

Vertaling van de wetenschappelijke inzichten uit het SAMEN project naar praktische toepassingen en gevolgen



Vertaling van de wetenschappelijke inzichten uit het SAMEN project naar praktische toepassingen en gevolgen

In het SAMEN project zijn verschillende aspecten van interacties tussen menselijke bestuurders en automatische voertuigen onderzocht in zogenaamd 'gemengd verkeer'. Dit is relevant voor de aankomende fase waarin de overgang naar volledig automatisch rijden kan plaatsvinden. Er is vooral gekeken naar rijgedrag. De resultaten van het wetenschappelijk onderzoek zijn gepubliceerd in wetenschappelijke tijdschriften. In deze publicaties is vooral aandacht besteed aan het harde academische onderzoekswerk. Dit was vooral gericht op fundamenteel begrip van het onderwerp en minder op de mogelijke toepasbaarheid voor wegbeheerders, de RDW en aanbieders van rijopleidingen op kortere en langere termijn.

Deze publicatie is daar wel voor bedoeld. Op basis van praktische kennis bij deelnemers vanuit CROW, RDW en Rijkswaterstaat, alsmede private partijen, hebben wij geprobeerd de wetenschappelijke inzichten te vertalen voor professionals in het werkveld. Wij hebben daarbij geprobeerd systematisch te werk te gaan langs twee denklijnen.

Ten eerste volgen wij het CROW model voor asset management. Overheden moeten immers een mobiliteitssysteem maken en instandhouden dat bijdraagt aan gezondheid, veiligheid, de leefomgeving en bereikbaarheid (Snellen, 't Hoen & Bastiaanssen, 2021). Hiervoor is het iAMPro model geschikt (CROW, 2023). Dit beschrijft de stappen van beleid, via ontwerp en realisatie, tot aan het beheer en onderhoud van kapitaalgoederen zoals wegen en objecten in de buitenruimte. Binnen dit model worden 'lines of sight' gehanteerd om bepaalde functionaliteiten van deze kapitaalgoederen te definiëren en te monitoren.

Dit document kijkt vooral naar de mogelijke line of sight voor het veilig rijden met geautomatiseerde voertuigen in gemengd verkeer. Voor ADAS toepassingen is al eens een voorlopige line of sight ontwikkeld. Deze wordt nu ook als basis gebruikt. Misschien kunnen sommige onderdelen op basis van het SAMEN onderzoek verder worden aangevuld of verbeterd.



Beleid en strategie bepalen de ambities

Overheden kunnen van smart mobility profiteren volgens de zogenoemde ladder van smart mobility (CROW, 2022). Deze ladder is gemaakt om wegbeheerders te helpen bij het bepalen van hun ambities rondom de inzet van smart mobilitybeleid en maatregelen. De eerste trede is niet meer dan het voldoen aan bestaande richtlijnen en normen, die nodig zijn voor smart mobility toepassingen. Vooral het goed organiseren van het beschikbaar stellen van open data over de infrastructuur is hiervoor belangrijk. De tweede trede heeft te maken met een meer proactieve houding rondom huidige en kortetermijnontwikkelingen: hoe kunnen gemeenten bijvoorbeeld smart technologie gebruiken om actief bij te dragen aan de eerder genoemde vier dimensies van mobiliteitsbeleid? Of andersom: hoe zorg je als overheid dat de risico's en nadelen van bepaalde technologieën worden beheerst met goede overheidsmaatregelen? De derde trede is voor de koplopers. Sommige wegbeheerders willen wellicht actief experimenteren met nieuwe technologieën, bijvoorbeeld door wegvakken ter beschikking te stellen voor living lab experimenten of demonstratieprojecten.

