

VAN : Simeon Calvert, Isabel Wilmink, Aroen Soekroella & Henk Schuurman

AAN : Geïnteresseerden in impacts automatisch rijden op verkeer

CC :

DATUM : 29 maart 2016

BETREFT : Kennishiaten van automatisch rijden in regulier verkeer

Aanleiding

Het is een ware hype in de media: zelfrijdende auto's. De media pakt over dit onderwerp groot uit en enthousiastelingen volgen de ontwikkelingen op de voet. Ook TrafficQuest volgt de ontwikkelingen en is hierbij vooral geïnteresseerd in de impacts op de verkeersafwikkeling en verkeersmanagement (TrafficQuest, 2015). Wat is nu de stand van zaken in de praktijk? Een bekende classificering van automatische voertuigen is die van de Society of Automotive Engineers (SAE) (SAE International, 2014). Deze classificering wordt weergegeven in de bijlage. Voertuigen met functies voor automatisch rijden van niveau 1 ('driver assistance') rijden al enige tijd op de weg in de vorm van voertuigen met Adaptieve Cruise-Control (ACC) en Lane-Keeping Assistance (LKA). Er zijn ook al voertuigen met (autonome) functies voor 'partial automation' (niveau 2, zowel sturen als accelereren & decelereren), in het geval van Tesla nog als 'beta-versie'. En experimenten vinden plaats met voertuigen met nog hogere automatiseringsniveaus. Deze zijn echter nog beperkt in omvang en we zijn nog niet zo ver dat volautomatische voertuigen door particulieren in de praktijk worden bereden. Maar de ontwikkelingen zijn er wel.

Deze ontwikkelingen worden voor een groot deel getrokken door de automotive industrie. TrafficQuest stelt hierbij de vraag hoe goed wegbeheerders en andere autoriteiten voorbereid zijn op de komst van automatische voertuigen op de Nederlandse wegen? Welke uitdagingen bestaan er nog ten aanzien van hun gebruik in praktijk en zijn de verantwoordelijke instanties voldoende op de hoogte van openstaande vraagstukken? En wat zijn de gevolgen voor de verkeersdoorstroming? Dit zijn geen onbelangrijke vragen, zeker gezien de veelgenoemde verwachting dat de automatisering van de rijtaak zal zorgen voor een substantiële toename van de capaciteit van de weg (zie bijvoorbeeld (Wikipedia, 2016)). Deze verwachting is veelal gebaseerd op (berekeningen aan) een homogeen wegvak waarbij voertuigen met elkaar en met de infrastructuur communiceren; de capaciteit wordt echter bepaald door de discontinuïteiten in de weginfrastructuur en daar is veel minder over bekend.

Literatuur - de effecten van automatische voertuigen op de doorstroming:

In Snelder et al. (2015) is een overzicht op genomen over wat vanuit de literatuur bekend is over het effect van automatisch rijden op de capaciteit. Enkele bevindingen:

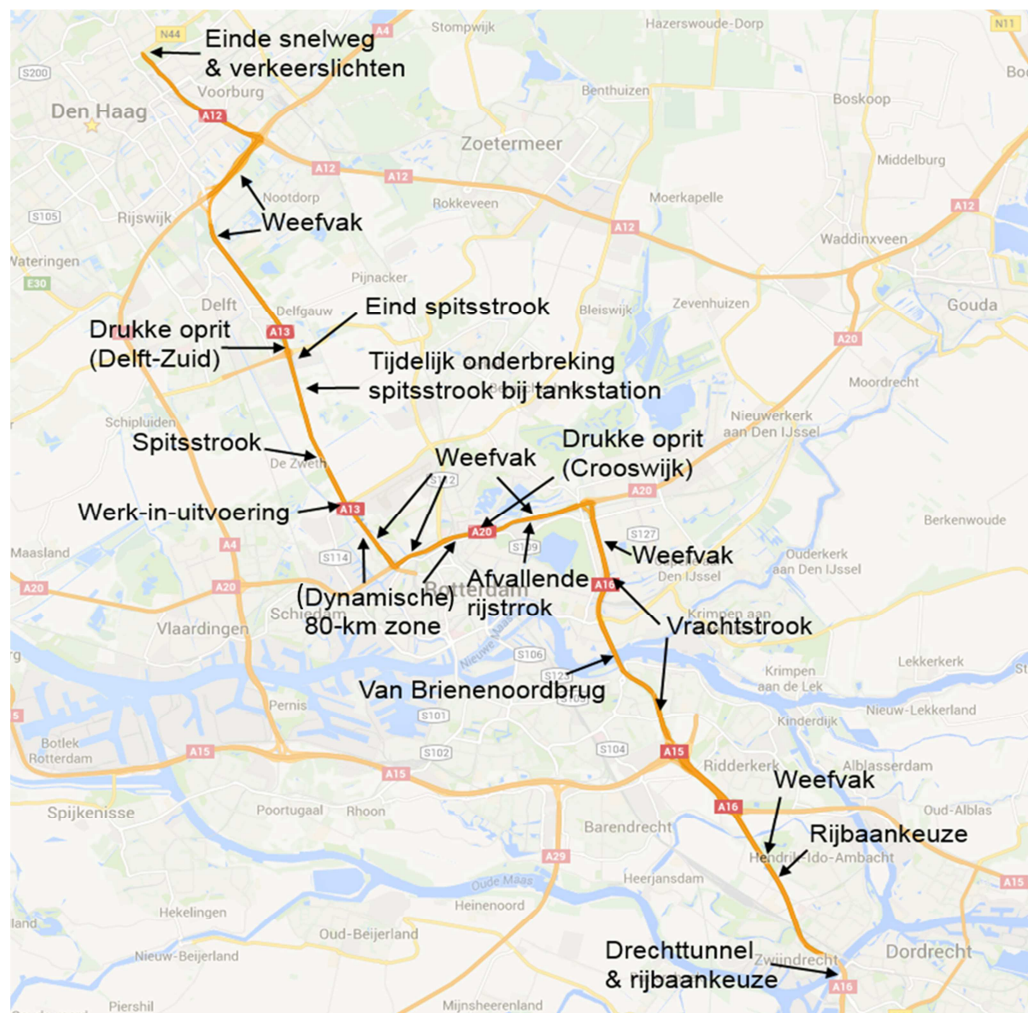
- ACC kan zowel een negatief als een positief effect hebben op de capaciteit ($\sim -5\% - +10\%$). Dit hangt samen met de volgtijd die wordt gehanteerd. Gorter (2015) geeft op basis van een enquête en praktijkmetingen van ACC zelfs aan dat de volgafstanden met 16,7%-25,8% toenemen afhankelijk van de verkeersomstandigheden. De snelheden en de volgafstanden worden wel constanter.
- Voor CACC (coöperatieve ACC) rapporteren de meeste studies een kwadratische toename van de capaciteit voor wegen zonder discontinuïteiten als de penetratiegraad toeneemt. De toename van de capaciteit wordt pas groot ($>10\%$) als de penetratiegraad hoger is dan 40%.
- Onderzoek naar het effect van automatische voertuigen bij discontinuïteiten is schaars.
- ACC en CACC hebben bij hogere penetratiegraden een positief effect op de stabiliteit.

