt door het verlaten van de rijbaan variëren tussen 10% en 26,2% reductie (Insurance Institute for Highway Safety, 2023; Leslie et al., 2021; Masello et al., 2022), tot 84.1% voor een selectie van ongevalstypen (Yue et al., 2019). Eén studie vond geen significant effect (Aukema et al., 2023).

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers ligt tussen -4,1% en -4,2%, afhankelijk van de gekozen correctie. Dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*)

3.2.2 Lane Keep Assist (LKA)

Lane Keep Assist (LKA) helpt de bestuurder binnen de rijstrook te blijven door zachte stuurcorrecties uit te voeren wanneer het voertuig de rijstrookmarkeringen dreigt te overschrijden zonder dat de richtingaanwijzer is geactiveerd. Het kan daarmee worden gezien als overtreffende trap van LDW. Het systeem maakt gebruik van camera's om de rijstrookmarkeringen te detecteren. Andere benamingen voor het systeem zijn *Lane Keeping Assistance* en *Lane Keeping Aid*. LKA functioneert alleen op autowegen en autosnelwegen, mits er duidelijke rijstrookmarkeringen zijn.

LKA kan ongevallen door onbedoeld van de rijstrook af te wijken voorkomen en daarmee het aantal zijwaartse aanrijdingen verminderen. Cijfers van het Verbond Van Verzekeraars tonen een zeer gunstig effect, met een afname van 37% van het aantal ongevallen op het totaal (Verbond van Verzekeraars, 2024). Andere schattingen zijn conservatiever: met een afname van 9% van de ongevallen veroorzaakt specifiek door de baan te verlaten (Spicer et al., 2021), en 27% van het aantal dodelijke ongevallen (Utriainen, Pöllänen & Liimatainen, 2020), wat neerkomt op zo'n 0,3% van het totale aantal ongevallen.

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers ligt tussen -1,2% en -1,7%, afhankelijk van de gekozen correctie. Dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*)

3.2.3 Emergency Lane Keeping (ELK)

Emergency Lane Keeping (ELK) grijpt in wanneer het voertuig de rijstrook dreigt te verlaten en een botsing met een ander voertuig of obstakel dreigt. Het systeem stuurt actief bij om een aanrijding te voorkomen. Het werkt samen met LKA en maakt gebruik van camera's en overige sensoren. Het systeem is ook bekend als *Emergency Lane Assist* of *Lane Departure Prevention*. Het systeem kan worden gezien als uitbreiding van LKA en kan ingrijpen wanneer de bestuurder niet adequaat reageert op noodsituaties.

In de literatuurstudie zijn geen cijfers gevonden over de impact op de verkeersveiligheid.

3.2.4 Lane Centering (LC)

Lane Centering houdt het voertuig automatisch gecentreerd in de rijstrook door continu stuurcorrecties uit te voeren. Het systeem maakt gebruik van camera's die de rijstrookmarkeringen monitoren, en is ook bekend als *Lane Centering Assist* en *Lane Centering Control*. Het operationeel domein omvat autowegen en autosnelwegen met duidelijke rijstrookmarkeringen en beperkte bochten, waarbij een bovengrens is gesteld aan de maximale laterale acceleratie.

Het systeem zou de kans op afwijken van de rijstrook kunnen beperken en daarmee aanrijdingen door afleiding of vermoeidheid kunnen voorkomen. Het is echter ook mogelijk dat gebruikers het systeem denken te kunnen gebruiken buiten het operationeel domein, door onvoldoende op de hoogte te zijn van de beperkingen. Dit zou ongevallen kunnen veroorzaken.

Er zijn geen cijfers gevonden over de verkeersveiligheidsimpact van dit systeem.

3.2.5 Autonomous Emergency Steering (AES)

Autonomous Emergency Steering (AES) detecteert een dreigende botsing die niet door remmen kan worden voorkomen en grijpt actief in door het stuur te bedienen om obstakels te ontwijken. Het systeem werkt met radar, LiDAR en camera's. Het kan daarmee worden gezien als een laterale variant van AEB. Alternatieve benamingen zijn *Automatic Emergency Steering*, *Emergency Steering Assist*. Het systeem is bedoeld voor wegen waar plotselinge obstakels kunnen voorkomen. AES kan levensreddend zijn in situaties waar een plotselinge stuurmanoeuvre de enige manier is om een ernstige botsing te voorkomen.

Er zijn geen cijfers over de veiligheidsimpact van dit systeem gevonden.

3.3 Monitoring: omgeving

3.3.1 Vulnerable Road User (VRU) Detection

VRU detectiesystemen, waarbij VRU staat voor kwetsbare weggebruikers, zijn ontworpen om kwetsbare weggebruikers zoals voetgangers en fietsers te detecteren en de bestuurder te waarschuwen of automatisch te remmen als een aanrijding dreigt. Deze systemen maken gebruik van camera's, radar en/of LiDAR. Andere namen voor dit soort systemen, mede afhankelijk van de mate waarin de implementatie autonoom kan handelen, zijn: *Pedestrian AEB*, *VRU ADAS*, *Front Pedestrian Braking*, *AEB with Pedestrian Detection* en *Pedestrian Crash Avoidance and Mitigation*. Het operationeel domein van deze systemen is stedelijk gebied en/of daar waar veel voetgangers en fietsers aanwezig zijn. Een vereiste voor werking van het systeem is doorgaans lage snelheid. Beperkingen aan de accuratesse komen voort uit de interactie tussen gevoeligheid van de sensoren en omgevingsomstandigheden; zo moeten camerasystemen vrij zicht hebben om te kunnen fungeren.

VRU-detectiesystemen zijn doorgaans effectief in het verminderen van ongevallen met voetgangers en fietsers, hoewel de schattingen van effectiviteit uiteen lopen tussen 14% en 80% reductie van dit type ongevallen (Aukema et al., 2023; Insurance Institute for Highway Safety, 2023; Leslie et al., 2021; Masello et al., 2022; Spicer et al., 2021; Yue et al., 2019). Een studie noemt een negatief effect, van een 16% toename in ongevallen, maar dit effect is niet significant (Hellman & Lindman, 2023). Omdat het aantal ongevallen met tussen auto's en voetgangers echter een relatief klein deel uitmaakt van het totaal, is de geschatte totale impact relatief klein.

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) gevonden cijfers is -0.3%. Dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*)

3.3.2 Curve Speed Warning (CSW)

Curve Speed Warning (CSW) waarschuwt de bestuurder wanneer het voertuig een bocht nadert met een snelheid die te hoog is voor het veilig nemen van een bocht. Het systeem gebruikt kaartdata en sensoren om de bocht en de snelheid te beoordelen. Andere namen voor het systeem zijn *Curve Speed Alert* en *Curve Speed Assistance*. Het operationeel domein omvat autowegen met scherpe bochten en autosnelwegen. De accuratesse van CSW is voornamelijk afhankelijk van de kwaliteit van kaartdata voor het inschatten van bochtradii.

CSW kan helpen om ongevallen te voorkomen die veroorzaakt worden door te hoge snelheden in bochten, waardoor bestuurders de controle over het voertuig kunnen verliezen.

Er zijn geen cijfers gevonden over dit systeem, los van andere systemen.

3.3.3 Road Edge Detection (RED)

Road Edge Detection (RED) helpt de bestuurder om te voorkomen dat het voertuig van de weg raakt door visuele of akoestische waarschuwingen te geven of door actief bij te sturen. Het systeem maakt gebruik van camera's die de randen van de weg detecteren. Het operationeel domein bestaat uit smalle wegen, landwegen en wegen zonder duidelijke markeringen. Andere namen voor dit systeem zijn *Road Edge Alert* en *Road Boundary Detection*. De accuratesse van het systeem is afhankelijk van de kwaliteit van sensoren. Het systeem kan ongevallen voorkomen waarbij voertuigen van de weg af raken, vooral 's nachts of bij slecht weer.

Er zijn geen cijfers gevonden over de veiligheidseffecten van dit systeem.

3.3.4 Traffic Sign Recognition (TSR)

Traffic Sign Recognition (TSR) detecteert en leest verkeersborden langs de weg met behulp van camera's en toont deze informatie aan de bestuurder. Het systeem kan snelheidslimieten, stopborden en andere cruciale verkeerssignalen identificeren. Andere namen voor dit systeem zijn *Traffic Sign Information*, *Traffic Sign Detection* en *Traffic Sign Assist*.

Door bestuurders te waarschuwen voor implicaties van verkeersborden die ze mogelijk hebben gemist, kan dit systeem helpen bij het naleven van verkeersregels en het voorkomen van ongevallen.

Er is één studie gevonden met cijfers over de impact van TSR. Deze tonen aan dat TSR leidt tot een reductie van 7% van het aantal ongevallen (Verbond van Verzekeraars, 2024) (*Tabel 1*).

3.3.5 Surround Vision (SV)

Surround Vision (SV) biedt een beeld van de omgeving achter het voertuig door middel van camera's. Er zijn ook varianten met camera's geplaatst aan de voor-, zij- en/of achterkant die tot een volledig 'surround' (360°) beeld kunnen bieden. Het beeld wordt weergegeven op het dashboarddisplay, waardoor de bestuurder een overzicht heeft bij het parkeren of manoeuvreren. Andere namen voor dit soort systemen zijn: *Rear Vision Camera*, *360-Degree Camera*, *Surround Vision*, *Around View Monitor* en *Bird's Eye View Camera*.

Camera's kunnen parkeerschade en ongevallen met voetgangers helpen voorkomen door beter zicht te bieden en blinde hoeken te elimineren. Cijfers suggereren dat tussen 5% en 24% van het aantal parkeer-gerelateerde ongevallen hiermee kan worden voorkomen (Cicchino, 2019; Insurance Institute for Highway Safety, 2021; 2023; Leslie et al., 2021). Doordat dit type ongeval een gering aandeel heeft op het totaal, is de totale impact op het aantal ongevallen beperkt (<1%).

