



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

Smart mobility in de relatie tot doorstroming op de weg

Victor Knoop

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM



Samenvatting

Smart mobility in de relatie tot doorstroming op de weg

Digitale techniek gaat een steeds grotere rol spelen bij het autorijden. In dit rapport onderzoeken we de effecten van smart mobility-maatregelen op de doorstroming op de weg. In het bijzonder kijken we daarbij naar smart mobility-maatregelen die de rijtaak beïnvloeden.

Twee hoofdvragen staan centraal:

- (1) *Welke effecten van **smart mobility**-systemen op de doorstroming van verkeer zijn bekend?*
- (2) *Hoe kunnen de effecten van **smart mobility**-maatregelen op doorstroming in de toekomst bepaald worden (deze vraag is relevant voor de maatregelen waarvoor de effecten niet bekend zijn)?*

We richten ons primair op systemen in de auto. Dat kunnen systemen zijn die informatie in de auto brengen, of technieken in de auto zelf. Systemen die de bestuurder proberen te beïnvloeden zonder techniek in de auto, zoals de dynamische snelheidslimieten die op portalen getoond worden, vallen buiten de reikwijdte van dit rapport.

Bekende effecten van smart mobility op de doorstroming

Op basis van de wetenschappelijke literatuur en niet-wetenschappelijke rapporten inventariseren we de in het kader van de eerste hoofdvraag gerapporteerde effecten. Deze effecten zijn bekend vanuit de empirie, op basis van simulaties of op basis van theoretische overwegingen. In veel gevallen is er geen literatuur over de directe effecten die de smart mobility-maatregelen op de doorstroming hebben. In dat geval vermelden we de gerapporteerde gevolgen van de maatregel (bijvoorbeeld minder variatie in snelheid), en zoeken we naar literatuur over de effecten op de doorstroming van die gerapporteerde gevolgen. Zo is het soms indirect mogelijk om een effect van de maatregel op de doorstroming te bepalen.

Een groot deel van de smart mobility-maatregelen zijn systemen die de autobestuurder ondersteunen. We analyseren hier de effecten van in-voertuig-filestaartbeveiliging, *intelligent speed adaptation (ISA)*, *adaptive cruise control (ACC)*, *cooperative adaptive cruise control (CACC)*, rijstrookassistentie (LKA of LCC) en tactische regelingen. De effecten op de doorstroming splitsen we in twee klassen, die zijn bepaald naar de oorzaak van de vertraging. De twee klassen onderscheiden zich door de verhouding tussen het verkeer dat de weg wil gebruiken en de capaciteit van het betreffende wegdeel. In de eerste klasse is de intensiteit op de weg lager dan de capaciteit en wordt de doorstroming niet beïnvloed door een capaciteitsbeperking stroomafwaarts. In deze klasse verhogen veel smart mobility-maatregelen de snelheid, en is het effect voor sommige maatregelen onduidelijk. Tactische regelingen waarbij een wegbeheerder specifiek voertuigen instrueert, of CACC waarbij voertuigen met elkaar kunnen communiceren om de doorstroming te verbeteren, hebben in deze klasse het grootste effect. In de tweede klasse wordt de lagere snelheid veroorzaakt door een capaciteitsbeperking of een vraagverhoging stroomafwaarts, bijvoorbeeld een wegversmalling of een oprit waar zich de kop van een file vormt. Voor deze klasse vertonen de maatregelen in het geval van een capaciteitsbeperking wisselende effecten. Opnieuw hebben tactische regelingen en CACC het grootste positieve effect. Opmerkelijk is dat ACC, adaptieve cruise control zonder communicatie, een negatief effect op de doorstroming heeft.

Route-advies blijkt effect te hebben op de routekeuze van bestuurders, en heeft een verschillende uitwerking op de doorstroming: over het algemeen zal route-advies ertoe leiden dat de gereden afstand toeneemt en de vertraging op de originele route afneemt, terwijl de vertraging op de alternatieve route zal toenemen.

Toekomstige bepaling van effecten van smart mobility op de doorstroming

Voor de tweede hoofdvraag, het bepalen van de effecten van smart mobility-maatregelen in de toekomst, schetsen we twee mogelijke aanpakken. We onderscheiden een top-downaanpak en een bottom-upaanpak.