TrafficQuest is een samenwerkingsverband van

TrafficQuest heeft verkend welke kennisvragen er liggen op het gebied van de impacts van automatisch rijden op de verkeersafwikkeling en verkeersmanagement (dus op het niveau van de verkeersstroom). Dit start met snelwegverkeer, omdat daar naar verwachting het eerst door automatische voertuigen gereden kan worden. Eerst is bekeken wat een automatisch voertuig allemaal tegenkomt op een snelwegrit in Nederland – een snelwegnet met een hoge dichtheid aan knooppunten en afslagen – door middel van een voorbeeldtraject. Daarna gaan we in op mogelijke manieren van het omgaan van conflicten door automatische voertuigen. Tot slot formuleren we onderzoeksvragen.

Voorbeeldtraject

In Figuur 1 staat een overzicht van een voorbeeldtraject van Dordrecht naar Den Haag. Enkele van deze situaties zijn visueel gemaakt in Figuur 2 ter illustratie van situaties op snelwegen waar een automatisch voertuig mee om moet kunnen gaan: samenvoegingen, splitsingen, weefvakken, spitsstroken, doelgroepstroken, aansluitingen, afvallende rijstroken en smalle rijstroken met snelheidsbeperkingen. Daarnaast zal een automatisch voertuig ook wegwerkzaamheden, incidenten en bijzondere weersomstandigheden tegenkomen.



Figuur 1: Voorbeeldtraject Dordrecht-Den Haag met enkele uitdagende wegvakken





Figuur 2: Voorbeelden van situaties waarmee een automatisch voertuig om moet kunnen gaan

Naast het uitvoeren van handelingen ten opzichte van de infrastructuur, dient een automatisch voertuig dit ook te kunnen terwijl er andere voertuigen in de buurt rijden. Zeker in Nederland is het vaak behoorlijk druk op de weg en zijn er dus veel interacties met andere voertuigen. De verwachting is daarbij dat het verkeer nog vele jaren gemengd zal zijn: een mix van automatische en manueel bestuurde voertuigen, waarvan het de vraag is hoe zij op elkaar zullen reageren. In het verkeer heeft ieder voertuig te maken met honderden potentiële conflicten per minuut, waar een bestuurder door ervaring, zich te houden aan de verkeersregels, en intuïtief vaak met gemak uit de voeten kan. Een conflict definiëren we hier als 'een situatie waarin een voertuig niet adequaat reageert op zijn omgeving, waarbij de verkeersdoorstroming of verkeersveiligheid in het geding komt'. Potentiële conflicten treden zeer vaak op in het verkeer en zijn inherent aan de aanwezigheid van meerdere voertuigen op de weg. Soms leiden deze conflicten ertoe dat een actie ondernomen moet worden om een botsing te vermijden, en heel soms leiden ze daadwerkelijk tot een botsing.

Conflict definitie

Een conflict definiëren we als 'een situatie waarin een voertuig niet adequaat reageert op zijn omgeving, waarbij de verkeersdoorstroming of verkeersveiligheid in het geding komt'. Dergelijke conflicten kunnen groot zijn, maar zijn in de meeste gevallen klein, bijvoorbeeld een voertuig dat aangeeft van rijstrook te willen wisselen en waarvan het beschikbare hiaat dicht wordt gereden door een ander voertuig.

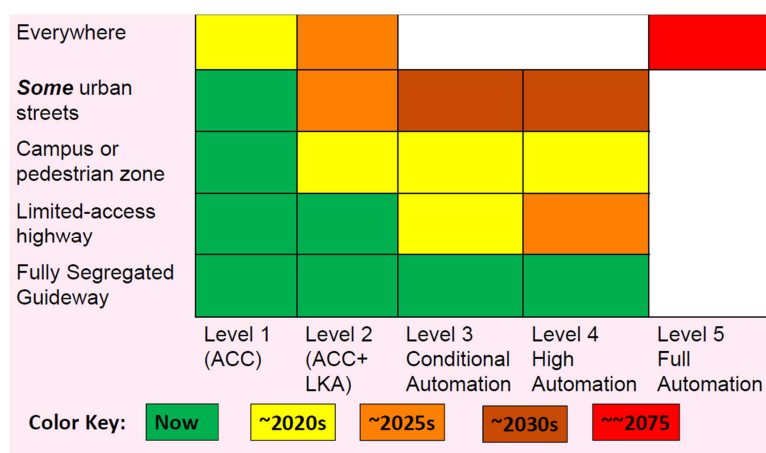
Technisch gezien zijn automatische voertuigen in staat om met veel van deze potentiële conflicten om te gaan, met name als het gaat om niet bewegende objecten. Er bestaan echter nog veel situaties waar het onbekend is hoe een automatisch voertuig zal reageren. Het is van groot belang voor de beheersing van verkeersstromen in de toekomst en het voorbereiden hierop dat duidelijkheid bestaat over de gevolgen van automatische voertuigen op de weg. Verderop in dit document gaan we nader in op daaruit voortvloeiende, belangrijke kennishiaten ten aanzien van potentiële conflicten in het verkeer voor automatische voertuigen op snelwegen. Dit is gedaan door regelmatig optredende conflicten in een specifiek en potentieel zeer conflictrijk scenario op een



weefvak te beschouwen¹. Deze beschouwing dient als opstap naar het opstellen van onderzoeksvragen om bestaande kennishiaten hierover, en over de invloed van automatische voertuigen op de verkeersdoorstroming en verkeersmanagement, aan te pakken.

Aannames

Er bestaan meerdere niveaus van automatisering van voertuigen en natuurlijk hebben verschillende autofabrikanten hun eigen systemen. Het is daarom goed om te definiëren wat TrafficQuest heeft aangenomen qua automatiseringsniveau en welke mogelijkheden wel en niet zijn meegenomen in dit onderzoek. We beschouwen een SAE niveau 3 voertuig (Conditional automation, zie Figuur 3) dat in staat is om zelfstandig in een rijstrook te rijden met of zonder voorligger, zelfstandig van rijstrook kan wisselen en een voorgeprogrammeerde route kan volgen. Een dergelijk voertuig kan al snel op de snel- en autoweg verwacht worden, volgens Figuur 3.