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers ligt tussen -0,4% en -0,5%, afhankelijk van de gekozen correctie. Dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*)

3.3.6 Blind Spot Warning (BSW)

Blind Spot Warning (BSW) gebruikt camera, radar of sonarsensoren om voertuigen in de dode hoek(en) van de bestuurder te detecteren, en waarschuwen de bestuurder met een licht- of geluidssignaal. Sommige systemen kunnen ook actief ingrijpen door te remmen of te sturen. Andere namen zijn *Blind Spot Monitoring System*, *Blind Spot Detection* en *Blind Spot Assist*. Het operationeel domein beslaat stad en snelwegen. BSW helpt vooral potentiële ongevallen te voorkomen bij rijstrookwisselingen, wat een van de meest voorkomende ongevalsscenario's is. Cijfers over de veiligheidsimpact zijn doorgaans positief. Spicer et al. (2018) rapporteren een reductie van 14% op alle ongevallen; Yue et al. (2019) rapporteren een afname van 12,6% op dodehoekongevallen. Cijfers specifiek over ongevallen bij rijbaanwisselingen zijn consistent, en variëren tussen 9% en 16,6% (Cicchino, 2018; Leslie et al., 2021; Masello et al., 2022; Spicer et al., 2018; Spicer et al., 2021; Yue et al., 2019). Er zijn twee uitzonderingen: het Insurance Institute for Highway Safety (2021) vindt geen effect van BSW; het Verbond Van Verzekeraars (2024) vindt een *toename* van 5%. De auteurs vermoeden echter dat dit een anomalie is (persoonlijke communicatie).

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers ligt tussen -1,0% en -4,2%, afhankelijk van de gekozen correctie. Dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*)

3.3.7 Assisted Parking (AP)

Assisted Parking (AP) helpt bestuurders om in en uit parkeerplaatsen te manoeuvreren door het stuur, de remmen en soms het gas automatisch te bedienen. Het systeem gebruikt ultrasone sensoren en camera's om een model van de omgeving te maken. Andere namen voor dit systeem zijn *Park Assist*, *(Rear) Parking Assistance* en *Automatic Parking Assist*. Park Assist vermindert voornamelijk het risico op parkeerschade.

Cijfers van het Verbond Van Verzekeraars geven aan dat een informerende versie van het systeem een positief effect heeft op de veiligheid, met een reductie van 6% van het totale aantal ongevallen (Verbond van Verzekeraars, 2024). Andere studies noemen een reductie van 2% (Cicchino, 2019) en 36% van het aantal parkeer-gerelateerde ongevallen (Spicer et al., 2018). Het Insurance Institute for Highway Safety (2021) vindt een toename van 1,9%, maar de bevinding is niet statistisch significant.

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers ligt tussen -0,4% en -0,7%, afhankelijk van de gekozen correctie. Dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*)

3.3.8 Rear Collision Warning (RCW)

Rear Collision Warning (RCW) waarschuwt de bestuurder voor kruisend verkeer wanneer het voertuig achteruitrijdt, bijvoorbeeld bij het uitrijden van een parkeerplaats. Het systeem maakt gebruik van radarsensoren die voertuigen en personen detecteren die van de zijkant naderen. Andere namen voor dit systeem zijn *Rear Cross Traffic Alert*, *Rear Cross Traffic Detection* en *Cross Traffic Alert*.

Studies tonen aan dat RCW tussen 12% en 55% van parkeer-gerelateerde ongevallen kan voorkomen (Cicchino, 2019; Insurance Institute for Highway Safety, 2023; Leslie et al., 2021). Omdat dit type ongeval echter een beperkt aandeel heeft in het totaal, ligt de impact op het totale aantal ongevallen waarschijnlijk aanzienlijk lager.

De mediaan van de (voor aandeel gecorrigeerde) cijfers ligt tussen -0,3% en -0,6%, afhankelijk van de gekozen correctie. Dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*)

3.4 Monitoring: inzittenden

3.4.1 Driver Monitoring Systems (DMS)

Onder Driver Monitoring Systems (DMS) vallen Distraction/Inattention Detection (DMS-I) en Drowsiness/Fatigue Detection (DMS-F).

DMS-I gebruikt voornamelijk camera's om te monitoren of de bestuurder de aandacht bij de rijtaak heeft. Het waarschuwt wanneer de bestuurder afgeleid is, bijvoorbeeld wanneer een bestuurder te lang niet naar de weg kijkt. Andere namen zijn *Driver Distraction Monitoring*, of *Driver (In)Attention Detection*. DMS-I kan bijdragen aan vermindering van het aantal ongevallen door afleiding.

DMS-F monitort de rijstijl (stuur-inputs) van de bestuurder en andere parameters, zoals gezichtsynamiek, om tekenen van vermoeidheid te detecteren. Bij positieve detectie waarschuwt het systeem de bestuurder met een visueel of akoestisch signaal of door suggesties te geven om een pauze te nemen. Andere namen voor dit systeem zijn *Driver Fatigue Detection* of *Driver Drowsiness Alert*. DMS-F kan het risico op ongevallen door vermoeidheid aanzienlijk verminderen door bestuurders te waarschuwen voordat ze in slaap vallen.

DMS moeten, per EU-regulering, actief zijn bij snelheden vanaf 70km/uur, waardoor het operationeel domein uitkomt op autowegen en snelwegen.

Er zijn twee studies gevonden met gecombineerde cijfers voor DMS-F en DMS-I (afleiding; *Tabel 1*). Deze suggereren dat DMS 10% (mediaan van -6% en -14%) van de ongevallen kunnen voorkomen (Aleksa et al., 2024; Verbond van Verzekeraars, 2024). In het bijzonder omdat er slechts twee datapunten zijn, is het de moeite van het vermelden waard dat de studie van het Verbond van Verzekeraars (2024) een evaluatie is van een grote set van verzekeringsdata, met bijna 700.000 voertuigen waarvan 15% minstens één ongeval hadden. Dit geeft de observatie een aanzienlijk gewicht. De mediaan van -10% duidt op een voordelig effect op de verkeersveiligheid.

3.4.2 Alcohol Lock (AL)

Een Alcohol Lock (alcoholslot; AL) vereist dat de bestuurder een ademtest aflegt voordat de auto kan worden gestart en ter verificatie ook tijdens het rijden. Als het alcoholgehalte boven een vooraf ingestelde limiet ligt, wordt het starten van het voertuig geblokkeerd. Het systeem wordt toegepast op voertuigen van bestuurders met een geschiedenis van rijden onder invloed, of in commerciële voertuigen. Andere namen zijn *Ignition Interlock Device* en *Alcohol Interlock*.

Data uit de VS suggereren dat alcoholgebruik zo'n 7% van de ongevallen veroorzaakt (De Winkel, Christoph & Van Nes, 2024). In de factsheet 'Rijden onder invloed van alcohol' noemt SWOV dat 12-23% van het aantal verkeersdoden valt als gevolg van alcohol in het verkeer (SWOV, 2023); De Winkel, Christoph en Van Nes (2024) berekenen 24,7% van het aantal verkeersdoden. Deze percentages geven een bovengrens voor de verkeersveiligheidsimpact van AL. Aleksa et al. (2024) berekenen een potentieel effect van -0,8% van de ongevallen bij een penetratiegraad van 20%. Cijfers over de impact op het aantal ongevallen uit de praktijk zijn niet gevonden.

De mediaan van de genoemde cijfers is -3,9%, wat duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid (*Tabel 1*).

3.5 Monitoring: voertuig

3.5.1 Post-Collision Braking (PCB)

Post Collision Braking (PCB) activeert de remmen na een eerste botsing om het voertuig tot stilstand te brengen en verdere aanrijdingen te voorkomen. Het systeem wordt geactiveerd door airbags of andere impactdetectiesystemen. Andere namen voor dit systeem zijn *Post-Crash Braking* en *Secondary Collision Mitigation*. Het systeem kan secundaire (ketting-) botsingen voorkomen en de algehele ernst van ongevallen verminderen.

De literatuurstudie heeft geen cijfers opgeleverd over de impact van dit type ADAS.

3.5.2 Tire Pressure Monitoring System (TPMS)

Een Tire Pressure Monitoring System (TPMS) monitort de bandenspanning en waarschuwt de bestuurder als een band te zacht is. Het systeem gebruikt sensoren in de banden, telt het aantal omwentelingen van wielen, of gebruikt het ABS-systeem om de druk te schatten. Een andere naam voor TPMS is *Tire Pressure Alert*. Een correct werkend TPMS kan klapbanden en de daaruit voortkomende ongevallen voorkomen.

Cijfers over de impact van dit soort systemen op de verkeersveiligheid zijn niet gevonden.

3.5.3 Adaptive Headlights (AH)

Adaptive Headlights (AH) wordt hier gebruikt als verzamelnaam voor een aantal systemen die de richting en intensiteit van de koplampen aanpassen op basis van de snelheid, stuurhoek en omgeving, waardoor de bestuurder beter zicht heeft in bochten en op wegen zonder straatverlichting, en/of tegenliggers niet verblind worden. Namen van systemen die onder deze noemer vallen zijn *Adaptive Front Lighting System*, *Smart Headlights*, *Curve Adaptive Headlights*, *High Beam Assist* en het merk-specifieke *IntelliBeam*.