Programmeren en uitvoeren bepalen de prestaties

In Nederland wordt het ontwerp, de realisatie en het beheerproces van infrastructuurmaatregelen voor een groot deel bepaald door publicaties van CROW en andere partijen. Denk hierbij aan maatvoeringen, materialisatie en kwaliteitsborging. In deze publicatie leggen wij op een aantal plekken een relatie tussen de wetenschappelijke bevindingen en deze richtlijnen. Dit zal wellicht op een aantal plekken uitwijzen dat de huidige richtlijnen al voldoende rekening houden met zelfrijdende technologieën. Dit is deels logisch omdat autofabrikanten nu al proberen hun producten zo goed mogelijk aan te laten sluiten op wat er wereldwijd aan infrastructuur beschikbaar is.

Leeswijzer

Wij gaan systematisch de resultaten van het wetenschappelijk onderzoek langs en vatten kort samen hoe dit samenhangt met praktische gevolgen. Om het leesbaar te houden worden de meer theoretische en/of meer lange-termijengevolgen niet verder uitgewerkt. Hoewel voor de meeste wegbeheerders geldt dat treden 1 en 2 het meest relevant zijn, wordt ook naar trede 3 gekeken.



1 Het gedrag en modellering van menselijke bestuurders in gemengd verkeer (vanuit de menselijke bestuurder gezien)

Wetenschappelijke resultaten

In het algemeen laat het onderzoek zien dat de aanwezigheid van geautomatiseerde voertuigen invloed heeft op het menselijk rijgedrag. Dit heeft een effect op de doorstroming van verkeer, vooral op kruisingen. De belangrijkste invloedsfactoren zijn (1) de herkenbaarheid van het automatische voertuigen en (2) de 'rijstijl' van het automatische voertuig (meer of minder defensief, reactietijden, remgedrag bij het benaderen van een stopstreep of wachtrij, etc. (Reddy et al. 2022).

Met simulaties is aangetoond dat mensen een ander hiaat accepteren als zij invoegen in een rij automatische voertuigen. Dit is vooral het geval als deze automatische voertuigen minder defensief rijden.

Een analyse van een open dataset van Waymo heeft laten zien dat het benaderen van een kruising met verkeerslichten door een automatisch voertuig sterk afwijkt van menselijk gedrag (Wang et al, 2023). Het afremmen gaat soepeler en begint eerder. Verder is de reactietijd van een automatische auto significant hoger (1,0 s tegenover 0,7 s voor menselijke bestuurders). Dit kan worden verklaard omdat mensen op basis van de stromen op het kruispunt kunnen voorspellen wanneer zij aan de beurt zijn. Verder blijkt dat menselijke bestuurders die wachten achter een automatisch voertuig zich anders gedragen dan wanneer ze achter een andere menselijke bestuurder wachten. Bij een automatische auto is de volgafstand korter en houden zij een kortere reactietijd aan.

Beleid en strategie

De interacties tussen geautomatiseerde voertuigen en menselijke bestuurders op kruisingen heeft een mogelijk gevolg voor de verkeersveiligheid en bereikbaarheid (veranderingen in capaciteit). Vooral vanuit veiligheidsoogpunt is het nodig om te kijken welke combinaties van herkenbaarheid en rijstijl van automatische voertuigen bijdragen aan een hogere verkeersveiligheid. Dit zou kunnen worden vertaald in testcriteria voor de RDW alsmede richtlijnen voor het rijonderricht. Voor asset management bij overheden is het wenselijk om te kijken of de huidige ontwerprichtlijnen nog voldoen en of het afwijken van deze richtlijnen meer beperkt moet worden. In sommige situaties kan 'natuurlijk' rijgedrag door automatische voertuigen worden verbeterd door externe assistentie (V2X), maar dat vereist datastandaardisatie. Dit is voor een groot deel al gebeurd via de iVRI standaarden van CROW (CROW, 2024)