Figuur 3: Schattingen van intrede op de markt (Shladover, 2015)

De instellingen van het voertuig (denk aan minimale volgtijd of acceptabele hiaatgrootte) zijn relatief conservatief in verband met de veiligheid en huidige voorschriften. De overweging hierbij is dat zolang automatische voertuigen zich niet uitgebreid bewezen hebben als veilig en betrouwbaar, beperkingen zullen worden opgelegd aan de instellingen, ofwel door wegbeheerders of door producenten zelf. Er wordt ook verwacht van een bestuurder dat hij in kan grijpen wanneer het voertuig dat aangeeft, of de fout in dreigt te gaan. Er wordt aangenomen dat het voertuig de standaarduitrusting van de infrastructuur kan waarnemen en interpreteren, zoals reguliere bebording, belijning, en wegprofiel, alsmede andere weggebruikers. Verder wordt uitgegaan van een enkel automatisch voertuig, zonder coöperatieve technologie in een omgeving met alleen reguliere voertuigen. Dit is van belang, omdat we op dit moment niet goed weten hoe reguliere voertuigen reageren op automatische voertuigen.

Conflicthantering

Hoe automatische voertuigen naar verwachting omgaan met bepaalde conflicten is bekeken voor een scenario waarin veel conflicten optreden, ook voor reguliere weggebruikers, namelijk het uitvoeren van een weefbeweging op een (druk) weefvak. De conflicten zijn beschreven, gevolgd door de gevolgen voor een (automatisch) voertuig en de acties die een automatisch voertuig zou moeten uitvoeren. We bekijken wat er zou gebeuren als een automatisch voertuig wordt geacht te handelen zonder ingrijpen van de bestuurder en of dat aannemelijk is. Het kan echter zo zijn dat deze acties uiteindelijk toch door de bestuurder uitgevoerd dienen te worden, na een verzoek door

¹ We hebben hierbij gekeken naar regulier verkeer, waarbij nog geen speciale omstandigheden optreden, zoals incidenten of heel slecht weer. Dit maakt het vraagstuk wellicht nog complexer, maar dit laten we op dit moment nog buiten beschouwing.

het voertuig aan de bestuurder om de besturing weer over te nemen. Hiermee illustreren we de grenzen van het systeem, en belichten we uitdagingen die aandacht vergen voordat automatische voertuigen een volgend niveau van automatisering kunnen bereiken. Deze analyse geeft ook aandachtspunten aan, waarmee wegbeheerders en autoriteiten rekening dienen te houden.

Een aantal belangrijke conflicten en lastige bestuurdersacties zijn hieronder besproken voor het scenario van een automatisch voertuig op een weefvak:

- Wat als er geen geschikt hiaat is?
- Wat als meerdere voertuigen richting hetzelfde hiaat bewegen?
- Wat als menselijke bestuurders automatische voertuigen 'te snel af zijn'?
- Wat als een menselijke bestuurder een onhandige of illegale manoeuvre maakt?
- Wat als menselijke bestuurders het gedrag van automatische voertuigen gaan manipuleren?

Geen geschikt hiaat, en dan?

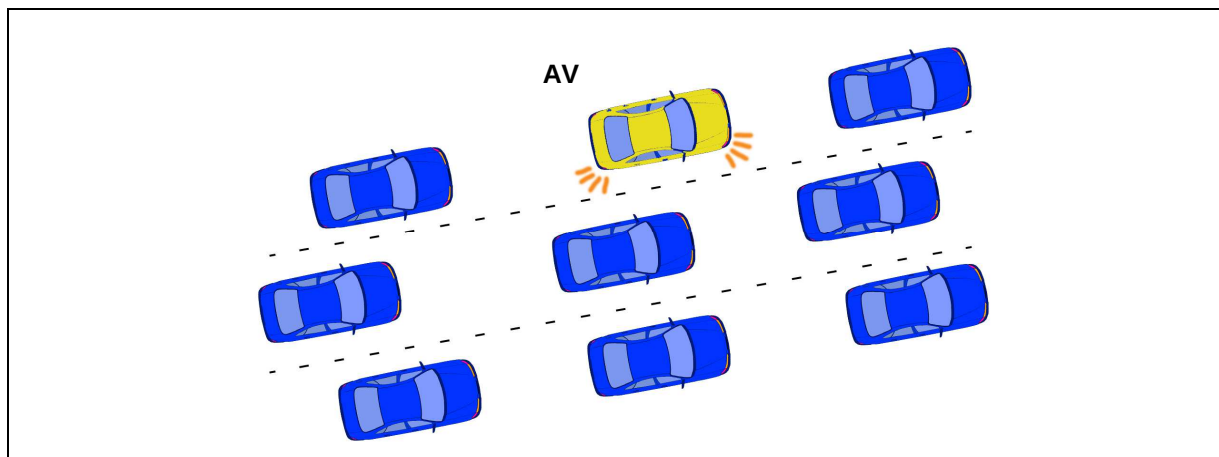
Dit is één van de meest voor de hand liggende conflicten, waarbij er onvoldoende tijd of ruimte tussen voertuigen is, of het zicht op een geschikt hiaat wordt belemmerd, bijvoorbeeld door een lange vrachtauto. Enkele acties van een automatisch voertuig hierbij kunnen zijn:

- Vertragen (om een ander hiaat af te wachten),
- Solliciteren op een hiaat door richting aan te geven (zonder meteen van strook te wisselen),
- Doorrijden (op een verkeerde route).

Van de eerste twee acties is het de vraag of dit wel een geschikt hiaat oplevert, en doorrijden op een verkeerde route zal door een autofabrikant helemaal vermeden willen worden. Andere acties kunnen zijn:

- Stoppen en wachten op een hiaat (op een onveilige plek, zoals op een snelweg),
- Forceren van een hiaat.

Maar het mag duidelijk zijn dat deze acties te allen tijde vermeden dienen te worden in verband met de verkeersveiligheid. Als een automatisch voertuig tijdens het weven er niet uitkomt, hoe lang dient het voertuig dan te wachten voordat de bestuurder hierbij wordt ingeschakeld? Heeft een bestuurder dan nog voldoende tijd? Dit zijn vragen waar nog geen antwoord op is.