Schattingen van de veiligheidseffecten variëren met de specifieke implementatie van het systeem. In onderzoek van het Insurance Institute for Highway Safety (2024) wordt gevonden dat *Curve Adaptive Headlights* tot een 3% reductie van het aantal frontale ongevallen leidt, maar dat *High Beam Assist*, wat het groot licht automatisch inschakelt, tot een *toename* van 17% van dat soort ongevallen kan leiden. Cijfers voor het totaal worden gegeven in (Insurance Institute for Highway Safety, 2021). Zij vinden voor dimlichtsystemen (e.g., *Smart Headlights*) een effect van -1,2%; en voor groot-licht systemen (e.g., *High Beam Assist*) een toename van 1,5%; qua richting consistent met de cijfers over frontale ongevallen. Een specifieke implementatie, het *IntelliBeam* systeem, zou volgens een schatting tussen 26% en 34% van het aantal nachtelijke ongevallen met voetgangers kunnen voorkomen (Leslie et al., 2021). Of dit cijfer naar Nederland generaliseert is onzeker, omdat hier bijvoorbeeld mogelijk meer straatverlichting is. Een simulatiestudie ten slotte schatte dat bij een 60% penetratiegraad van AH 4,3% van ongevallen zou kunnen worden voorkomen (Aleksa et al., 2024).

De mediaan van deze cijfers ligt tussen -0,4% en -0,6%, afhankelijk van correctie aan de hand van cijfers uit BRON of (Wang, 2019). Zie *Tabel 1*. Hoewel dit duidt op een positief effect op de verkeersveiligheid, is op basis van de verschillen in cijfers een aanbeveling onderscheid te maken naar subsystemen (e.g., adaptief dimlicht, automatische groot-licht systemen). Wanneer dit onderscheid gemaakt wordt, lijken *High Beam Assist*-systemen een nadelig effect op de verkeersveiligheid te hebben; afhankelijk van de gekozen correctie een toename in aantal ongevallen met 1,9% tot 2,4%, terwijl andere adaptieve verlichtingssystemen juist positief bijdragen aan de verkeersveiligheid (-1,2%).

3.6 Informatiesystemen

3.6.1 Navigation Systems (NAV)

Navigatiesystemen (NAV) bieden routebegeleiding door middel van gps-technologie. Ze berekenen de snelste of kortste route naar een bestemming en geven aanwijzingen via een display en/of spraak. NAV kunnen in principe gebruikt worden op alle soorten wegen, mits deze in kaart zijn gebracht.

Navigatiesystemen verminderen de noodzaak voor bestuurders om onderweg kaarten of smartphones te raadplegen, wat de afleiding vermindert en daarmee de veiligheid verhoogt. Ook kunnen systemen bijdragen aan veiligheid door onnodig omrijden en files te vermijden. Er zijn geen recente cijfers gevonden over de impact van NAV op verkeersveiligheid. Een inmiddels gedateerde schatting is dat 5%-7% van de gereden kilometers omrijkilometers zijn. Bij gelijk risico voor doelbewust gereden kilometers zou daarom een reductie in ongevalsfrequentie van 6% kunnen worden genomen (Oei, 2003).

3.6.2 Traffic Information Systems (TIS)

Traffic Information Systems (TIS) verzamelen en verstrekken realtime verkeersinformatie aan bestuurders, inclusief files, ongevallen en wegafsluitingen. Het systeem gebruikt data van wegbeheerders en andere voertuigen en kan worden gezien als aanvulling op NAV. Andere namen voor TIS zijn *Traffic Information Service*, *Real-Time Traffic Information*. Enerzijds zouden TIS kunnen bijdragen aan veiligheid door bestuurders tijdig te waarschuwen voor verkeersopstoppen en gevaarlijke situaties; anderzijds zou hierdoor ook een toename van sluipverkeer kunnen ontstaan, wat een negatief effect kan hebben op de verkeersveiligheid.

Er zijn geen cijfers bekend over de impact van TIS.

3.7 Overzichtswaergave

Tabel 1 op de volgende pagina's geeft een overzicht van de (geschatte) verandering in het aantal ongevallen voor individuele ADAS. ADAS zijn ondergebracht in de categorieën *Longitudinale controle*, *Laterale controle*, *Monitoring: omgeving*, *Monitoring: inzittenden*, *Monitoring: voertuig*, en *Informatiesystemen*. Voor elk systeem wordt het acroniem genoemd dat wordt gehanteerd in de tekst, de modus, dat wil zeggen het karakter (informerend, waarschuwend, ingrijpend of comfort-verhogend), inschattingen van de accuratesse van het systeem, effecten op het gedrag van de bestuurder, het operationeel domein (ODD, waarbij V staat voor 'alle'), de inschatting van effecten uit de voorganger van dit rapport (Vlakveld, 2019), het aantal datapunten (n. obs), en het geschatte effect, in termen van het percentage verandering van het aantal ongevallen door elk systeem (negatieve cijfers staan voor een reductie van het aantal ongevallen). Daarbij noemen we het kleinst gevonden effect (min.), de mediaan (M) en het grootst gevonden effect (max.). Ook noemen we het aantal observaties en de mediaan wanneer we alleen praktijkdata beschouwen. Wanneer cijfers uit de literatuur betrekking hadden op een subset van het aantal ongevallen of van bestuurders, zijn de cijfers gegeneraliseerd naar het totaal aan de hand van schattingen van hun aandeel. Deze correctie is gedaan aan de hand van cijfers over het aandeel van zulke subsets op het totaal. Hiervoor zijn data gebruikt uit twee bronnen (Rijkswaterstaat, 2024; Wang, 2019). Wanneer de resultaten verschillen, worden die op basis van correctie met data van (Wang, 2019) tussen haakjes weergegeven.

Tabel 1. Overzicht van de (geschatte) verandering in het aantal ongevallen voor individuele ADAS.

Acroniem systeem			Gedragsadaptatie				Effectschattingen								
			Negatief		Positief										
							Alle data				Praktijkdata				
Modus	Accuratesse	Overtrust	Undertrust	ODD	R-2019-14	n. obs	min.	M	max.	n. obs	M				
Longitudinale controle															
CC	comfort verhogen	++	afleiding		beperken vermoeidheid	autosnelweg	1	12,0		12,0		12,0		1	12,0
ACC	comfort verhogen	+	afleiding; overmoed		beperken vermoeidheid	autosnelweg; tegenstrijdig filerijden	3	-4,4		1,8		8,0		1	8,0
SLIF	informereren	+/-	afleiding	onbruik	✓	+/-	2	-3,9		-3,7		-3,5		0	-
ISA	waarschuwen	+/-	afleiding; overmoed	onbruik	✓	+	2	-8,0		-6,6		-5,2		0	-
SCF	ingrijpen	+/-	afleiding; overmoed	onbruik	✓	++	2	-7,0		-7,0		-6,9		0	-
FCW	waarschuwen	+/-	afleiding; overmoed		✓	+/-	5	-44,9		-12,0	(-13,2)	-4,3		4	-8,7 (-9,6)
AEB	ingrijpen	+/-			✓	+	14	-41,0		-10,7	(-11,8)	0,0		7	-10,7 (-11,8)
RAB	ingrijpen	+/-				achteruit rijden	2	-1,2	(-2,1)	-1,2	(-2,1)	-1,2	(-2,0)	2	-1,2 (-2,1)
Totaal/mediaan							31	-5,7		-5,2		-2,4		15	-1,2
Laterale controle															
LDW	waarschuwen	+/-		onbruik		autoweg; autosnelweg	+/-	6	-84,1		-4,2	(-4,1)	0,0	4	-3,1 (-2,5)
LKA	ingrijpen	+/-		onbruik		autoweg; autosnelweg	onbekend	3	-37,0		-1,2	(-1,7)	-0,1 (-0,3)	2	-19,1 (-19,4)
ELK	ingrijpen	+/-				autoweg; autosnelweg		0	-		-		-	0	-

Acroniem systeem			Gedragsadaptatie				Effectschattingen									
			Negatief		Positief	ODD	R-2019-14	Alle data				Praktijkdata				
			Overtrust	Undertrust	n. obs			min.	M	max.	n. obs	M				
LC	comfort verhogen	+/-	gebruik buiten ODD	beperken vermoeidheid	autoweg; autosnelweg		0	-		-		-		0	-	
AES	ingrijpen	+/-			autoweg; autosnelweg		0	-		-		-		0	-	
Totaal/mediaan							9	-60,6		-2,7		-0,1		6	-11,1	
Monitoring: omgeving																
AEB VRU	waarschuwen	+		onbruik	lage snelheid	onbekend	7	-78,9		-0,3		0,3		5	-0,3	
CSW	waarschuwen	+/-		onbruik	autoweg; autosnelweg		0	-		-		-		0	-	
RED	waarschuwen	+/-		onbruik	slecht wegdek		0	-		-		-		0	-	
TSR	informer	+/-			∅		1	-7,0		-7,0		-7,0		1	-7,0	
SV	informer	++			achteruit rijden	+/-	4	-1,2		-0,4	(-0,5)	-0,1		4	-0,4	(-0,5)
BSW	waarschuwen	++		onbruik	∅	+/-	10	-14,0		-4,2	(-1,0)	5,0		8	-3,5	(-0,6)
AP	comfort verhogen	+/-	afleiding; overmoed		achteruit rijden		5	-6,0		-0,4	(-0,7)	1,9		5	-0,4	(-0,7)
RCW	waarschuwen	+/-		onbruik	achteruit rijden		3	-0,8	(-1,4)	-0,3	(-0,6)	-0,2	(-0,3)	3	-0,3	(-0,6)
Totaal/mediaan							30	-6,5		-0,4		0,1		26	-0,4	