Bij de top-downaanpak worden veel data verzameld van verkeersstromen en van het gebruik van smart mobility-systemen. Als voldoende data beschikbaar zijn, kunnen de effecten van elk van de systemen – in principe – bepaald worden. De effecten op de doorstroming zullen niet lineair afhankelijk zijn van de mate van gebruik, en ook zullen verschillende systemen elkaar beïnvloeden. Met voldoende informatie zou dat te schatten moeten zijn. Het is lastig om de mate van gebruik van de systemen te bepalen, omdat het niet eenvoudig is vast te stellen welke bestuurder wanneer welk systeem gebruikt. Mogelijk kunnen de data die autofabrikanten zelf verzamelen, daarbij helpen. Een complicatie is verder dat het lastig is te extrapoleren naar een hoger gebruik van maatregelen, en dat de effecten van combinaties van maatregelen mogelijk niet accuraat gekwantificeerd kunnen worden.

Een andere aanpak is een bottom-upaanpak, waarbij het effect van een bepaald smart mobility-systeem volledig in kaart wordt gebracht in een experimentele omgeving. Dat kan bijvoorbeeld een testbaan zijn, waar geanalyseerd wordt wat voor snelheden een voertuig rijdt bij welke tussenliggende afstand. Ook kan daarbij gekwantificeerd worden wat de effecten zijn wanneer verschillende systemen gecombineerd worden. Als deze relaties bekend zijn, kunnen de effecten van de smart mobility-maatregelen op de doorstroming bepaald worden met behulp van een microscopische verkeerssimulatie. Om uit die simulatie betrouwbare resultaten te krijgen, is een accurate invoer van hoe de systemen werken (verkregen door de bottom-upaanpak) essentieel. Deze bottom-upaanpak kan ook de effecten kwantificeren voor een mate van gebruik die nog niet in het verkeer wordt waargenomen.

Inhoud

Samenvatting 2

1 Inleiding 5

- 1.1 Onderzoeksvragen 5
- 1.2 Methode 6
- 1.3 Opbouw rapport 7

2 Definities en afbakening 8

- 2.1 Verkeerskundige effecten 8
- 2.2 Rijtaakondersteunende systemen 11

3 Gerapporteerde effecten 14

- 3.1 In-voertuig-filestaartbeveiliging 14
- 3.2 Intelligent Speed Adaptation 14
- 3.3 Adaptive cruise control 15
- 3.4 Cooperative adaptive cruise control 16
- 3.5 Rijstrookassistentie 16
- 3.6 Tactische regelingen 17
 - 3.6.1 Snelheidsadvies en -beperking op de snelweg 17
 - 3.6.2 Hulp bij rijstrook wisselen 17
 - 3.6.3 Intelligente verkeerslichten 18
- 3.7 Routeadvies 18

4 Het bepalen van de effecten van smart mobility-maatregelen in de toekomst 19

- 4.1 Bottom-up of top-down 19
 - 4.1.1 Bottom-up: van individuele eigenschappen naar doorstroming 19
 - 4.1.2 Top-down: effecten afleiden uit collectieve eigenschappen 20
 - 4.1.3 Vergelijking 21
- 4.2 Nieuwe databronnen 22

5 Conclusies 24

Summary 26

Referenties 28

Colofon 32

1 Inleiding

De reistijdvertraging op het Nederlandse hoofdwegennet is in het afgelopen decennium toegenomen. De vertragingen tellen op tot enkele tientallen miljoenen (voertuigverlies-)uren per jaar (KiM, 2020). Verschillende oplossingen kunnen deze vertragingen helpen reduceren, zoals het aanleggen van infrastructuur om de capaciteit van het wegennet te vergroten. Minder prijzige oplossingen zijn de substitutie naar andere vervoerswijzen, het minder reizen en het vaker buiten de spits reizen.

Een heel andere manier om de doorstroming te verbeteren is het gebruik van slimme technologie in de voertuigen. Het wegennet zou daarmee mogelijk meer verplaatsingen kunnen verwerken. Deze technische middelen zijn niet altijd ontworpen om de doorstroming te verbeteren, maar kunnen daar wel een effect op hebben.