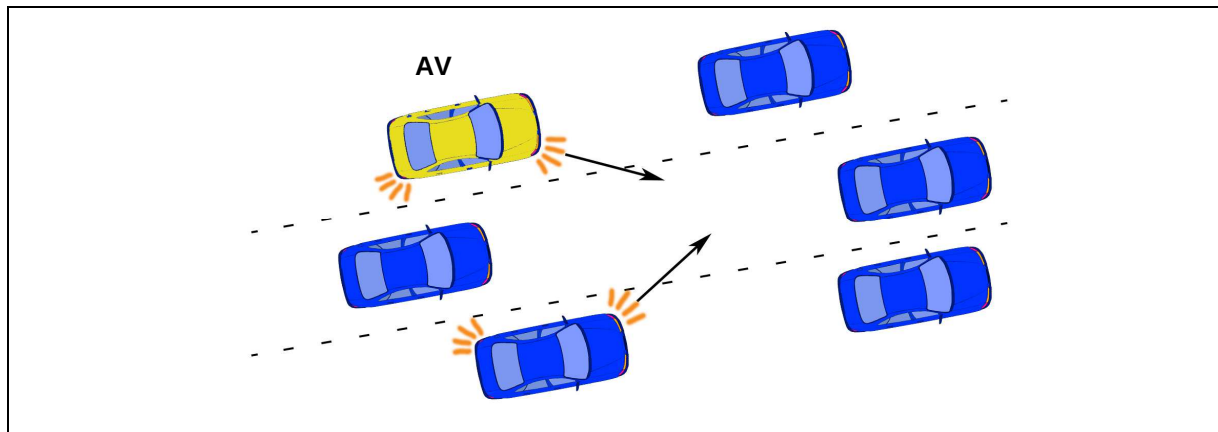


Figuur 4: Voorbeeld van geen geschikte hiaat

Meerdere voertuigen bewegen richting hetzelfde hiaat, en dan?

Het komt regelmatig voor op drukke weefvakken dat een hiaat vanuit links en rechts wordt ingevuld door twee voertuigen die allebei (en in tegengestelde richting) één of meer stroken willen opschuiven. Het wordt aangenomen dat een automatisch voertuig het andere voertuig zal detecteren. (Als dat niet zo is, dan dient het automatische voertuig niet zelfstandig van strook te mogen wisselen en dient er nog gewerkt te worden aan de rijstrookwisselfunctionaliteit van het

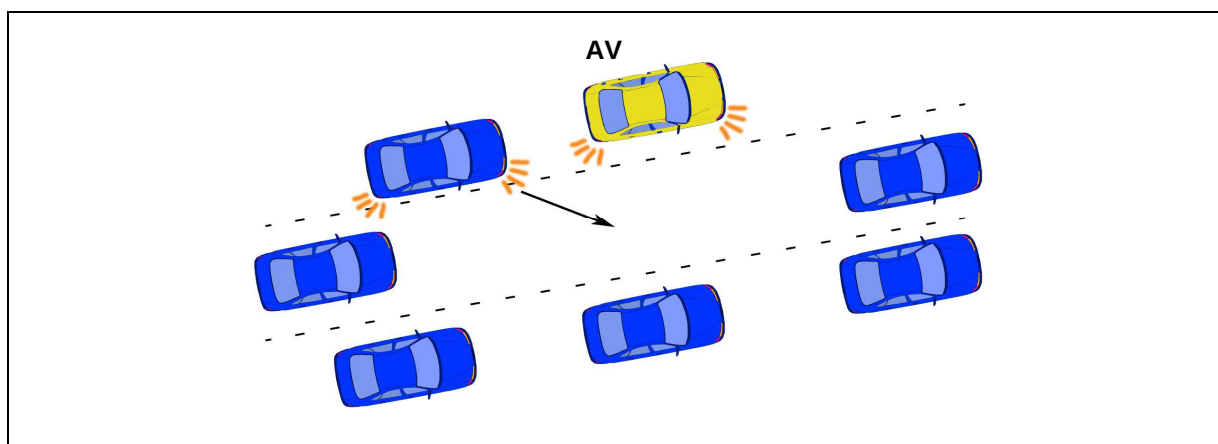
voertuig). Er zijn twee opties voor het automatische voertuig: het eerste is het afbreken van de rijstrookwisselactie, waarbij het reguliere voertuig dus in praktijk voorrang krijgt. Het tweede is het voorzichtig voortzetten van de rijstrookwisselactie en het andere voertuig in de gaten houden, waarbij de actie wordt gestaakt als het andere voertuig ook doorzet en de situatie te kritisch wordt. Uit veiligheidsoverwegingen is het niet waarschijnlijk dat de tweede optie gekozen wordt en dus hebben we hier te maken met een duidelijk voorbeeld van een mogelijke situatie waarin automatische voertuigen 'ondergeschikt voorrang' hebben ten opzichte van reguliere voertuigen in conflictsituaties.



Figuur 5: Voorbeeld van meerdere voertuigen bewegend richting hetzelfde hiaat

Andere voertuigen zijn steeds sneller bij hiaten, kan een automatisch voertuig hier tegenop?

Menselijke bestuurders zijn in staat om op efficiënte manier te handelen en snel te reageren op situaties in het verkeer. Dit zorgt voor een hoge dynamiek in verkeer waar veel handelingen worden uitgevoerd in een korte tijd, zoals het geval is bij een weefvak. Een automatisch voertuig zal in veel opzichten extra veiligheidsbuffers in acht nemen, zoals langere volgafstanden en grotere minimale hiaten, waardoor relatief conservatief rijgedrag het gevolg is. In het ergste geval zal het voertuig mogelijk continu op zoek zijn naar een geschikt hiaat en moeilijk om kunnen gaan met voertuigen die vlak voor zich invoegen en weer uitvoegen. Het is onbekend hoe huidige automatische voertuigen hier mee omgaan, noch de testvoertuigen die nu op de weg rondrijden, noch de voertuigen die in simulatiemodellen gemodelleerd worden. Een belangrijk aspect hier is in hoeverre automatische voertuigen kunnen anticiperen op het gedrag van andere bestuurders. Automatische voertuigen zijn in beginsel reactief, maar dienen in verkeer met een hoge dynamiek juist ook proactief te zijn voor goede interactie met andere voertuigen. Maar het is onbekend in hoeverre ze dat ook kunnen.