Acroniem systeem	Modus	Accuratesse	Gedragsadaptatie		ODD	R-2019-14	Effectschattingen									
			Negatief	Positief			Alle data				Praktijkdata					
			Overtrust	Undertrust			n. obs	min.	M	max.	n. obs	M				
Monitoring: inzittenden																
DMS	waarschuwen	+		onbruik	autoweg; autosnelweg	onbekend	2	-14,0		-10,0		-6,0		1	-14,0	
AL	ingrijpen	++		abstinentie	Ingebruik- name	++	2	-7,0		-3,9		-0,8		0	-	
Totaal/mediaan								4	-10,5		-7,0		-3,4		1	-14,0
Monitoring: voertuig																
PCB	ingrijpen	++				na crash	0	-		-		-		0	-	
TPMS	waarschuwen	++				✓	0	-		-		-		0	-	
AH	ingrijpen	+/-				donker	7	-4,3		-0,4	(-0,6)	2,2 (3,3)		6	0,5	
Totaal/mediaan								7	-4,3		-0,4		2,2		6	0,5
Informatiesystemen																
Navigation	informer	++		afleiding		✓	1	-6,0		-6,0		-6,0		0	-	
TIS	informer	++		afleiding		✓	0	-		-		-		0	-	
Totaal/mediaan								1	-6,0		-6,0		-6,0		0	-

4 Combinaties van ADAS

De in het voorgaande hoofdstuk behandelde individuele ADAS ondersteunen de mens bij de uitvoering van specifieke aspecten van de rijtaak, of nemen deze helemaal over. Een volledig autonoom voertuig (Society of Automotive Engineers (SAE) Level 5), zal in staat moeten zijn adequaat te reageren op iedere voorkomende situatie. Een SAE L5-voertuig zal daarom moeten beschikken over een breed scala aan ADAS, die samen een integraal systeem vormen dat de vaardigheden van een menselijke bestuurder op zijn minst evenaart. Hoewel autonome voertuigen nog niet op de weg zijn, zijn nieuwe voertuigen, conform Europese wetgeving, al voorzien van diverse ADAS. Zo maken voertuigen van SAE Level 1 (longitudinale óf laterale controle) en SAE Level 2 (longitudinale én laterale controle) al deel uit van het wagenpark, en zijn er veelvoorkomende combinaties van ADAS die vallen onder SAE Level 0, zoals een automatisch noodremsysteem (AEB) in combinatie met een waarschuwend systeem (FCW). In dit hoofdstuk wordt een overzicht gepresenteerd van beschikbare cijfers over de veiligheids-impact van combinaties van systemen aan de hand van de classificatieniveaus van de SAE.

4.1 SAE Level 0 – combinaties van ADAS

SAE-niveau 0 wordt *No Driving Automation* genoemd. Dit betekent echter niet dat voertuigen in niveau 0 niet voorzien kunnen zijn van ADAS; voertuigen uit niveau 0 zijn alleen niet voorzien van Adaptive Cruise Control (ACC) en/of Lane Centering (LC), en nemen de bestuurder de longitudinale en/of laterale controle dus niet uit handen. Cijfers over de veiligheidseffecten van alle gevonden combinaties die onder dit niveau vallen zijn te vinden in de overzichtsweergave aan het eind van dit hoofdstuk (*Tabel 2*). Voor een tweetal veel voorkomende combinaties beschouwen we de cijfers hieronder nader.

4.1.1 LDW×LKA

Lane Departure Warning (LDW) en Lane Keep Assist (LKA) zijn beide systemen uit de categorie laterale controle. Het eerste systeem geeft de bestuurder een waarschuwing wanneer deze de rijstrook dreigt te verlaten zonder de richtingaanwijzer te hebben geactiveerd; het tweede systeem grijpt in door stuurcorrecties uit te voeren. Dat deze systemen samen worden geïmplementeerd, is daarom voor de hand liggend. Afzonderlijk ligt het geschatte veiligheidseffect voor LDW tussen -4,1% en -4,2%, en voor LKA tussen -1,2% en -1,7%. Een zestal studies uit het literatuuronderzoek geeft acht observaties over deze combinatie van systemen (Aleksa et al., 2024; Aukema et al., 2023; Insurance Institute for Highway Safety, 2024; Leslie et al., 2021; Spicer et al., 2021; Sternlund et al., 2017). De hieruit gedestilleerde cijfers suggereren een gezamenlijk effect tussen -1,4% en -1,9% (zie *Tabel 2*). Omdat de schatting gebaseerd is op slechts een klein aantal (Internationale) bronnen, is de generaliseerbaarheid van dit resultaat mogelijk beperkt. Desondanks geeft de bevinding in ieder geval geen aanwijzingen dat de systemen elkaar aanvullen, in de zin dat de combinatie tot minder ongevallen leidt dan de systemen afzonderlijk.

4.1.2 FCW×AEB

Net als in het geval van LDW×LKA zijn Forward Collision Warning en Autonomous Emergency Braking systemen uit dezelfde categorie, maar dan uit de categorie longitudinale controle. Ook hier verzorgt het eerste systeem een waarschuwing in het geval van een dreigende botsing. AEB kan worden gezien als overtreffende trap en grijpt in bij een dreigende botsing door te remmen. Afzonderlijk liggen de geschatte veiligheidseffecten van AEB tussen -10,7% en -11,8%; voor FCW is dat tussen -12% en -13,2%.

De literatuurstudie heeft drie observaties opgeleverd over specifiek deze combinatie van systemen (Aleksa et al., 2024; Aukema et al., 2023; Insurance Institute for Highway Safety, 2024). Samengenomen suggereren deze studies een effect voor de combinatie van systemen tussen -13,1% en -14,4%. Ook in dit geval moet rekening gehouden worden met het kleine aantal observaties. De gevonden cijfers suggereren dat deze combinatie van systemen een iets sterker veiligheidsbevorderend effect heeft dan de effecten van de twee systemen afzonderlijk.

4.2 SAE Level 1 – laterale óf longitudinale controle

Onder SAE-niveau 1 vallen systemen die een bestuurder óf de laterale (LC), óf de longitudinale controle (ACC) van het voertuig volledig uit handen nemen. De literatuurstudie heeft cijfers voor zes systemen opgeleverd die onder dit automatiseringsniveau vallen, waarvan één de laterale controle overneemt (Aukema et al., 2023) en vijf longitudinale controle (Insurance Institute for Highway Safety, 2024). Technisch gezien vallen LC en ACC als individuele systemen (dat wil zeggen, niet in combinatie met andere systemen) ook onder dit niveau. Omdat die cijfers al zijn gepresenteerd onder de individuele systemen worden ze hier niet herhaald.

4.2.1 Laterale controle

Het gevonden systeem voor laterale controle combineert dit met waarschuwingssystemen (LDW, LKA) en heeft een geschatte impact tussen -1,7% en -0,5%. Voor LC op zichzelf zijn geen cijfers bekend. Cijfers van het Verbond Van Verzekeraars voor LDW (-15%) en LKA (-37%) zijn aanzienlijk positiever over de impact van de individuele waarschuwende systemen (Verbond van Verzekeraars, 2024).

4.2.2 Longitudinale controle

Cijfers over de veiligheidseffecten van ACC als op zichzelf staand systeem zijn tegenstrijdig, en variëren voor normale omstandigheden tussen -4,4% en +8% ongevallen. De geschatte veiligheidseffecten van de gecombineerde longitudinale controlesystemen variëren tussen 0% en -58%. Het slechtst scorende systeem betrof echter alleen de impact op dodelijke ongevallen (Utriainen & Pöllänen, 2021). De overige drie systemen hadden duidelijk voordelige effecten van -25,1%, -54% en -58% (Insurance Institute for Highway Safety, 2024; Naumann et al., 2023). De beste resultaten daaronder komen uit een simulatiestudie, waar doorgaans zeer optimistische aannames worden gedaan die mogelijk niet generaliseren naar de werkelijkheid. De mediaan van effecten ligt tussen -14,4% en -15,9%, afhankelijk van correctie aan de hand van BRON of (Wang, 2019). Gegeven de inconsistente effecten van ACC op zich, zijn de geobserveerde positieve effecten waarschijnlijk toe te schrijven aan de waarschuwende en ingrijpende systemen die deel uitmaken van deze combinaties, voornamelijk FCW en AEB; niet aan de comfort-verhogende systemen.

4.3 SAE Level 2 – laterale én longitudinale controle

4.3.1 Automatic Parking (AUP)

Automatic parking is een autonoom opererende variant van Assisted Parking (AP). Het systeem gebruikt ultrasone sensoren en camera's om een model van de omgeving te maken en stuurt het voertuig zelfstandig in een parkeervak, waarbij de bestuurder enkel de rem bedient. Een andere benaming voor dit systeem is *Independent Parking*.

Uit de studie van het Verbond van Verzekeraars op basis van ongevallendata bleek dat autonoom opererende systemen een negatieve impact hadden op het aantal ongevallen; er werd een toename van 5% ongevallen gevonden (Verbond van Verzekeraars, 2024). Het Insurance Institute for Highway Safety (2021) vond echter een afname van het aantal ongevallen (-7,9%). De mediaan van de twee AP-systemen ligt op -1,5% (Tabel 2).

4.3.2 Partial Driving Automation (L2)

Verschillende fabrikanten leveren voertuigen uitgerust met systemen die longitudinale en laterale controle overnemen tijdens het rijden. Voorbeelden zijn Nissan ProPILOT, BMW Driving Assistant Plus en Tesla Autopilot. Cijfers over ongevallenreductie voor voertuigen met deze systemen ten opzichte van voertuigen zonder variëren tussen voertuigen van verschillende fabrikanten, en variëren tussen -3,6% en -18,2% (Insurance Institute for Highway Safety, 2021; 2024). Opvallend is dat de mediaan van de effecten voor met -5,2% tot -5,9% beduidend lager ligt dan die van SAE niveau 1-systemen (respectievelijk -11,5% en -12,2%).