De hoofdvraag die we in dit rapport onderzoeken, luidt:

Wat zijn de verwachte effecten van een aantal smart mobility-maatregelen op de doorstroming?

In de literatuur zoeken we naar antwoorden op die vraag. Niet voor alle systemen is echter al voldoende bekend over de effecten van smart mobility-maatregelen. Daarom beschrijven we in dit rapport ook onderzoeksmethoden die het mogelijk maken om in de toekomst vragen over het effect van de systemen op de doorstroming te beantwoorden.

1.1 Onderzoeksvragen

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden onderscheiden we in dit rapport twee nadere onderzoeksvragen:

- 1 Welke effecten van huidige bekende smart mobility-maatregelen op de doorstroming zijn bekend?**
- 2 Hoe kunnen de effecten op de doorstroming van toekomstige smart mobility-maatregelen bepaald worden?**

Voor de eerste hoofdvraag onderzoeken we de effecten van smart mobility-toepassingen. Voor de toepassingen die operationeel of tactisch ingrijpen, kijken we naar de effecten op de snelheid bij een onder-kritische dichtheid, en naar de effecten op de capaciteit. Routeadvies kan ervoor zorgen dat mensen een alternatieve route kiezen, waardoor er effecten op de doorstroming ontstaan.

We komen tot de volgende gedetailleerde deelvragen:

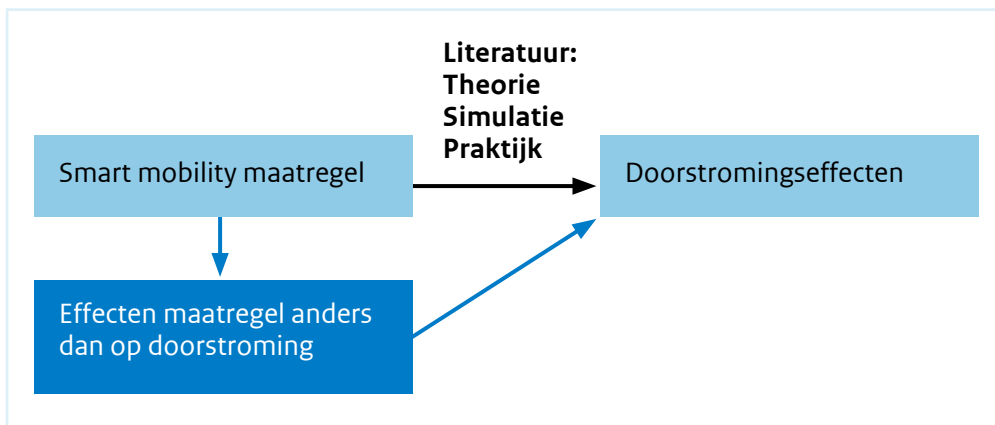
- (1) Wat is het effect op (a) snelheid bij een bepaalde intensiteit en (b) capaciteit van smart mobility-maatregelen?*
- (2) Wat is het effect van routeadvies op de afgelegde afstand en de snelheid?*
- (3) Wat is een geschikte methode om in de toekomst effecten van smart mobility-maatregelen te meten, en welke data zouden daarvoor verzameld moeten worden?*

De eerste deelvraag onderzoeken we voor de volgende maatregelen: in-voertuig filestaart-beveiliging, *intelligent speed adaptation (ISA)*, *adaptive cruise control (ACC)*, *cooperative adaptive cruise control (CACC)*, rijstrookassistentie (LKA of LCC), en tactische regelingen. Bij tactische regelingen hangen de effecten sterk af van de specifieke boodschappen die het systeem aan de bestuurder aflevert. We kijken naar snelheidsadvies op de snelweg, rijstrookadvies op de snelweg, en communicatie met verkeerslichten.

De tweede deelvraag gaat over maatregelen waarvoor nu nog geen effecten bekend zijn, en waarvoor we de effecten ook pas in de toekomst kunnen meten. Dat geldt in het bijzonder voor maatregelen die nu nog niet in gebruik zijn. Daarom zal niet voor alle bovengenoemde maatregelen een eenduidig antwoord in de literatuur te vinden zijn. Vandaar de derde deelvraag.