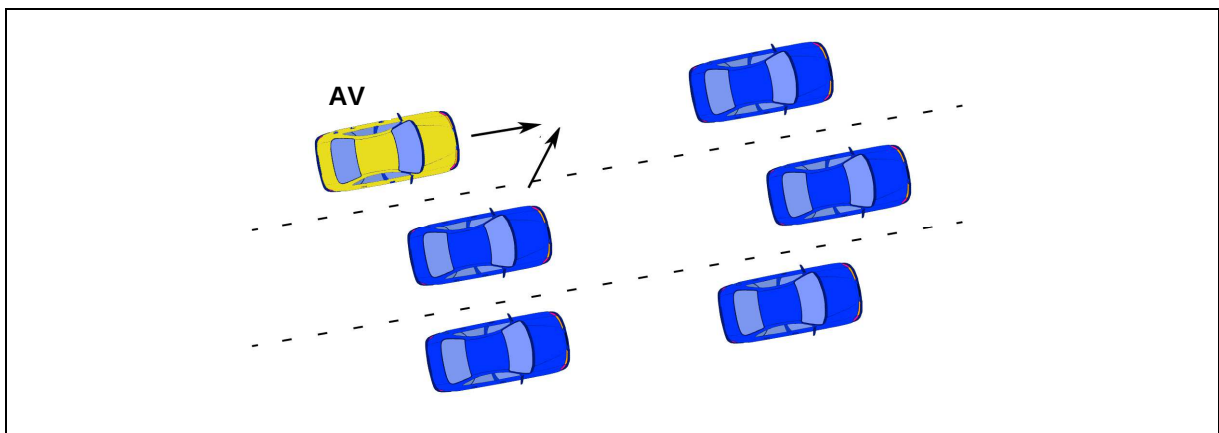
Figuur 6: Voorbeeld van andere voertuigen sneller bij een hiaat

Wat als een menselijke bestuurder de fout ingaat?

Ongevallen vinden dagelijks plaats en in de meeste gevallen omdat een bestuurder een fout maakt. Er vinden echter veel meer bijna-ongevallen plaats dan daadwerkelijke ongevallen, waarbij een fout van een bestuurder door bestuurders onderling wordt opgevangen, o.a. door te waarschuwen, uitwijkmanoeuvres uit te voeren, en door ander faciliterend gedrag. Wanneer een regulier voertuig in de nabijheid van een automatisch voertuig een fout begaat, is het onbekend hoe het automatische voertuig hierop zal reageren en ook of het in staat is om tijdig een foutieve handeling goed te onderscheiden van bedoeld gedrag. Enkele mogelijk acties betreffen:

- Claxon gebruiken,
- Meebewegen binnen eigen rijstrook,
- Afremmen,
- Uitwijken naar een andere rijstrook.

Er is beperkt informatie beschikbaar over of een automatisch voertuig met niveau 3 (de meeste van) deze acties kan uitvoeren. Veel onderzoek op dit moment houdt zich bezig met simpelere manoeuvres waarbij meer ruimte wordt aangenomen om uit te wijken. Als automatische voertuigen deze acties niet kunnen uitvoeren, zal de bestuurder van het automatische voertuig gevraagd worden om in te grijpen. Maar zal het mogelijk zijn om de bestuurder van het automatische voertuig tijdig te waarschuwen? Zo niet, moeten we dan hier uit concluderen dat een automatisch voertuig het risico op een ongeval in deze gevallen vergroot, vanwege een mindere mate van vergevingsgezindheid voor fouten van andere bestuurders? Deze situaties zouden in dat geval beter vermeden kunnen worden door een niveau 3 automatische voertuig en dat kan betekenen dat zo'n voertuig mogelijk niet toegestaan moet worden zelfstandig op een weefvak te rijden.



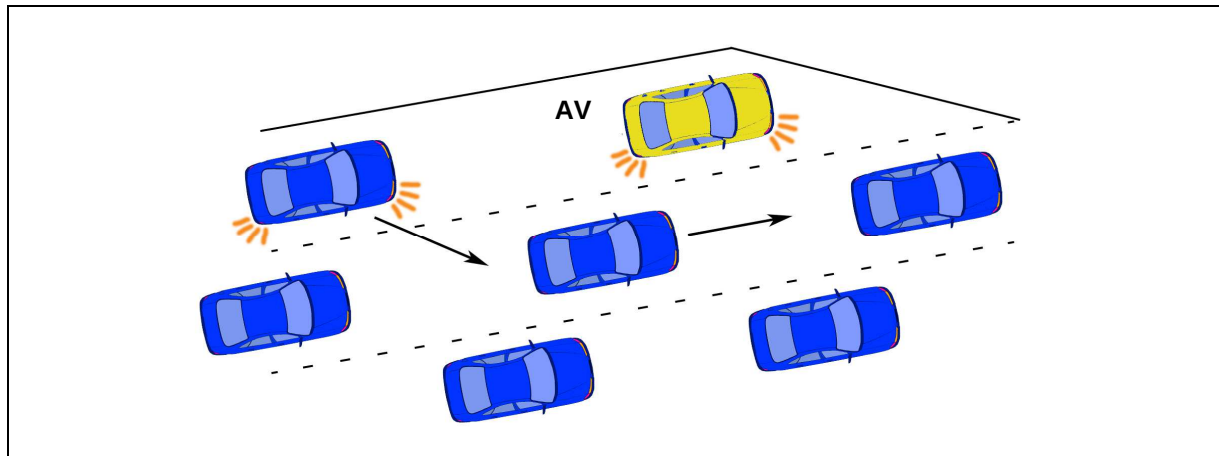
Figuur 7: Voorbeeld van een menselijke bestuurder die een fout begaat

Is er manipulatiegevaar van automatische voertuigen?

De laatste situatie betreft een hypothetisch geval (dat echter niet helemaal ondenkbaar is), namelijk dat automatische voertuigen als zodanig herkend worden door bestuurders van reguliere voertuigen, en hun tekortkomingen en/of extra voorzichtigheid worden misbruikt door deze bestuurders. Bijvoorbeeld, wanneer het bekend is dat automatische voertuigen 'voorrang' zullen verlenen als dit afgedwongen wordt, dan kan het voorkomen dat reguliere bestuurders dit niet alleen per ongeluk doen. Dit benadeelt het automatische voertuig, maar levert mogelijk ook gevaarlijke verkeerssituaties op. Het is nog de vraag of een automatisch voertuig van buiten herkenbaar moet zijn, maar zelfs als dat niet zo is, kan het mogelijk herkend worden aan het rijgedrag. Ook is het zeer de vraag of hier iets aan gedaan kan worden, bijvoorbeeld door het toepassen van een zogenaamd 'conflict protocol' waarin een automatisch voertuig voorrang zal



opeisen in gevallen waarin er niet direct gevaar is op een botsing. Maar ook de implementatie hiervan zal zorgvuldig moeten worden overwogen gezien de mogelijke gevolgen voor de veiligheid.