4.4 Verwachtingen voor combinaties over ADAS-categorieën

Voertuigen worden steeds vaker en van telkens meer ADAS voorzien. Het is daarbij nuttig om een inschatting te kunnen maken hoe combinaties van systemen de verkeersveiligheid beïnvloeden. Voor combinaties van onafhankelijke systemen, bijvoorbeeld wanneer systemen een niet-overlappend operationeel domein hebben (e.g., longitudinale vs. laterale controle) en andersoortige ongevallen voorkomen, kan worden aangenomen dat de veiligheidseffecten elkaar aanvullen. Deze aanname kan worden gedaan voor systemen uit de verschillende categorieën die zijn gehanteerd voor individuele ADAS (longitudinale controle, laterale controle, monitoring: omgeving, inzittenden, voertuig). De gecombineerde effecten zijn echter geen eenvoudige som van de geobserveerde reducties in ongevallencijfers – dit zou kunnen uitkomen op gecombineerde effecten groter dan 100%. Voor elk extra systeem geldt dat het een reductie in het aantal ongevallen zou kunnen geven op het percentage ongevallen dat resteert na de reductie verkregen door toepassing van het voorgaande systeem. Dit idee wordt gevat in de volgende productregel:

$$\eta_c = 1 - \prod_i (1 - \eta_i),$$

waarbij η_c staat voor de prestatie van combinaties van systemen, en η_i voor de prestatie van elk individueel systeem i . Deze formule komt uit betrouwbaarheids- en systeemanalyse (Elvik, 2009).

Rekenend met de mediaan van het percentage reductie in aantal ongevallen per categorie, becijferen we een gecombineerde reductie in het aantal ongevallen van 20%⁴. Dit cijfer kan worden gezien als een theoretisch veiligheidseffect voor een voertuig met één typisch systeem van de huidige generatie ADAS uit elke categorie.



4. Rekenend met de mediaan over alle gevonden cijfers per categorie (zie Tabel 1), wordt de berekening: $\eta_c = 1 - (1 - 0,052)(1 - 0,027)(1 - 0,004)(1 - 0,07)(1 - 0,004)(1 - 0,06) = 20,0\%$; rekenend met alleen cijfers uit de praktijk wordt de berekening: $\eta_c = 1 - (1 - 0,012)(1 - 0,111)(1 - 0,004)(1 - 0,14)(1 + 0,005) = 24,4\%$

4.5 Overzichtswaergave

Tabel 2 op de volgende pagina geeft een overzicht van de (geschatte) verandering in het aantal ongevallen voor combinaties van ADAS. Combinaties van ADAS zijn ondergebracht onder verschillende automatiseringsniveaus, zoals gespecificeerd door de Society of Automotive Engineers (SAE International/ISO, 2021). Voor elk in de literatuur gevonden systeem wordt de combinatie aangeduid door middel van de acroniemen van individuele systemen. We noemen het aantal datapunten (n. obs), en het geschatte effect, in termen van het percentage verandering van het aantal ongevallen door elk systeem (negatieve cijfers staan voor een reductie van het aantal ongevallen). Daarbij noemen we het kleinst gevonden effect (min.), de mediaan (M) en het grootst gevonden effect (max.). Wanneer cijfers uit de literatuur betrekking hadden op een subset van het aantal ongevallen of van bestuurders, zijn de cijfers gegeneraliseerd naar het totaal aan de hand van schattingen van hun aandeel. Dit is gedaan aan de hand van cijfers over het aandeel van zulke subsets op het totaal, op basis van twee verschillende bronnen (Rijkswaterstaat, 2024; Wang, 2019). Wanneer de resultaten van de correctie verschillen, worden die op basis van (Wang, 2019) tussen haakjes weergegeven. Minima en maxima worden alleen weergegeven wanneer er meer dan één datapunt voor een combinatie beschikbaar is.

Tabel 2. Overzicht van de (geschatte) verandering in het aantal ongevallen voor combinaties van ADAS.

Acroniemen	Effectschattingen						
	n.obs	min.		M		max.	
SAE niveau 0: No Driving Automation							
FCW, AEB	3	-24,2		-13,1	(-14,4)	-13,1	(-14,4)
LDW, AEB	2	-57,0		-40,0		-23,0	
LDW, LKA	8	-6,3	(-8,8)	-1,4	(-1,9)	0,0	
SV, RPA	1			-0,6	(-1,1)		
SV, RPA, RAB	1			-1,2	(-2,0)		
FCW, LDW	1			1,2			
FCW, LDW, AEB	1			-7,0			
Subtotaal/mediaan	17	-6,3	(-7)	-1,4	(-2,0)	-1,2	(-2,0)
SAE niveau 1: Driver Assistance							
ACC, FCW, AEB	1			-14,4	(-15,9)		
AEB, ACC	1			0,0	(-0,1)		
BSMS, VRU, LDW, FCW, ACC, AES, AEB-F, LKA	1			-25,1			
LDW, AEB, ACC, LKA	1			-58,0			
LDW, LKA, LCA	1			-0,5	(-1,7)		
FCW, LDW, AEB, ACC	1			-8,6			
Subtotaal/mediaan	6			-11,5	(-12,2)		
SAE niveau 2: Partial Automation							
ACC, LCA, FCW, AEB	1			-16,6	(-18,2)		
ACC, LCA, LDW, LDP	2	-4,7	(-6,6)	-3,6	(-5,1)	-2,6	(-3,7)
AP	2	-7,9		-1,5		5,0	
FCW, LDW, AEB, ACC, VRU, LC	1			-6,7			
Subtotaal/mediaan	6	-7,3		-5,2	(-5,9)	-4,7	(-5,2)
Totaal/mediaan	29	-7,0	(-7,9)	-6,7		-6,7	

5 Discussie

In dit rapport is een overzicht opgesteld van recente cijfers over de verkeersveiligheidsimpact van ADAS. De resultaten van het onderzoek laten zien dat de meeste ADAS een veiligheidswinst opleveren, in termen van een reductie in het aantal ongevallen. We zien ook dat de impact van ADAS varieert, afhankelijk van het type systeem en de context waarin het wordt gebruikt. Individuele systemen die zeer effectief zijn in het voorkomen van zeldzame ongevallen, kunnen een kleiner effect hebben op de algehele verkeersveiligheid dan systemen die minder effectief zijn maar wel bijdragen aan het voorkómen van veelvoorkomende ongevallen. Combinaties van systemen bieden kleinere voordelen dan zou kunnen worden verwacht op basis van combinaties van cijfers voor de onderliggende individuele systemen. In dit hoofdstuk worden de voornaamste bevindingen nader beschouwd: eerst voor individuele systemen en dan voor combinaties van systemen. Tot slot bespreken we de beperkingen van dit onderzoek en doen we enkele aanbevelingen.

5.1 Individuele ADAS

Naast het vergroten van comfort, is een argument om voertuigen van ADAS te voorzien dat deze de veiligheid vergroten. Consistent met de verwachtingen uit de voorganger van dit rapport (Vlakveld, 2019) vinden we voor het grootste deel van de systemen een voordelig effect op de verkeersveiligheid. Wanneer we de onderzochte systemen rangschikken naar impact op het aantal ongevallen, vinden we Forward Collision Warning (FCW) en Autonomous Emergency Braking (AEB) respectievelijk op de eerste en tweede plaats, met een reductie in het aantal ongevallen tussen 12,0% en 13,2% voor FCW, en tussen 10,7% en 11,8% voor AEB.

De variatie in de cijfers per systeem komt door de gekozen methode voor correctie van specifieke ongevallen naar het totaal (Rijkswaterstaat, 2024; Wang, 2019). De cijfers voor FCW en AEB zijn gebaseerd op respectievelijk 5 en 14 datapunten, en geven daarmee een waarschijnlijk beeld van de daadwerkelijke impact van dit soort systemen. Dat FCW iets beter scoort dan AEB is opvallend, omdat AEB *ingrijpt* in een noodsituatie, terwijl FCW alleen *waarschuwt*. De scores liggen echter dicht bij elkaar.

Op de derde plaats komen Driver Monitoring Systems (DMS), met een effect van 10% (Aleksa et al., 2024; Verbond van Verzekeraars, 2024). Door het beperkt aantal cijfers is deze schatting minder zeker. Een studie naar het effect van het monitoren van de staat van de bestuurder op het aantal ongevallen, vindt bijvoorbeeld een potentiële reductie van 5,9% wanneer vermoeidheid volledig voorkomen zou kunnen worden (De Winkel, Christoph & Van Nes, 2024); het verwachte effect van het monitoren van afleiding is kleiner dan het effect van monitoren van vermoeidheid (De Winkel, Christoph & Van Nes, 2024; Dingus et al., 2016). Dit suggereert dat het gevonden effect van DMS een overschatting zou kunnen zijn.

De slechtst scorende systemen zijn Adaptive Cruise Control (ACC) en Cruise Control (CC), met *toenames* in het aantal ongevallen, met een mediaan van respectievelijk 1,8% en 12%. Hierbij geldt echter ook dat weinig datapunten beschikbaar zijn; drie voor ACC en maar één voor CC. Voor ACC was de richting van resultaten bovendien niet consistent, één studie vond een toename van het aantal ongevallen, maar de andere twee vonden een afname.

Opvallend is ook dat zowel de best scorende als de slechtst scorende systemen uit dezelfde categorie komen, namelijk longitudinale controle. Mogelijk reflecteert dit dat longitudinale controle voor ongevalsrisico de belangrijkste dimensie van voertuigcontrole is. Deze verklaring is in overeenstemming met de bevinding dat frontale en kop-staartbotsingen samen zo'n 40% van de ongevallen uitmaken, gevolgd door 30% flankbotsingen (Rijkswaterstaat, 2024).