Interactie		
Bevinding	Mogelijk gevolg	Acties
Menselijke bestuurders accepteren grotere hiaten als zij invoegen voor een herkenbaar automatisch voertuig, als deze minder defensief geprogrammeerd zijn.	Met gelijkmatige tussenruimtes en rijsnelheden zal bij hogere aandelen automatisch verkeer een probleem kunnen optreden bij het invoegen. Dit leidt tot grotere wachtrijen en onvoorspelbaar invoeggedrag door menselijke bestuurders. Defensievere automatische voertuigen hebben een negatief effect op wegcapaciteit door hun langere volgafstand, die desondanks onvoldoende is voor menselijke bestuurders om in te voegen.	<p>Trede 1 Strikt aanhouden van de huidige ontwerp-richtlijnen om uniforme en voorspelbare wegsituaties te creëren.</p> <p>Trede 2 Nalopen van de ontwerpisen voor kruispuntontwerp (bij welke intensiteiten moet voorrang en/of verkeersregeling worden toegepast?)</p> <p>Trede 3 Gebruik V2X technologie om grotere, natuurlijk ogende, volgafstanden te maken in colonnes van automatische voertuigen als zij een kruising naderen.</p> <p>Trede 3 Menselijke bestuurders beter trainen om hiaten bij stromen van automatische voertuigen veilig te beoordelen.</p> <p>Trede 3 Onderzoek laten uitvoeren naar andere wegsituaties en technieken, aanbieden voor experimenten en demonstratieprojecten.</p>
Het benaderen van een geregelde kruising duurt langer en is soepeler voor een automatisch voertuig	De aanrijtijd voor een verkeerslicht bepaalt de verlengroenfase.	<p>Trede 2 Onderzoeken of het afwijkende gedrag binnen de bandbreedtes valt van de richtlijn voor intergroentijden.</p> <p>Trede 3 Gebruik V2X technologie om het automatische voertuig te adviseren over naderingsnelheden op basis van time-to-red berekeningen.</p>
Reactietijd bij groen licht is significant langer	De intergroentijden zijn gebaseerd op een aanname over reactietijden. Dit zou dus invloed kunnen hebben op de cyclustijd. Langere reactietijden voor automatische voertuigen vooraan de wachtrij kan onverwacht gedrag uitlokken bij de menselijke bestuurders erachter, mogelijk met kopstaartbotsingen als gevolg.	<p>Trede 2 Onderzoek of dit afwijkende gedrag binnen de parameters van de huidige richtlijn intergroentijden valt.</p> <p>Trede 3 Gebruik V2X technologie om automatische voertuigen te informeren op basis van time-to-green berekeningen waardoor de responstijd lager wordt.</p>
Gedragsmodellen van de waargenomen gedragingen zijn beschikbaar	Het is mogelijk voor onderzoekers, software-ontwikkelaars en beleidsmakers om deze modellen toe te passen om infrastructuur te ontwerpen en te beoordelen.	<p>Trede 2 Nagaan of deze modellen gevolgen hebben voor de huidige ontwerp-richtlijnen.</p> <p>Trede 3 Als wegbeheerder aanbieden om experimenten uit te voeren op het wegennet zodat de modellen verder kunnen worden getoetst en verbeterd.</p>
Het niet meenemen van menselijke reacties op automatische voertuigen zorgt ervoor dat vertragingen in het verkeer onderschat worden	Dit heeft invloed op de kruispuntcapaciteit en afwikkelingsniveaus van de zijstraat.	<p>Trede 2 Onderzoek of dit gevolgen heeft voor de huidige richtlijnen.</p> <p>Trede 3 Gebruik V2X technologie om automatische voertuigen ruimte te geven zodat invogend verkeer mogelijk is.</p>

2 Operational design domain

Wetenschappelijk resultaat

De betrouwbaarheid van systemen die automatische voertuigen aansturen leunen zwaar op de vaardigheden van die voertuigen om de informatie over de weg en de omgeving te interpreteren. De kwaliteit van deze waarneming is vaak gebaseerd op videobeelden, vooral gericht op het herkennen van markering, de wegkant, afwijkingen in het wegbeeld, etc. Hoe beter het voertuig 'begrijpt' wat het ziet, hoe meer verschillende situaties het voertuig zelfstandig aankan. Binnen het SAMEN onderzoek is gekeken naar zowel de detectietechniek als de kwaliteit van markeringen voor verschillende ADAS systemen.