1.2 Methode

Voor de deelvragen 1 en 2 gebruiken we dezelfde methode, namelijk een literatuurstudie. Deze literatuurstudie kent twee stappen. In eerste instantie zoeken we naar evidentie voor een *rechtstreekse* relatie tussen de smart mobility-maatregel en het effect op de doorstroming. In tweede instantie zoeken we naar een *indirecte* relatie; zie figuur 1.1.



Figuur 1.1 Directe (zwart, bovenste pijl), of indirecte (blauw, onderste lijn) manier om tot inzicht te komen van de doorstromingseffecten van smart mobility-maatregelen.

De eerste stap is dus een literatuurstudie op basis van de wetenschappelijke en grijze literatuur naar rechtstreekse antwoorden op de gedetailleerde onderzoeksvragen. Daarbij onderzoeken we expliciet hoe de onderzoekers tot hun conclusie gekomen zijn, en maken we onderscheid tussen drie soorten bevindingen:

- (a) *Conclusies op basis van theoretisch verwachte effecten;*
- (b) *Conclusies op basis van resultaten uit simulatie- en modelstudies;*
- (c) *Effecten die in de praktijk zijn gemeten, bijvoorbeeld via kleinschalige pilots of grootschalige praktijkstudies.*

Als er geen expliciete directe relatie tussen smart mobility en doorstroming in de literatuur te vinden is, kijken we naar indirecte aanwijzingen voor effecten op de doorstroming (zie ook figuur 1.1). Op basis van een literatuurstudie gaan we na welk concreet effect van de smart mobility-maatregel wordt beschreven, ook als dat niet-specifieke veranderingen voor de doorstroming zijn. Vervolgens zoeken we in andere literatuur naar de relatie tussen dat effect en de doorstroming. Op deze manier kunnen we mogelijk indirect aangeven wat de smart mobility-toepassing voor effect heeft op de doorstroming. Voor vraag 3 gaan we terug naar de elementen in het verkeerssysteem die de doorstroming beïnvloeden. Gebaseerd op de inzichten hoe in de literatuur relaties worden gelegd, analyseren we de stappen die gezet moeten worden om de juiste data en methode te bepalen.

1.3 Opbouw rapport

In hoofdstuk 2 bakenen we verder af wat we onder smart mobility verstaan, wat de verkeerskundige effecten daarvan zijn en welke maatregelen mogelijk zijn. Hoofdstuk 3 gaat vervolgens over de gerapporteerde effecten van de onderscheiden smart mobility-maatregelen. Hoofdstuk 4 presenteert de benodigde stappen, data en methode voor verder onderzoek. En in hoofdstuk 5 vatten we de belangrijkste conclusies samen.

2 Definities en afbakening

Smart mobility is een verzamelnaam voor alle digitale technologie die invloed heeft op het reizen. Er is een grote variëteit aan mogelijke systemen, die verschillende doelen dienen. Sommige systemen zijn primair gericht op de veiligheid, andere dienen het comfort van de bestuurder. We richten ons in dit rapport op systemen die de bestuurder assisteren bij hun rijtaak. Die rijtaak is onderverdeeld in drie niveaus: het *operationele* niveau (het rijden zelf, zoals gas geven en de rem bedienen), het *tactische* niveau (bijvoorbeeld van rijstrook wisselen) en het *strategische* niveau (bijvoorbeeld route kiezen) (Michon, 1985). Daarbij kijken we primair naar systemen in de auto, bijvoorbeeld systemen in de auto die informatie geven, of technieken in de auto zelf. Deze systemen leggen we verder uit in paragraaf 2.2. Systemen die de bestuurder proberen te beïnvloeden zonder techniek *in* de auto, zoals dynamische snelheidslimieten die op portalen getoond worden, vallen buiten de reikwijdte van dit rapport.

Voor alle relevante smart mobility-toepassingen analyseren we de effecten op de doorstroming. Daarbij concretiseren we die effecten naar effecten op de reistijd (verlaging van snelheid) en uiteindelijk op de vertraging. In paragraaf 2.1 definiëren we het begrip 'doorstroming' en schetsen we de keuzes die we hebben gemaakt bij de uitgevoerde analyses.