Een hypothese over de oorzaak van het verschil tussen systemen met een voordelig effect en systemen met een nadelig effect, is een relatie met het karakter van systemen; het soort functionaliteit: systemen die waarschuwen of ingrijpen in noodsituaties lijken een voordelig effect te hebben, maar systemen die niet strikt gericht zijn op veiligheid (comfort-verhogende systemen) niet. Op basis van deze hypothese is de verwachting dat andere comfort-verhogende systemen, zoals Lane Centering (LC, waarvoor geen data beschikbaar zijn), een nadelig effect op ongevallencijfers kunnen hebben. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat comfort-verhogende systemen bestuurders verleiden op te gaan in afleidingen, terwijl constante supervisie een vereiste is.

Wanneer we de mediaan van de cijfers per categorie beschouwen, vinden we voor Longitudinale controle (-5,2%), Laterale controle (-2,7%) en Monitoring (omgeving: -0,3%, inzittenden: -7%, voertuig: -0,4%) een voordelig effect. Uit de categorie Informatiesystemen is alleen een schatting beschikbaar voor navigatiesystemen: geschat wordt dat deze 6% van het aantal gereden kilometers, en de daarmee gemoeide gevaren, voorkomen (Oei, 2003).

5.2 Combinaties van ADAS

Voor sommige combinaties van ADAS geldt dat de deelsystemen onafhankelijk van elkaar zijn; bijvoorbeeld wanneer de systemen een niet-overlappend operationeel domein hebben (e.g., stads- vs. snelwegverkeer). Voor andere systemen is dat duidelijk niet het geval, zoals bij de combinaties van FCW en AEB, of Lane Departure Warning, LDW) en Lane Keeping Assist (LKA), die uit dezelfde categorie komen en actief zijn onder dezelfde omstandigheden.

Wanneer we aannemen dat systemen uit de verschillende categorieën (longitudinale controle, laterale controle, monitoring: omgeving, inzittenden, voertuig) onafhankelijk van elkaar zijn, kan aan de hand van een productregel een voorspelling worden gedaan over het gezamenlijke effect (Elvik, 2009). Rekenend met de mediaan van systemen per categorie, komen we op een reductie in het aantal ongevallen van 20%. Dit percentage is veel positiever dan observaties voor combinaties van systemen uit de literatuur (mediaan SAE Level 0: -1,4%/-2,0%; L1: -11,5/-12,2%; L2 -5,2%/-5,9%, respectievelijk voor de twee correctiemethoden). Dit komt waarschijnlijk omdat de combinaties waarvoor data beschikbaar zijn geen combinaties zijn van één systeem uit elke categorie, maar combinaties van een paar systemen uit een enkele categorie, of een subset van categorieën; omdat systemen in combinaties, voornamelijk binnen categorieën, niet onafhankelijk zijn. Een andere mogelijke reden is onzekerheid in de verzamelde data. De becijferde 20% kan daarom het best beschouwd worden als een theoretisch veiligheidsvoordeel voor een auto met één typisch systeem van de huidige generatie ADAS uit elke categorie.

Een opvallende bevinding is dat (onder SAE Level 0) de meeste ADAS, ondanks individuele voordelen, niet altijd een groter veiligheidseffect lijken op te leveren wanneer ze worden gecombineerd. Voorbeelden hiervan zijn de combinatie van LDW (-4,2%/-4,1%) en LKA (-1,2%/-1,7%), waar de cijfers voor combinatie van de systemen (-1,4%/-1,9%) tussen die van de individuele systemen in liggen. Voor combinaties uit verschillende categorieën, zoals LDW en AEB/FCW, waar de individuele systemen andersoortige ongevallen zouden kunnen voorkomen, zijn de bevindingen inconsistent. Een simulatiestudie (Kitajima et al., 2022) vindt een zeer grote verbetering (-57%), maar een studie op basis van verzekeringsdata (Insurance Institute for Highway Safety, 2021) een verslechtering (+1.2%).

Beschouwd vanuit de hogere automatiseringsniveaus van de SAE zien we een verbetering voor SAE Level 1 (medianen -11,5%/-12,2%) (*Driver Assistance*) ten opzichte van Level 0 (*No Driving Automation*, medianen -1,4%/-2,0%), maar een verslechtering voor Level 2 (-5,2%/-5,9%) ten opzichte van Level 1. Wanneer systemen zijn ontworpen om eenzelfde type ongeval te voorkomen, ligt het in de lijn der verwachting dat een combinatie geen grote verbetering oplevert. Een verslechtering suggereert echter dat er onvoorziene negatieve interacties of neveneffecten optreden. Een mogelijke verklaring voor zulke negatieve effecten is dat combinaties van systemen kunnen leiden tot onverwachte gedragingen of verwarring bij de bestuurder. Dit is ook een risico voor combinaties van systemen uit verschillende categorieën. Bijvoorbeeld, het gelijktijdig gebruik van LC én ACC (Level 2-automatisering) kan leiden tot een vals gevoel van veiligheid, omdat het systeem in staat lijkt de rijtaak volledig over te nemen, waardoor de bestuurder minder alert is en mogelijk minder snel ingrijpt in gevaarlijke situaties.

5.3 Beperkingen

Hoewel dit rapport over het algemeen een positief beeld schetst van de effecten van geavanceerde rijhulpsystemen (ADAS) op de verkeersveiligheid, zijn er enkele belangrijke beperkingen die in overweging moeten worden genomen bij interpretatie en generalisatie van de bevindingen.

De belangrijkste beperking van dit onderzoek is de afhankelijkheid van secundaire data om veiligheidseffecten die zijn gevonden binnen een specifieke context of voor een bepaald soort ongevallen, te generaliseren naar een gemeenschappelijke maat. Dit komt voort uit een gebrek aan uniformiteit in hoe verschillende systemen worden getest en hoe erover wordt gerapporteerd, wat het maken van een vergelijking compliceert. Om desondanks toch een vergelijking te kunnen maken, is gebruikgemaakt van cijfers uit BRON (Rijkswaterstaat, 2024) en het onderzoek van (Wang, 2019); specifiek om in te schatten wat het aandeel is van zware en lichte voertuigen op het geheel, wat het aandeel dodelijke ongevallen is, welk aandeel ouderen hebben op het totaal van alle bestuurders, en welk percentage bepaalde typen ongevallen uitmaken van alle ongevallen. Omdat de verschillende bronnen gebaseerd zijn op verschillende contexten kan er sprake zijn van inconsistentie in de kwaliteit en betrouwbaarheid van de bevindingen. Bovendien wordt geen onderscheid gemaakt naar voertuigtype, fabrikant, of weersomstandigheden, wat de generaliseerbaarheid van de bevindingen mogelijk ook beperkt.

Daarnaast worden gegevens van verschillende soorten studies aangehaald om de effectiviteit van ADAS te beoordelen. Studies waar ongevallencijfers worden vergeleken tussen voertuigen met en zonder bepaalde systemen, geven een direct beeld van hun impact. In dit soort studies wordt gebruikgemaakt van ongevallendata van verzekeraars, voertuigfabrikanten of overheden. Het gaat hierbij om grote datasets: de meest omvangrijke studie onder de verzamelde literatuur evalueerde een dataset met 47 miljoen voertuigen en 2,4 miljoen ongevallen (Aukema et al., 2023); de kleinste dataset evalueerde 1.853 ongevallen met betrekking tot het verlaten van de rijbaan (Sternlund et al., 2017). De helft van de studies in de verzamelde literatuur, samen goed voor 77/111 observaties, betrof zulk onderzoek (Aukema et al., 2023; Cicchino, 2018; 2019; Fujiwara & Takechi, 2022; Insurance Institute for Highway Safety, 2021; 2023; 2024; Leslie et al.,

2021; Spicer et al., 2018; Spicer et al., 2021; Sternlund et al., 2017; Verbond van Verzekeraars, 2024). Door de omvang van de datasets is het waarschijnlijk dat de bevindingen kunnen worden gegeneraliseerd. Een kanttekening is dat in deze onderzoeken geen zekerheid bestaat dat de betreffende systemen actief waren.

Er zijn echter ook studies waarin ongevallen worden geanalyseerd en beoordeeld op hun gevoeligheid voorkomen te kunnen worden door ADAS, of microsimulatie-studies, waar modellen van voertuigen met ADAS worden vergeleken met modellen van voertuigen met een menselijke bestuurder. Hoewel dit soort studies waardevolle inzichten kunnen bieden, in het bijzonder voor systemen die nog niet of maar weinig in het wagenpark voorkomen, zijn ze afhankelijk van aannames die waarschijnlijk niet volledig overeenkomen met de werkelijkheid. De complexiteit van verkeerssituaties en menselijk gedrag kunnen niet volledig worden nagebootst, wat de nauwkeurigheid van de voorspellingen beïnvloedt en kan zorgen voor uitschieters. We hebben de impact van dit soort effecten op onze conclusies zoveel mogelijk beperkt door voor elk systeem als centrale tendens de mediaan (middelste score) te rapporteren, in plaats van het gemiddelde, dat sterker beïnvloed wordt door uitschieters.

De schaarste van data benadrukt de noodzaak van verder onderzoek naar de daadwerkelijke impact van diverse systemen; in het bijzonder voor die systemen waarvoor helemaal geen data zijn gevonden, zoals de categorie informatiesystemen (TIS) en diverse systemen voor laterale controle (ELK, LC, AES), voor monitoring van de omgeving (CSW, RED) en monitoring van het voertuig (PCB, TPMS).

Hierbij dient ook te worden opgemerkt dat de geraadpleegde studies vergelijkingen betroffen van ongevallencijfers tussen groepen met en zonder ADAS. Hieruit spreekt niet per se een causaal verband; er kunnen andere variabelen zijn die verschillen tussen groepen verklaren. Strikt genomen kunnen causale effecten van ADAS alleen worden vastgesteld in experimenteel onderzoek waarin groepen willekeurig gekozen bestuurders in voertuigen met en zonder ADAS voor een bepaalde periode worden gemonitord.