Het herkennen van markeringen is onderzocht via het ontwikkelen van een 'hybrid spatial-temporal deep neural network model'. Dit is getraind om wegmarkering te herkennen in verschillende omstandigheden (Dong et al. 2023). Een dergelijk geavanceerd deep neural network model gebruikt ruimtelijke en tijdsafhankelijke samenhang tussen verschillende afbeeldingen om in het laatste plaatje de wegmarkering te herkennen. Het blijkt dat met deze geavanceerde modellen het systeem veel beter werd in het herkennen van de markering, ook in moeilijke omstandigheden. Echter, sommige combinaties van factoren (slechte markering, duisternis, etc.) blijven ook voor dit systeem moeilijk.

Op een vergelijkbare manier is met een semi-gecontroleerd 'hierarchical extreme learning machines model' geprobeerd om vreemd rijgedrag te herkennen uit verkeersdata (Zhang et al., 2023). Dit kan worden gebruikt om vreemd rijgedrag eerder te herkennen en te filteren als geautomatiseerde systemen getraind worden in meer natuurlijk rijgedrag.

Bij een veldtest is gekeken hoe goed verschillende typen wegmarkering kunnen worden herkend door bestaande ADAS systemen die nu al in auto's zijn geïnstalleerd (den Otter, 2023). De conclusie is dat nieuwere markeringstypen beter werken dan gewone wegenverf en dat lastige omstandigheden (kunstlicht, regen) een significant effect hebben op de herkenbaarheid van markeringen door ADAS systemen, vooral bij gewone verf.

Om de vaardigheden van automatische voertuigen met bestuurders in de omgeving te verbeteren, vooral in uitdagende situaties zoals een rotonde, is een 'sociaal bewust' planning en controlemodel ontwikkeld, dat is gebaseerd op zgn. 'driving risk field and model predictive contouring control' (Zhang et al. 2024). De combinatie van het 'driving risk field' met een sociale waardenmodel en een voorspellend controleprotocol maakt het mogelijk te sturen op

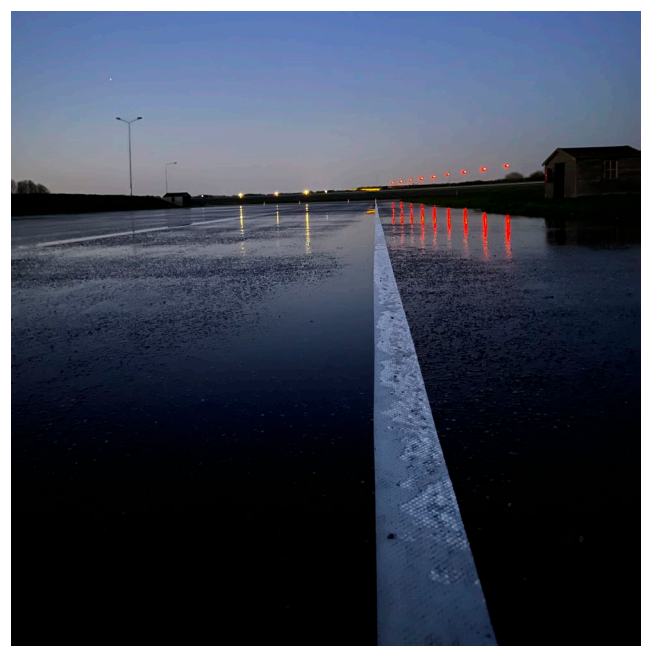
basis van voertuigbeheersing en het mogelijke gevaar van andere voertuigen, waardoor de voordelen van het 'ego' voertuig en andere voertuigen in balans kunnen blijven.

Beleid en strategie

Als overheden werk willen maken van het vergroten van de 'operational design domain' voor automatisch rijden, is het op enig moment nodig dat er een objectieve standaard is voor een 'voldoende leesbare' wegmarkering. Het machine learning model voor het herkennen hiervan is open source en zou daarom voor overheden een goede basis kunnen bieden. Enerzijds om richting autofabrikanten aan te geven wat hun systemen ten minste zouden moeten kunnen, anderzijds om zelf bij het opleveren van wegwerkzaamheden te kunnen toetsen of de belijning aan leesbaarheidseisen voldoet. Voor dit laatste is het ook nodig om te onderzoeken of machineleesbaarheid voldoende is geborgd met de huidige richtlijnen voor bebakening en markering.