Sommige smart mobility-maatregelen zijn primair ontworpen om de veiligheid te verbeteren, of kunnen daar in ieder geval een effect op hebben. De directe effecten die deze maatregelen hebben op de doorstroming (door verandering van snelheid of wegcapaciteit), analyseren we in dit rapport. Daarnaast hebben de maatregelen ook indirecte effecten op de doorstroming. Zo kan het aantal ongevallen door de smart mobility-toepassingen afnemen, en daarmee de vertraging als gevolg van die ongevallen. Vertragingen veroorzaakt door ongevallen vormen nu circa 25% van alle vertragingen (TrafficQuest, 2019). De indirecte effecten op de doorstroming analyseren we door eerst te bepalen welke effecten de maatregelen op de veiligheid hebben. Omdat dat een methodologisch andere aanpak vereist dan we gebruiken voor de analyse van de directe effecten, nemen we deze indirecte effecten van maatregelen (dus betere doorstroming door minder ongevallen) in dit rapport niet mee.

2.1 Verkeerskundige effecten

Er zijn twee mechanismen die directe vertragingen op de weg veroorzaken (zie tekstkader). We splitsen de onderzoeksvraag daarom verder uit naar (1) hoe verandert de snelheid van automobilisten als het in hun directe omgeving drukker is? en (2) hoe verandert de capaciteit van de weg? Los van de effecten op een bepaald wegdeel (snelheid en capaciteit) kunnen er ook effecten zijn op netwerkniveau. Voor dit laatste kijken we in dit rapport naar de effecten die er zijn als mensen een andere route nemen. Smart mobility-maatregelen kunnen ook de verkeersvraag (dat wil zeggen: hoe veel mensen willen reizen) veranderen, bijvoorbeeld door een toegenomen comfort en gemak van het autorijden. Dit wordt ook wel de latente vraag genoemd. Deze vraagkant blijft in dit rapport buiten beschouwing.

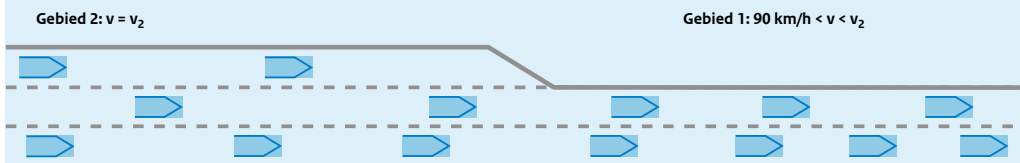
Mechanismen voor vertragingen

Een lagere snelheid op de weg kan door 2 mechanismen veroorzaakt worden: (1) verkeersdichtheid bij een onder-kritische dichtheid en (2) een lagere capaciteit.

Definitie van capaciteit: De capaciteit van de weg is gedefinieerd als het maximale aantal voertuigen per tijdseenheid dat langs een bepaald punt over een weg kan passeren. Meer in detail zijn er twee verschillende waarden voor de capaciteit: (1) de vrije capaciteit, ofwel de maximale intensiteit voordat er file ontstaat, en (2) de afrijcapaciteit, ofwel de intensiteit die uit de file stroomt nadat deze ontstaan is. Over het algemeen is die 2e capaciteit lager, met verschillen van een paar tot enkele tientallen procenten (Cassidy and Bertini, 1999; Hall and Agyemang-Duah, 1991).

Laten we dieper ingaan op de relatie tussen capaciteit en de volgtijd van voertuigen. De verkeersintensiteit is de inverse van de gemiddelde volgtijd van de auto's. Als voorbeeld: bij een intensiteit van 1.800 vtg/h op een rijstrook passeren de opeenvolgende voertuigen gemiddeld met een volgtijd van $1/1.800$ h, ofwel 2 seconde. De capaciteit (de maximale intensiteit) wordt bereikt als auto's elkaar op de kortst mogelijke (veilige) gemiddelde tijd volgen. De capaciteit van een rijstrook is het maximale aantal voertuigen dat per uur een punt op die rijstrook kan passeren. De capaciteit van een gehele rijbaan hangt af van het aantal rijstroken. Als er (bijvoorbeeld door rijtaakondersteunende systemen) een verandering plaatsvindt van de minimale volgtijd, heeft dat dus direct een effect op de capaciteit.