Voorts is het vermelden waard dat geen onderscheid wordt gemaakt tussen verschillende ernstklassen van ongevallen; we beschouwen alleen het totale aantal ongevallen. Vanuit verkeersveiligheidsoogpunt is het voorkomen van parkeerschades minder relevant dan het voorkomen van, bijvoorbeeld, ongevallen door het verlaten van de rijbaan of frontale botsingen met veel ernstiger afloop. Een analyse van effecten van ADAS op ongevallen met hogere niveaus van ernst dan materiële schade vereist een methodologie die daarop is toegespitst, met cijfers over de impact op specifiek dat soort ongevallen. Zulke cijfers zijn echter onvoldoende bekend voor het uitvoeren van een dergelijk onderzoek.

Ten slotte dient te worden opgemerkt dat ADAS voortdurend in ontwikkeling zijn. Ondanks dat de bevindingen in het algemeen als positief kunnen worden beschouwd, moeten deze resultaten worden gezien als een momentopname. Het is waarschijnlijk dat toekomstige iteraties van de hier gepresenteerde systemen minder of geen last meer zullen hebben van bepaalde beperkingen die de huidige generatie sensoren en algoritmen soms wel heeft (bijvoorbeeld werking onder slechte weersomstandigheden of in complexe verkeerssituaties).

5.4 Conclusies

De bevindingen van dit rapport schetsen in het algemeen een positief beeld van de impact van ADAS op de verkeersveiligheid. Mogelijke uitzonderingen zijn comfort-verhogende systemen zoals ACC, die bedoeld zijn om de bestuurder rijtaken uit handen te nemen wanneer dat niet noodzakelijk is voor de veiligheid. Het is aannemelijk dat toekomstige iteraties de huidige beperkingen zullen overwinnen en dat de veiligheidsbevorderende effecten verder zullen verbeteren. De inventaris van onderzoeken onthult verschillende gaten in de kennis van de veiligheidsimpact van ADAS in de praktijk. De variatie in de gevonden cijfers benadrukt dat de implementatie van ADAS niet zonder meer dient te worden bevorderd, maar dat deze technologieën op een verantwoorde en goed geïnformeerde manier moeten worden geïntegreerd in het verkeerssysteem. Dit betekent concreet dat er niet alleen moet worden gekeken naar de potentiële voordelen, maar dat de risico's en beperkingen van deze technologieën in de praktijk moeten worden geëvalueerd.

Literatuur

Aleksa, M., Schaub, A., Erdelean, I., Wittmann, S., et al. (2024). *Impact analysis of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) regarding road safety—computing reduction potentials*. In: European Transport Research Review, vol. 16, nr. 1, p. 39.

Aukema, A., Berman, K., Gaydos, T., Sienknecht, T., et al. (2023). *Real-world effectiveness of model year 2015-2020 advanced driver assistance systems*. In: Proceedings of the 27th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.

Cicchino, J.B. (2017). *Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates*. In: Accident Analysis & Prevention, vol. 99, p. 142-152.

Cicchino, J.B. (2018). *Effects of blind spot monitoring systems on police-reported lane-change crashes*. In: Traffic Injury Prevention, vol. 19, nr. 6, p. 615-622.

Cicchino, J.B. (2019). *Real-world effects of rear automatic braking and other backing assistance systems*. In: Journal of Safety Research, vol. 68, p. 41-47.

Cleij, D. (2021). *Road safety thematic report – Advanced driver assistance systems*. European Road Safety Observatory, European Commission, Brussels.

Council of the European Union (2019). *Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2019 on type-approval requirements for motor vehicles and their trailers, and systems, components and separate technical units intended for such vehicles, as regards their general safety and the protection of vehicle occupants and vulnerable road users, amending Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council and repealing Regulations (EC) No 78/2009, (EC) No 79/2009 and (EC) No 661/2009 of the European Parliament and of the Council and Commission Regulations (EC) No 631/2009, (EU) No 406/2010, (EU) No 672/2010, (EU) No 1003/2010, (EU) No 1005/2010, (EU) No 1008/2010, (EU) No 1009/2010, (EU) No 19/2011, (EU) No 109/2011, (EU) No 458/2011, (EU) No 65/2012, (EU) No 130/2012, (EU) No 347/2012, (EU) No 351/2012, (EU) No 1230/2012 and (EU) 2015/166 (Text with EEA relevance)*.

Dingus, T.A., Guo, F., Lee, S., Antin, J.F., et al. (2016). *Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data*. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 113, nr. 10, p. 2636-2641.

Doecke, S., Raftery, S., Elsegood, M. & Mackenzie, J. (2021). *Intelligent Speed Adaptation (ISA): benefit analysis using EDR data from real world crashes*. In: Age, vol. 26, nr. 21, p. 32.

Elvik, R. (2009). *An exploratory analysis of models for estimating the combined effects of road safety measures*. In: Accident Analysis & Prevention, vol. 41, nr. 4, p. 876-880.

European Commission (2021a). *Commission Delegated Regulation (EU) 2021/1341 of 23 April 2021 supplementing Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council by laying down detailed rules concerning the specific test procedures and technical requirements for*

the type-approval of motor vehicles with regard to their driver drowsiness and attention warning systems and amending Annex II to that Regulation (Text with EEA relevance).

European Commission (2021b). *Commission Delegated Regulation (EU) 2021/1958 of 23 June 2021 supplementing Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council by laying down detailed rules concerning the specific test procedures and technical requirements for the type-approval of motor vehicles with regard to their intelligent speed assistance systems and for the type-approval of those systems as separate technical units and amending Annex II to that Regulation (Text with EEA relevance).*

European Commission (2021c). *Commission Implementing Regulation (EU) 2021/646 of 19 April 2021 laying down rules for the application of Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council as regards uniform procedures and technical specifications for the type-approval of motor vehicles with regard to their emergency lane-keeping systems (ELKS) (Text with EEA relevance).*

European Parliament (2019). *Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2019 on type-approval requirements for motor vehicles and their trailers, and systems, components and separate technical units intended for such vehicles, as regards their general safety and the protection of vehicle occupants and vulnerable road users, amending Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council and repealing Regulations (EC) No 78/2009, (EC) No 79/2009 and (EC) No 661/2009 of the European Parliament and of the Council and Commission Regulations (EC) No 631/2009, (EU) No 406/2010, (EU) No 672/2010, (EU) No 1003/2010, (EU) No 1005/2010, (EU) No 1008/2010, (EU) No 1009/2010, (EU) No 19/2011, (EU) No 109/2011, (EU) No 458/2011, (EU) No 65/2012, (EU) No 130/2012, (EU) No 347/2012, (EU) No 351/2012, (EU) No 1230/2012 and (EU) 2015/166 (Text with EEA relevance).*

Fujiwara, T. & Takechi, K. (2022). *Making the world safer: autonomous emergency braking systems enhance safety for senior drivers*. In: Applied Economics Letters, vol. 29, nr. 13, p. 1177-1181.

Green, D.M. & Swets, J.A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. Volume 1. Wiley New York.

Hellman, I.I. & Lindman, M. (2023). *Estimating the crash reducing effect of advanced driver assistance systems (ADAS) for vulnerable road users*. In: Traffic Safety Research, vol. 4, p. 000036-000036.

Hoedemaeker, M. & Brookhuis, K.A. (1998). *Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC)*. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, vol. 1, nr. 2, p. 95-106.

Hu, L., Li, H., Yi, P., Huang, J., et al. (2022). *Investigation on AEB key parameters for improving car to two-wheeler collision safety using in-depth traffic accident data*. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, nr. 1, p. 113-124.

Insurance Institute for Highway Safety (2021). *2013–17 BMW collision avoidance features — a 2021 update*. Highway Loss Data Institute, Arlington, Virginia.

Insurance Institute for Highway Safety (2023). *Real-world benefits of crash avoidance technologies*. Highway Loss Data Institute, Arlington, Virginia.

Insurance Institute for Highway Safety (2024). *Convenience or safety system? Crash rates of vehicles equipped with partial driving automation*. Highway Loss Data Institute, Arlington, Virginia.

ISO (2018). *Intelligent transport systems — Adaptive cruise control systems — Performance requirements and test procedures*. ISO 15622:2018. International Organisation for Standardization, Geneva.

Kampen, L.T.B. van (1996). *Cruise control in personenauto's; Een literatuur-oriëntatie op verkeersveiligheidsaspecten*. R-96-21. SWOV, Leidschendam.

Kitajima, S., Chouchane, H., Antona-Makoshi, J., Uchida, N., et al. (2022). *A nationwide impact assessment of automated driving systems on traffic safety using multiagent traffic simulations*. In: IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, vol. 3, p. 302-312.

Leslie, A.J., Kiefer, R.J., Meitzner, M.R. & Flannagan, C.A. (2021). *Field effectiveness of general motors advanced driver assistance and headlighting systems*. In: Accident Analysis & Prevention, vol. 159, p. 106275.

Maltz, M. & Shinar, D. (2004). *Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid drivers*. In: Human Factors, vol. 46, nr. 2, p. 357-366.

Mankins, J.C. (1995). *Technology readiness levels*. In: White Paper, April, vol. 6, nr. 1995, p. 1995.

Masello, L., Castignani, G., Sheehan, B., Murphy, F., et al. (2022). *On the road safety benefits of advanced driver assistance systems in different driving contexts*. In: Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, vol. 15, art. 100670.

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2024). *Monitor Smart Mobility 2024*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Den Haag.

Moekli, J., Brown, T., Dow, B., Boyle, L.N., Schwarz, C., & Xiong, H. (2015). *Evaluation of adaptive cruise control interface requirements on the National Advanced Driving Simulator*. DOT HS 812 172. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.