Programmeren en uitvoeren

Het machine learning model kan ook worden toegepast bij het schouwen van het wegennet. Hierdoor ontstaat snel een gedetailleerd beeld van locaties waar de belijning niet goed leesbaar is. Dit helpt asset managers bij het prioriteren van werkzaamheden. Daarbij kunnen wegbeheerders bewuster sturen op het gebruik van wegmarkeringen die beter leesbaar zijn met automatische systemen.





AV gedrag en beheersing		
Bevinding	Mogelijk gevolg	Acties
Een machine learning model is in staat om de herkenning van belijning op videobeelden te verbeteren. Dit model is niet altijd in staat om belijning te herkennen in lastige situaties.	Omdat de meeste commerciële systemen 'black boxes' zijn, is er nog geen specificatie waarmee huidige en nieuwe lijnherkenningssystemen kunnen worden getest. Het huidige openbare model kan worden gezien als een minimale basis om commerciële systemen mee te vergelijken. Dit kan relevant zijn voor het toelatingsbeleid van nieuwe voertuigtypen.	<p>Trede 1 Vasthouden aan de huidige richtlijnen voor de kwaliteit van belijning voor zowel menselijke als automatische besturing.</p> <p>Trede 2 Een kwaliteitscontrole uitvoeren met een open benchmark systeem om de machineleesbaarheid van markeringen te testen en dat te gebruiken in de beheercyclus.</p> <p>Trede 3 Het herkennen van structurele problemen bij configuraties van belijning die met een aangepaste ontwerprijrichtlijn kunnen worden vermeden.</p> <p>Trede 3 Aanbieden van wegsituaties als wegbeheerder om de methoden en technieken verder te verbeteren.</p> <p>Trede 3 Een dynamische database aanleggen van de machineleesbaarheid van wegmarkeringen op het wegennet.</p>
Het herkennen van vreemd rijgedrag met een Semi Supervised HELM model blijkt mogelijk op basis van een beschikbare dataset.	Het kunnen herkennen van vreemd rijgedrag zou kunnen helpen bij het handhaven van verkeer. Daarbij kunnen deze abnormale gedragingen sneller worden weggefilterd uit trainingssets voor automatisch rijden om zo sneller veilig en natuurlijk rijgedrag aan te leren. Tot slot kan een toelatingsinstatie dit gebruiken om te kijken of een voertuig goed genoeg rijdt.	Deze zijn niet relevant voor wegbeheerders. Wellicht wel voor de RDW, CBR en handhaving.
Verschillende soorten markering leveren andere prestaties onder diverse omstandigheden. Vooral bij moeilijke omstandigheden doen moderne markeringen het veel beter dan wegenverf.	De resultaten van deze proef geven inzicht in de prestaties van nieuwe typen markering. De machineleesbaarheid is als specificatie nog niet goed beschreven in huidige testrichtlijnen.	<p>Trede 1 Vasthouden aan de huidige richtlijnen voor wegmarkering.</p> <p>Trede 2 Doe regelmatig een schouw van de machineleesbaarheid van wegmarkering in lastige omstandigheden. Herstel de probleemlocaties.</p> <p>Trede 3 Verbeter de richtlijnen en oplevercriteria zodat ze ook de prestaties in termen van machineleesbaarheid meenemen.</p>
Het sociaal bewuste besturingsmodel kan het rijgedrag van een automatisch voertuig verbeteren in lastige situaties zoals rotondes.	<p>Verder inzicht in de aansturing van een automatisch voertuig draagt bij aan meer systematische en objectieve beoordelingen van rijgedragmodellen in nieuwe vertuigtypen. Dit is relevant voor testen en toelaten.</p> <p>Naast de toepassing voor automatische voertuigen kan deze vorm van modelleren worden gebruikt om microscopische verkeersmodellen te verbeteren.</p>	<p>Trede 1 Vasthouden aan huidige ontwerprijrichtlijnen om uniforme en voorspelbare wegsituaties te creëren.</p> <p>Trede 2 Actief criteria vastleggen voor het toelaten van nieuwe automatische voertuigen, gegeven de mate waarin het voertuig oog heeft voor de omgeving.</p> <p>Trede 3 Verbeter de set van toetsingscriteria om ook de prestaties voor 'sociaal rijgedrag' mee te nemen.</p>