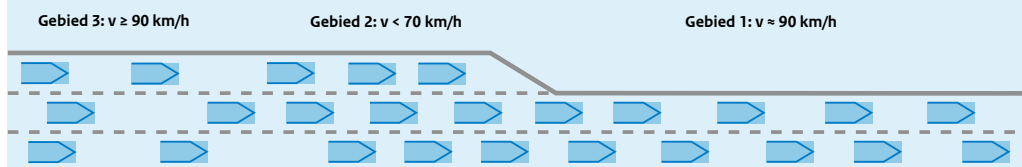
Naast de gemiddelde (minimale) volgtijd is ook de stabiliteit van verkeer van belang. Stabiliteit geeft aan hoe opeenvolgende auto's reageren op een (kleine) verlaging van de snelheid van hun voorligger. Er is een situatie denkbaar waarbij auto's dicht op elkaar rijden (kleine volgtijd), wat een hoge capaciteit impliceert. Als de eerste auto remt, en de tweede moet harder remmen, en de derde nog harder enzovoort, dan is dat geen stabiele situatie. Als zo'n rembeweging versterkt wordt doorgegeven, is het verkeer niet 'string-stabiel'. Het is voor de doorstroming van belang dat de maximale intensiteit hoog is. Niet alleen hoog gedurende een korte tijd, maar ook gedurende een langere tijd. Een techniek die bij bepaalde auto's een korte volgtijd kan bewerkstelligen, leidt dus niet per se tot een betere doorstroming als het verkeer niet stabiel is. Kortom: bij het bepalen van de capaciteit is het onvoldoende om alleen te kijken naar de kortst mogelijke volgtijd.



Figuur 2.1 Vertraging in gebied 1 bij onder-kritische dichtheid. De snelheid in gebied 2 is v_2 , en de snelheid in gebied 1 is v_1 , waarbij v_1 lager is dan v_2 , maar hoger dan 90 km/h.

Het eerste mechanisme: vertraging bij onder-kritische dichtheid. De intensiteit is hoog zodat automobilisten op een bepaald wegdeel niet met de door hen gewenste snelheid kunnen rijden: gebied 1 in figuur 2.1. De snelheid (aangegeven met v) – en dus de vertraging – hangt af van hoe snel mensen met een bepaalde onderlinge afstand nog kunnen rijden. De intensiteit in gebied 1 en gebied 2 is hetzelfde.

De snelheid daalt naarmate de intensiteit toeneemt. De minimale snelheid in gebied 1 is de snelheid bij de hoogste intensiteit, ook wel de kritische snelheid genoemd. Dit is circa 90 km/h. De dichtheid van voertuigen op de capaciteit noemen we de kritische dichtheid; in gebied 1 is de dichtheid lager dan die kritische dichtheid (want de intensiteit is nog niet maximaal). Daarom noemen we de dichtheid is onder-kritisch. Als de intensiteit (instroom) in gebied 2 toeneemt, wordt gebied 1 op een gegeven moment op zijn maximale intensiteit gebruikt, de (vrije) capaciteit van de weg. Dan ontstaat situatie 2; zie hieronder. Merk op dat dat de snelheid in gebied 1 niet verder omlaag gaat (want de intensiteit kan daar niet hoger worden).



Figuur 2.2 Vertraging in gebied 2 door capaciteitsbeperking in gebied 1. De vertraging in gebied 2 wordt bepaald door de capaciteit in gebied 1, en niet door de eigenschappen van de verkeersstroom in gebied 2. In gebied 1 is de snelheid (aangegeven v) ongeveer 90 km/h, in gebied 2 lager dan in gebied 1 en lager dan circa 80 km/h en in gebied 3 hoger dan circa 90 km/h.

Het tweede mechanisme. Als de intensiteit stroomopwaarts (gebied 3 in figuur 2) hoger is dan de capaciteit van een wegdeel verder stroomafwaarts (gebied 1), komt er vertraging stroomopwaarts vanaf de plek waar die capaciteitsbeperking begint (gebied 2). De vertraging door dit tweede mechanisme wordt volledig bepaald door de capaciteit van de weg stroomafwaarts. Een ander rijgedrag in gebied 2 (bijvoorbeeld door techniek in de auto) zal de vertraging veranderen, omdat de verkeersstroom nu eenmaal niet door het stroomafwaartse deel van de weg kan worden afgevoerd.