Naumann, R.B., Kreuger, L.K., Sandt, L., Lich, K.H., et al. (2023). *Examining the safety benefits of partial vehicle automation technologies in an uncertain future*. AAA Foundation for Traffic Safety, Washington, DC.

Newstead, S., Budd, L. & Stephens, A. (2020). *The potential benefits of Autonomous Emergency Braking Systems in Australia*. Report No. 339. Monash University Accident Research Centre MUARC, Melbourne, Victoria.

Oei, H.L. (2003). *Mogelijke veiligheidseffecten van navigatiesystemen; Een literatuurstudie, enkele eenvoudige effectberekeningen en resultaten van een enquête*. R-2002-30. SWOV, Leidschendam.

Parasuraman, R. & Riley, V. (1997). *Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse*. In: Human Factors, vol. 39, nr. 2, p. 230-253.

Rahman, R., Hasan, S. & Zaki, M.H. (2021). *Towards reducing the number of crashes during hurricane evacuation: Assessing the potential safety impact of adaptive cruise control systems*. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 128, p. 103188.

Rijkswaterstaat (2024). *Bestand geRegistreerde Ongevallen Nederland*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Den Haag. <https://data.overheid.nl/dataset/a516ffaf-fbcc-44bc-88cb-fca799c5cd29>

SAE International/ISO (2021). *Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles*. Warrendale, PA. https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/

Spicer, R., Vahabaghaie, A., Bahouth, G., Drees, L., et al. (2018). *Field effectiveness evaluation of advanced driver assistance systems*. In: Traffic Injury Prevention, vol. 19, nr. sup2, p. S91-S95.

Spicer, R., Vahabaghaie, A., Murakhovsky, D., Bahouth, G., et al. (2021). *Effectiveness of advanced driver assistance systems in preventing system-relevant crashes*. In: SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, vol. 3, nr. 2021-01-0869, p. 1697-1701.

Sternlund, S., Strandroth, J., Rizzi, M., Lie, A., et al. (2017). *The effectiveness of lane departure warning systems - A reduction in real-world passenger car injury crashes*. In: Traffic Injury Prevention, vol. 18, nr. 2, p. 225-229.

Stumpf, R. (2023). *Here's about how many cars are there in the world in 2023*. In: THE DRIVE. Geraadpleegd 27 augustus 2024 op <https://www.thedrive.com/guides-and-gear/how-many-cars-are-there-in-the-world>

SWOV (2023). *Rijden onder invloed van alcohol*. SWOV-Factsheet, September 2023. SWOV, Den Haag.

Utriainen, R. & Pöllänen, M. (2021). *The safety potential of automatic emergency braking and adaptive cruise control and actions to improve the potential*. In: International Journal of Vehicle Autonomous Systems, vol. 16, nr. 1, p. 1-14.

Utriainen, R., Pöllänen, M. & Liimatainen, H. (2020). *The safety potential of lane keeping assistance and possible actions to improve the potential*. In: IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 5, nr. 4, p. 556-564.

Verbond van Verzekeraars (2024). *Effect of advanced driver-assistance systems (ADAS) on accident frequency, claim costs and CO2 emission*. 2024-1914561425-3013/MARVI. Data Analytics Centre, Verbond van Verzekeraars, Den Haag.

Vis, M.A., Reurings, M.C.B., Bos, N.M., Stipdonk, H.L., et al. (2011). *De registratie van verkeersdoden in Nederland; Beschrijving en beoordeling van het registratieproces*. R-2011-10. SWOV, Leidschendam.

Vlakoveld, W.P. (2019). *Veiligheidseffecten van rijtaakondersteunende systemen; Bijlage bij het convenant van de ADAS Alliantie*. R-2019-14. SWOV, Den Haag.

Wang, J.-S. (2019). *Target crash population for crash avoidance technologies in passenger vehicles*. DOT HS 812 653. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.

Winkel, K.N. de (2024). *Veiligheidseffecten van ADAS samengevat; Overzicht effecten van geavanceerde rijhulpsystemen*. R-2024-16A. SWOV, Den Haag.

Winkel, K.N. de, Christoph, M. & Nes, N. van (2024). *Towards a framework of driver fitness: operationalization and comparative risk assessment*. In: Transportation research interdisciplinary perspectives, vol. 23, p. 101030.

Winkel, K.N. de, Doumen, M.J.A. & Jansen, R.J. (2023). *Inventory and assessment of commercially available blind spot monitoring systems*. R-2023-9. SWOV, The Hague.

Winter, J.C. de, Happee, R., Martens, M.H. & Stanton, N.A. (2014). *Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence*. In: Transportation Research Part F: traffic psychology and behaviour, vol. 27, p. 196-217.

Yue, L., Abdel-Aty, M.A., Wu, Y. & Farid, A. (2019). *The practical effectiveness of advanced driver assistance systems at different roadway facilities: System limitation, adoption, and usage*. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 21, nr. 9, p. 3859-3870.

Bijlage A Zoekopdracht

De complete zoekopdracht (query), zoals gebruikt in SCOPUS was als volgt:

(safety OR "crash rate" OR "collision rate" OR "crash risk" OR "collision risk" OR "effectiveness")
 AND (("Advanced Driver Assistance Systems" OR "Advanced Driving Assistance Systems" OR "ADAS" OR ("Cruise Control" OR "Automatic Cruise Control" OR "Speed Control" OR ("Adaptive Cruise Control" OR "Dynamic Cruise Control" OR "ACC" OR ("Speed Limit Information Function" OR "Speed Limit Alert" OR "Speed Limit Display" OR "SLIF" OR ("Intelligent Speed Assist" OR "Intelligent Speed Adaptation" OR "Speed Limit Assist" OR "ISA" OR ("Speed Control Function" OR "Speed Limiter" OR "Speed Governing" OR ("Forward Collision Warning" OR "Forward Collision Alert" OR "Front Collision Warning" OR "FCW" OR ("Autonomous Emergency Braking" OR "Automatic Emergency Braking" OR "Auto Brake" OR "AEB" OR ("VRU detection" OR "Vulnerable Road User Detection" OR "Pedestrian Detection" OR ("Post-Collision Braking" OR "Post-Crash Braking" OR "Secondary Collision Mitigation" OR "PCB" OR ("Rear Automatic Braking" OR "Reverse Automatic Braking" OR "Rear Emergency Braking" OR "RAB" OR ("Lane Keep Assist" OR "Lane Keeping Assistance" OR "Lane Keeping Aid" OR "LKA" OR ("Lane Departure Warning" OR "Lane Departure Alert" OR "Lane Exit Warning" OR "LDW" OR ("Emergency Lane Keeping" OR "Emergency Lane Keeping System" OR "Emergency Lane Assist" OR "ELK" OR ("Lane Centering" OR "Lane Centering Assist" OR "Lane Centering Control" OR "Active Lane Keeping" OR ("Blind Spot Monitoring System" OR "Blind Spot Detection" OR "Blind Spot Assist" OR "Blind Spot Warning" OR ("Autonomous Emergency Steering" OR "Automatic Emergency Steering" OR "Emergency Steering Assist" OR ("Curve Speed Warning" OR "Curve Speed Alert" OR "Curve Speed Control" OR "Curve Speed Assistance" OR ("Road Edge Detection" OR "Road Edge Alert" OR "Road Boundary Detection" OR "Road Edge Recognition" OR ("Assisted Parking" OR "Park Assist" OR "Parking Assistance" OR "Automatic Parking" OR ("Autopilot" OR "Self-Driving" OR "Autonomous Driving" OR "Automated Driving System" OR ("FCW" AND "AEB" OR ("Traffic Jam Assist" OR "Traffic Jam Pilot" OR "Traffic Jam Chauffeur" OR "Congestion Assist" OR ("Drowsiness Detection" OR "Driver Fatigue Detection" OR "Driver Drowsiness Alert" OR "Fatigue Monitoring" OR ("Distraction Detection" OR "Driver Distraction Monitoring" OR "Driver Attention Detection" OR ("Alcohol lock" OR "Ignition Interlock Device" OR "Alcohol Interlock" OR "Breath Alcohol Ignition Interlock Device" OR ("Rear Seat Reminder" OR "Back Seat Reminder" OR "Rear Occupant Alert" OR "Child Presence Detection" OR ("Navigation Systems" OR "GPS Navigation" OR "Satellite Navigation" OR "In-Car Navigation"

OR (“Traffic Information Systems” OR “Traffic Information Service” OR “Traffic Data Systems” OR “Real-Time Traffic Information” OR (“Parking sensors” OR “Park Distance Control” OR “Parking Assist Sensors” OR “Proximity Sensors” OR (“Surround camera” OR “360-Degree Camera” OR “Around View Monitor” OR “Bird's Eye View Camera” OR (“Traffic Sign Information” OR “Traffic Sign Recognition” OR “Traffic Sign Detection” OR “Traffic Sign Assist” OR (“Rear Cross Traffic Alert” OR “Rear Cross Traffic Detection” OR “Cross Traffic Alert” OR “Rear Traffic Monitor” OR (“V2X” OR “Vehicle-to-Everything” OR “Vehicle-to-Infrastructure” OR “Vehicle-to-Vehicle” OR (“Tire Pressure Monitoring System” OR “Tire Pressure Monitoring” OR “Tire Pressure Alert” OR “TPMS” OR (“Adaptive Headlights” OR “Adaptive Front Lighting System” OR “Adaptive Headlamps” OR “Smart Headlights”)

Ongevallen voorkomen Letsel beperken Levens redden

SWOV

Instituut voor Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid

Henri Faasdreef 312

2492 JP Den Haag

070 – 317 33 33

info@swov.nl

www.swov.nl

 [@swov_nl](https://twitter.com/swov_nl) / @swov

 [linkedin.com/company/swov](https://www.linkedin.com/company/swov)