Figuur 8: Voorbeeld van manipulatie door reguliere voertuigen

De bovenstaande situaties zijn slechts een kleine greep uit alle mogelijke conflicten en acties waarbij automatische voertuigen mogelijk in de problemen kunnen komen. Ze geven al wel een goed beeld van uitdagingen die spelen bij de introductie van automatische voertuigen in praktijk.

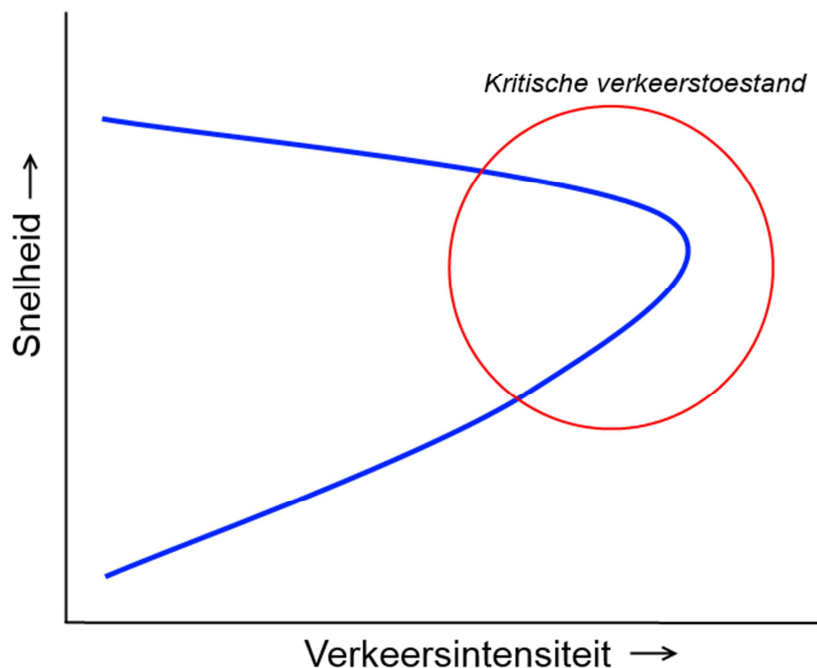
Uitdagingen voor wegbeheerders en (vracht)autofabrikanten

Ondanks een toename in aandacht voor automatisch rijden in de afgelopen jaren, liggen er nog tal van uitdagingen waar aandacht aan geschonken moet worden opdat automatische voertuigen in de praktijk massaal, veilig en efficiënt gebruik kunnen maken van de drukke snelwegen zoals we die in Nederland hebben. We hebben een aantal specifieke voorbeelden van conflictsituaties gegeven om dit te schetsen. Uit de achterliggende analyse kwam een aantal aspecten naar voren waarin automatische voertuigen mogelijk tekort schieten in regulier verkeer. Het gaat om:

- **Situatie- en gedragsherkenning**
Om te kunnen anticiperen, dienen bepaalde situaties en gedrag herkend te worden. Dit lijkt lastig voor automatische voertuigen, die vooral objecten waarnemen.
- **Anticiperend vermogen**
Autonome automatische voertuigen zijn slecht in staat om op verkeerssituaties te anticiperen (want kijken minder ver dan de meeste bestuurders) en reageren vaak reactief in plaats van proactief op acties van andere voertuigen.
- **Flexibiliteit in (veiligheid)protocollen**
Interactie tussen reguliere voertuigen gaat vaak gepaard met een bepaalde mate van flexibiliteit in rijgedrag. Vaak vanuit het oogpunt van veiligheid zijn automatische voertuigen conservatief ingesteld en hebben deze flexibiliteit niet of in veel mindere mate.
- **Rekeninghouden met andere voertuigen**
Automatische voertuigen zijn per definitie niet sociaal, omdat ze het vermogen niet hebben om te interacteren met andere bestuurders. Het ontbreekt ze daarom waarschijnlijk aan een mate van hoffelijkheid om andere weggebruikers ruimte geven waar ze niet per se recht op hebben, maar wel kunnen gebruiken, zoals bij ritsen. Het is ook niet eenvoudig om 'hoffelijkheid' in te programmeren.
- **Gelijkheid t.o.v. reguliere voertuigen**
Dient een automatisch voertuig gelijk behandeld te worden als een regulier voertuig en mag het aanspraak maken op dezelfde rechten? Het eerder beschreven manipulatiegevaar met een situatie met het afdwingen van voorrang schetst hoe lastig dit is, vooral de afweging tussen wenselijkheid en veiligheid.

Deze aspecten hoeven bij een automatisch voertuig van niveau 3 nog niet direct een probleem te zijn, als er wordt aangenomen dat voertuigen van dit niveau de controle vrij vaak en vrij snel teruggeven aan de bestuurder (Shladover, 2015). Waar deze grens ligt, is echter nog niet bekend en daarom is het goed om al deze aspecten te benoemen, die ook gelden voor hogere niveaus van automatisering. De bovengenoemde aspecten zijn enerzijds een uitdaging voor de automotive industrie om oplossingen aan te dragen met betrekking tot de genoemde uitdagingen. Anderzijds liggen er uitdagingen voor wegautoriteiten om afspraken te maken over hoe automatische voertuigen zich dienen te gedragen en waar ze aan dienen te voldoen om automatisch te mogen rijden op hun wegen. Daar bovenop is het nog niet bekend wat de gevolgen zullen zijn van deelname van automatische voertuigen aan het verkeer voor de verkeersdoorstroming. De uitdagingen die hier genoemd worden hebben veelal betrekking op verkeerssituaties waarin het verkeer in een kritische toestand bevindt, die herkend wordt aan een hoge mate van drukte, maar waarin het verkeer nog wel door kan stromen en er nog geen congestie aanwezig is.

Verkeerskundig gezien gaat het vooral om het gebied in het fundamentele diagram zoals aangegeven met de rode cirkel in Figuur 9. Bij vrije doorstroming van het verkeer of in congestie (de takken linksboven en linksonder in de figuur) zullen de bovengenoemde uitdagingen wellicht een minder grote rol spelen, doordat het verkeer onbelemmerd respectievelijk beperkt is in hun bewegingen. Voor de kritische verkeersstoestand geven de genoemde uitdagingen verder aan dat er verscheidene handelingen zijn die een automatisch voertuig in eerste instantie vermoedelijk niet zo efficiënt kan uitvoeren als een gewone bestuurder. Hoe gaat de reguliere weggebruiker hier dan mee om? En welk effect heeft dit op de verkeersdoorstroming? Deze en andere vragen zijn opgenomen in het overzicht van onderzoeksvragen dat TrafficQuest aan het einde van deze memo heeft opgenomen, en die geformuleerd zijn naar aanleiding van dit quick-scan onderzoek.