Verantwoording

Dit document is mede mogelijk gemaakt door de toegepaste technische wetenschappen afdeling van NWO vanuit het project 'Safe and Efficient Operation of Automated and Human-Driven Vehicles in Mixed Traffic (SAMEN), onder Contract 17187.

Literatuur

CROW. (2022). Ladder van Smart Mobility. Retrieved from <https://www.crow.nl/kennis/bibliotheek-verkeer-en-vervoer/kennisdocumenten/infographic-de-ladder-van-smart-mobility>

CROW. (2023). Het iAMPro model voor Assetmanagement. Retrieved from <https://essit.nl/over-assetmanagement/wat-is-het-iampro-model-voor-assetmanagement>

CROW. (2023). Landelijke iVRI standaarden. Retrieved from <https://www.crow.nl/thema-s/smart-mobility/landelijke-ivri-standaarden>

den Otter, M. (2023). Impact of improved lane marking properties on the performance of Lane Keeping Assistance systems in varying circumstances. Master thesis, Delft University of Technology.

Dong, Y., Patil, S., Van Arem, B., & Farah, H. (2023). A hybrid spatial-temporal deep learning architecture for lane detection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 38(1), 67-86.

Li, R. and Dong, Y., Robust lane detection through self pre-training with masked sequential autoencoders and fine-tuning with customized PolyLoss. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 12, pp. 14121-14132.

Reddy, N., Hoogendoorn, S. P., & Farah, H. (2022). How do the recognizability and driving styles of automated vehicles affect human drivers' gap acceptance at T-Intersections?. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 90, 451-465.

Snellen, D., 't Hoen, M., & Bastiaanssen, J. (2021). *Brede welvaart en mobiliteit*. Retrieved from <https://www.pbl.nl/publicaties/brede-welvaart-en-mobiliteit>

Wang, Y., Farah, H., Yu, R., Qiu, S., & van Arem, B. (2023). Characterizing behavioral differences of autonomous vehicles and human-driven vehicles at signalized intersections based on Waymo Open Dataset. *Transportation research record*, 2677(11), 324-337.

Zhang, L., Dong, Y., Farah, H., Zgonnikov, A., & van Arem, B. (2023). Data-driven Semi-supervised Machine Learning with Surrogate Safety Measures for Abnormal Driving Behavior Detection. arXiv preprint arXiv:2312.04610.

Zhang, L., Dong, Y., Farah, H., & van Arem, B. (2023, October). Social-Aware Planning and Control for Automated Vehicles Based on Driving Risk Field and Model Predictive Contouring Control: Driving Through Roundabouts as a Case Study. In *2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 3297-3304). IEEE.

Colofon

Vertaling van de wetenschappelijke inzichten uit het SAMEN project naar praktische toepassingen en gevolgen

erkenning

Dit werk is ondersteund door Toegepaste en Technische Wetenschappen, een onderdeel van NWO, via het project Safe and Efficient Operation of Automated and Human-Driven Vehicles in Mixed Traffic (SAMEN) onder contract 17187

uitgave

CROW, Ede

artikelnummer

G004

tekst

Haneen Farah, Marco van Burgsteden

eindredactie

Marco van Burgsteden

fotografie

Haneen Farah, Yongqi Dong, Nagarjun Reddy

vormgeving

Inpladi bv, Cuijk

productie

CROW

downloaden

Deze uitgave is gratis te downloaden via www.crow.nl