In figuur 2.2 zien we in gebied 1 dus een toestand van afrijcapaciteit, waarvan de intensiteit lager is dan de vrije capaciteit. Figuur 2.2 illustreert dat de afrijcapaciteit van wegvak 2 gelijk is aan de capaciteit van wegvak 1. De capaciteit van wegvak 2 is hoger dan de capaciteit van wegvak 1, zodat er op wegvak 1 in principe door het tweede mechanisme geen vertraging ontstaat (wel door het eerste mechanisme). Wegvak 1 veroorzaakt wel problemen voor wegvak 2, want het verkeer dat ook door wegvak 1 wil rijden, heeft weinig aan de hogere capaciteit op wegvak 2.

2.2 Rijtaakondersteunende systemen

Rijtaakondersteunde systemen zijn op te splitsen in de niveaus waarop ze aangrijpen. Van laag naar hoog zijn dat: het operationele, tactische of strategische niveau (Michon, 1985). Sommige systemen werken op verschillende niveaus. We zullen deze systemen behandelen bij het laagste niveau waarop ze ingrijpen.

Operationeel niveau

Allereerst het operationele niveau, het feitelijk besturen van de auto. Voor de ondersteuning daarbij biedt SAE (SAE, 2016) een eenduidig kader voor de autonomie van voertuigen. Het kader bevat vijf niveaus met ondersteuning, en een zesde niveau waarbij er geen ondersteuning is. Het onderscheid tussen de niveaus is als volgt:

- Op niveau 0 voert de bestuurder alle taken zelf uit.
- Op niveau 1 neemt het voertuig een taak over, bijvoorbeeld gasgeven en remmen door middel van een *adaptive cruise control* (ACC), of het in de rijstrook houden van het voertuig door middel van *lane centering control* (LCC). Op dit niveau kan het voertuig niet zelf rijden, en is een bestuurder nodig om permanent gas, rem en/of stuur te bedienen.
- Op niveau 2 werken meer systemen samen voor de longitudinale rijtaak (gasgeven/remmen) en de laterale rijtaak (sturen). Dat kan dus bijvoorbeeld een combinatie zijn van ACC en LCC. Het voertuig kan technisch zelfstandig rijden (gasgeven en sturen) gedurende een langere periode. De bestuurder moet wel de systemen in de gaten blijven houden en direct kunnen ingrijpen.
- Op niveau 3 kan het voertuig technisch zelfstandig rijden en controleert het de systemen. De bestuurder hoeft geen aandacht te geven aan het verkeer, maar moet wel de besturing kunnen overnemen zodra het systeem dat aangeeft. Deze systemen zijn nog niet op de markt.
- Op niveau 4 kan een voertuig zelfstandig rijden en de controle houden binnen het aangegeven domein. Wat dat domein is, kan een fabrikant zelf specificeren. Het domein kan bijvoorbeeld een wegsoort zijn (een auto kan bijvoorbeeld zonder enige interventie op de snelweg rijden, maar niet in de stad), of een bepaald wegdeel (A12 in westelijke richting, tussen km 10 en 20). Het voertuig is verantwoordelijk voor het overdragen van de verantwoordelijkheid naar de bestuurder als het buiten het gedefinieerde domein komt.
- Op niveau 5 kan een voertuig zelfstandig alle ritten maken. Op dit niveau kan het kinderen naar school brengen en pakketjes bezorgen.

Op dit moment zijn er auto's op de weg met ACC- en LCC-systemen, die de doorstroming kunnen beïnvloeden. Bij een ACC-systeem stelt een bestuurder een wensnelheid in. De auto zal proberen deze snelheid te rijden, maar indien nodig afremmen en gas geven als er andere auto's met een andere snelheid voor hem rijden. Bij een LCC-systeem stuurt de auto zelf en blijft de auto in de rijstrook. Hoewel deze systemen op dit moment werken als niveau-1- of niveau-2-systemen, bepaalt de auto de snelheid en de besturing. Dat de verantwoordelijkheid voor het opletten belegd is bij de bestuurder, is voor de doorstroming niet van belang zolang het systeem de feitelijke rijtaak overneemt. Dit is wel van belang wanneer een bestuurder het systeem mogelijk uitschakelt en de controle zelf weer overneemt.