Figuur 9: Kritische verkeersstoestand in het Fundamentele diagram voor verkeersstromen

Conclusies, vooruitzichten en onderzoeksvragen

Terwijl de komst van automatische voertuigen door velen wordt voorspeld, is er nog veel onbekendheid over de gedragingen van automatische voertuigen in de verkeersstroom, helemaal in relatie tot de huidige weggebruiker. Deze kennishiaten vormen uitdagingen voor de ontwikkelaars van automatische voertuigen, maar zeker ook voor wegbeheerders, die moeten bepalen hoe ze met deze nieuwe voertuigen om zullen gaan. Naar aanleiding van een uitgebreide analyse van verkeer op een weefvak zijn in dit document een aantal potentiële conflictsituaties genoemd, voorbeelden van situaties waarvan nog onvoldoende bekend is hoe een automatisch voertuig daar in zal reageren en of ze mogelijk in de problemen zouden kunnen komen. Daaruit zijn tekortkomingen en bijbehorende uitdagingen afgeleid die automatische voertuigen nog hebben en waar rekening mee gehouden dient te worden bij de doorontwikkeling. Ook zijn deze van belang bij de toelatingseisen voor automatische voertuigen en qua gevolgen voor de verkeersdoorstroming.

Er is hier uitsluitend rekening gehouden met autonome automatische voertuigen, die geen gebruik maken van coöperatieve systemen, met communicatie tussen voertuigen onderling (V2V) dan wel tussen voertuigen en het infrastructuur (V2I). Experts op het gebied van automatisch en coöperatief rijden zijn het grotendeels eens dat systeembrede voordelen voor de verkeersdoorstroming uitsluitend alleen zullen plaatsvinden met coöperatie tussen voertuigen en niet met alleen automatisering (Timmer e.a., 2015, Shladover, 2009). De eerste jaren zullen automatische voertuigen echter naar verwachting geen of beperkt gebruik maken van coöperatie met andere voertuigen of infrastructuur. Uit diverse studies blijkt ook dat coöperatieve systemen vaak een aanzienlijke penetratiegraad nodig hebben voordat ze effectief worden (bijvoorbeeld Shladover, Su, & Lu, 2012). En de infrastructuur is nog niet grootscheeps uitgerust met coöperatieve technologie.

Als automatische voertuigen al op de weg rijden voordat ze coöperatief zijn, dan is het, op basis van de verwachte conservatieve instellingen en vele potentiële conflictsituaties (niet alleen op weefvakken) aannemelijk dat dit tot een verslechtering van de verkeersdoorstroming zal leiden. In veel publicaties wordt juist verwacht dat automatische voertuigen de verkeersdoorstroming zullen verbeteren. Echter, de vele kennishiaten en onbekendheid met betrekking tot de gevolgen voor de verkeersdoorstroming zorgen ervoor dat tot dusver nog niet sluitend is aangetoond of we een verbetering of verslechtering van de verkeersdoorstroming kunnen verwachten. Daarom pleit TrafficQuest ervoor om verder onderzoek uit te voeren om hier helderheid in te scheppen, om de relevante autoriteiten en wegbeheerders houvast te geven om hun beleid beter in te vullen.

Hieronder zijn als aanzet enkele onderzoeksvragen geformuleerd, die inhaken op de benoemde kennishiaten en onderwerpen aandragen voor verder onderzoek om de gevolgen voor de verkeersdoorstroming beter inzichtelijk te maken. Deze lijst is deels overlappend met en deels aanvullend op andere documenten die kennisvragen beschrijven, zoals de Kennisagenda Automatisch Rijden (Alkim & Veenis, 2015) of Automatisch Rijden en C-ITS Bouwstenen voor de kenniskoers (Rijkswaterstaat, 2015). Allereerst, bottom-up denkend naar aanleiding van de beschrijvingen van potentiële conflicten op een weefvak, een aantal gedetailleerde onderzoeksvragen. Vervolgens is daar een aantal meer algemene vragen aan toegevoegd.

Onderzoeksvragen ten aanzien van handelingen van een automatisch voertuig op de weg:

- Wat zal een automatisch voertuig doen wanneer het geen geschikt hiaat kan vinden om van rijstrook te wisselen?
- Is het wenselijk dat een automatisch voertuig bij een rijstrookwisselactie vooraf solliciteert naar een hiaat door bijvoorbeeld vroegtijdig gebruik te maken van de richtingaanwijzer?
- Mag een automatisch voertuig de vorming van een geschikte hiaat forceren door een rijstrookwisseling in gang te zetten in een te klein hiaat? Zo ja, onder welke voorwaarden dient dit te gebeuren?
- Mag een automatisch voertuig tijdelijk kortere volgafstanden accepteren op een wegvak met veel rijstrookwisselingen en veel verkeer dat korte hiaten accepteert?



- Kan een automatisch voertuig voldoende snel handelen* om in snel dynamisch verkeer mee te doen in het verkeer? (*handelen omvat observeren – interpreteren – acteren)
- Worden de verschillende rijstijlen en handelingen van reguliere bestuurders goed herkend door een automatisch voertuig?
- Onder welke omstandigheden kan een automatisch voertuig foutieve handelingen van reguliere voertuigen 'opvangen' om potentiële incidenten te voorkomen? Welke mogelijkheden dient het automatische voertuig dan te hebben en welke acties moet het uitvoeren?
- Hoe handelt een automatisch voertuig als een ander voertuig een onverwachte beweging maakt? (Bijvoorbeeld: anticiperend, afwachtend, enzovoort.)
- Hoe handelt een automatisch voertuig, en hoe dient het te handelen, bij afwijkende verkeerssituaties op naastliggende rijstroken? (Bijvoorbeeld, file of stilstaand verkeer.)
- Hoe dient een automatisch voertuig te handelen bij conflicten met gelijk opgaande voorrang? (Bijvoorbeeld bij een weefbeweging vanuit twee kanten.) Welke gevolgen heeft dit?
- Hoe dient een automatisch voertuig te handelen als voorrang onterecht (dreigt te worden of) wordt ontnomen?
- Wat moeten de gevolgen zijn als een automatisch voertuig de verkeersregels overtreedt (op een veilige wijze) wanneer het gegeven de situatie moeilijk is voor het automatische voertuig om dit niet te doen? (Bijvoorbeeld, rechts inhalen van een links langzaam rijdend voertuig, als dit de enige mogelijkheid biedt om op de gewenste strook te belanden.)
- Kan een automatisch voertuig gedrag van reguliere voertuigen leren te interpreteren om anticiperend te handelen? Welke anticiperende handelingen worden dan mogelijk en wat zijn de gevolgen voor de verkeersdoorstroming?

De voorafgaande analyse en hierboven gegeven onderzoeksvragen richtten zich vooral op handelingen van automatische voertuigen en verkeersdoorstroming. Er kwamen tijdens de analyse ook andere onderzoeksvragen naar voren, zoals:

- Welke infrastructuurobjecten kan een automatisch voertuig niet of niet goed herkennen, en wat zijn de gevolgen hiervan? (denk aan bebording, afzettingen, enzovoort)
- Zijn wegbeschadigingen herkenbaar voor een automatisch voertuig? En kan het deze op gepaste wijze goed ontwijken?
- Wat zijn acceptabele hiaten om te mogen wisselen van strook? Zijn er omstandigheden waarin kortere hiaten geaccepteerd mogen worden?
- Mag een automatisch voertuig meerdere rijstroken opschuiven in één rijstrookwisselactie?
- Onder welke weers- of klimaatomstandigheden zou een automatisch voertuig functiebeperkingen kunnen krijgen? (Bijvoorbeeld door verstoring van sensing.)
- Onder welke situaties kan een automatisch voertuig in het verkeer worden gemanipuleerd en hoe dient het automatische voertuig dan te handelen?
- Hoe kan een automatisch voertuig socialer worden gemaakt om een betere integratie met andere voertuigen te bevorderen?
- Hoeveel verbetert of verslechtert de verkeersveiligheid onder verschillende omstandigheden als er meer automatische voertuigen komen?

Uiteindelijk is de hoofdvraag hoe automatische voertuigen de verkeersdoorstroming zullen beïnvloeden. Hierbij horen onderzoeksvragen als:

- Welke invloed heeft een automatisch voertuig op de verkeersdoorstroming ...
 - op een homogene wegcorridor?
 - op een weefvak?
 - bij een oprit?
 - Bij verschillende penetratiegraden van automatische voertuigen?
- Welke aspecten zijn maatgevend voor een positieve invloed van een automatisch voertuig op de verkeersdoorstroming?
- Zijn deze aspecten in te stellen om de verkeersdoorstroming te verbeteren? Zo ja, hoe? Zo niet, waarom?
- Hoe verandert de verkeerstheorie in verkeer met automatische voertuigen? (Bijvoorbeeld het fundamentele diagram.)



- Is gescheiden weginfrastructuur voor automatische voertuigen nodig? (Bijvoorbeeld doelgroepstroken.)

Tot slot

TrafficQuest blijft aan dit onderwerp werken en zal hiervoor binnen Nederland afstemming zoeken met andere partijen die met het onderwerp bezig zijn. Er zal verbinding gezocht worden met de Kennisagenda Automatisch Rijden en de Landelijke ITS Ronde Tafels die DITCM Innovations, in opdracht van Beter Benutten en Connecting Mobility en in samenwerking met Connekt en Automotive NL sinds maart 2015 organiseert. De in deze memo behandelde onderwerpen zijn in eerste instantie vooral interessant voor de Ronde Tafel Effecten.

Ook zal TrafficQuest kijken naar hoe impacts gekwantificeerd kunnen worden. Daarvoor lijkt microsimulatie een goed instrument, omdat daarmee verschillende verkeerssituaties, instellingen van automatische voertuigen en reacties van bestuurders gemodelleerd kunnen worden en bekeken kan worden hoe dit de verkeersafwikkeling beïnvloedt. Hierbij wordt input vanuit de automotive industrie gezocht. Verder wordt aansluiting gezocht bij de verkenningen die het Ministerie van Infrastructuur en Milieu en Rijkswaterstaat uitvoeren om de impact van automatisch rijden op nationaal niveau met het Landelijk Model Systeem (LMS) te kunnen berekenen (Snelder et al., 2015; Snelder et al., 2016). In internationaal verband zal TrafficQuest bijdragen aan het verkrijgen van verdere inzichten in de impacts van automatisch rijden op de verkeersafwikkeling en verkeersmanagement, mogelijk in de vorm van het schrijven van een White Paper, op te stellen samen met een aantal Europese, Amerikaans en Japanse experts.

Referenties

Timmer, J., Pel, B., Kool, L., van Est, R., & Brom, F. (2015), Converging Roads, Linking self-driving cars to public goals. Report by the Rathenau Institute. ISBN/EAN: 978-90-77364-65-9

Alkim, T & J. Veenis (2015), Verslag Kennisagenda Automatisch Rijden 14 april 2015, mei 2015, beschikbaar op <http://kennis-automatisch-rijden.weebly.com/uploads/1/3/0/8/13083631/kennisagenda-automatisch-rijden-verslag14april2015-2.pdf>.

Gorter, M. (2015), Adaptive Cruise Control in Practice, A Field Study and Questionnaire into its influence on Driver, Traffic Flows and Safety. TU Delft and Royal Haskoning DHV – master thesis.

Rijkswaterstaat (2015), Automatisch Rijden en C-ITS Bouwstenen voor de kenniskoers. Intern document.

SAE International (2014), Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, SAE International, rapport SAE J 3016, 16 January 2014.

Shladover, S. E. (2015). Road Vehicle Automation History, Opportunities and Challenges. Presentation at Connekt/ITS Netherlands, Delft, The Netherlands. 9 November 2015.

Shladover, S. E., Su, D., & Lu, Z.-Y. (2012). Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow. 91st TRB Annual Meeting. Washington, DC, USA.

Shladover, S. E. (2009). Cooperative (rather than autonomous) vehicle-highway automation systems. Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE, 1(1), 10-19.



Snelder, M., de Kievit, M. & van Arem, B. (2016), Automatische voertuigen in het LMS ten behoeve van de NMCA 2016. TNO-rapport, TNO 2015 R11652.

Snelder, M., van Arem, B., Hoogendoorn, R. & van Nes (2015), Methodische Verkenning Zelfrijdende Auto's en Bereikbaarheid. TU Delft, T&P 1501.

TrafficQuest (2015), Werkprogramma 2016, november 2015.

Wikipedia (2016), https://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous_car#Potential_advantages, website geraadpleegd in februari 2016.

Bijlage

Level	Name	Narrative definition	Execution of steering and acceleration/ deceleration	Monitoring of driving environment	Fallback performance of dynamic driving task	System capability (driving modes)	BASf level	NHTSA level
Human driver monitors the driving environment								
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a	Driver only	0
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes	Assisted	1
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes	Partially automated	2
Automated driving system ("system") monitors the driving environment								
3	Conditional Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	Human driver	Some driving modes	Highly automated	3
4	High Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	System	Some driving modes	Fully automated	3/4
5	Full Automation	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes		