Veel *smart mobility*-systemen zijn systemen in de auto die de bestuurder bij het rijden helpen, ofwel Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). Het rapport van de Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV) (2019) geeft inzicht in de wijze waarop dergelijke systemen in de praktijk worden gebruikt. Zo beschrijft de OVV dat bestuurders niet altijd de instructies voor de hulpsystemen opvolgen, en de auto zelf voor een groot deel laten rijden ook als dat niet tot het 'Operational Design Domain (ODD)' behoort. Omgekeerd kan het ook zo zijn dat bestuurders het systeem niet gebruiken terwijl het wel in de auto zit. Tabel 2.1 geeft aan welke situaties kunnen optreden als bestuurders wel of niet gebruik (denken te) maken van systemen.

Tabel 2.1 Bezit en gebruik van ADAS.

Auto heeft ADAS systeem	NEE	JA
Bestuurder rekent op hulp ADAS of schakelt het in		
NEE	‘Ouderwets rijden’	Niet alle technologie wordt gebruikt
JA	Risico dat sommige taken niet uitgevoerd worden	ADAS wordt bij het rijden betrokken

De naam van de systemen geeft op voorhand vaak geen duidelijk beeld van de mate waarin zij de auto zelfrijdend maken. Zo kan rijstrookassistentie 19 verschillende namen hebben, en wordt Adaptive Cruise Control met 20 verschillende namen aangeduid (AAA, 2019). Ook worden soms namen gebruikt voor bestuurdersassistentiesystemen (niveau 2, bestuurder moet zelf opletten) die doen vermoeden dat de auto zelf rijdt. Voorbeelden daarvan zijn *Autopilot* of *Pro pilot*. Een Amerikaanse studie laat zien dat 40% van de onderzochte proefpersonen de werking van een systeem niet goed inschat op basis van de naam van dat systeem (Edmonds, 2018). Het is voor bestuurders vaak onduidelijk wanneer het systeem wel of niet goed werkt (Van der Linde, 2020), en of de situatie wel of niet binnen het ODD van het systeem ligt. Alle systemen die op dit moment op de markt zijn, zijn bedoeld als hulpsystemen (maximaal niveau 2) in bepaalde situaties (meestal autosnelwegen).

In dit rapport onderzoeken we ook de effecten van *cooperative adaptive cruise control* (CACC). Dit systeem is nog niet op de markt, maar naar verwachting binnen enkele jaren wel. ‘Cooperative’ wil zeggen dat auto’s elkaar berichten kunnen sturen. Daarbij past de *adaptive cruise control* de snelheid van de auto aan, niet alleen op basis van wat de auto zelf kan waarnemen, maar ook op basis van de berichten van andere auto’s. Diverse merken brengen de communicatietechniek al op de markt. Zo zit deze onder meer in de nieuwe Volkswagen Golf VIII en ID3. De boodschappen worden op dit moment nog niet gebruikt om de snelheid van het voertuig aan te passen, maar dienen bijvoorbeeld om informatie over gevaarlijke wegsituaties aan de bestuurder door te geven.

Daarnaast zijn er systemen die de bestuurder adviseren maar niet zelf rijden. Het belangrijkste voorbeeld daarvan is *Intelligent Speed Adaptation* (ISA). ISA beperkt de snelheid van voertuigen tot een (wettelijk) maximum. Onder dat maximum zijn bestuurders vrij hun eigen snelheid te kiezen. De implementatie van ISA kan verschillen van systeem tot systeem. Zo kan de auto fysiek ‘beperkt’ zijn tot een bepaald maximum (hoe ver het gaspedaal ook ingedrukt wordt), of kan met haptische feedback worden gewerkt, waarbij het indrukken van het gaspedaal veel zwaarder gaat als de maximumsnelheid bereikt is. Normaal gesproken is het wel mogelijk het systeem te negeren, bijvoorbeeld door het gaspedaal helemaal in te drukken. Omdat het hier een ISA betreft die ingrijpt bij het bedienen van de auto, classificeren we het onder een operationeel systeem.

Europese Unie

In de Europese Unie wordt het gebruik van bepaalde hulpsystemen steeds verder verplicht. Deze verplichting geldt voor nieuwe modellen die vanaf 2022 geïntroduceerd worden, en voor alle auto’s die 2024 nieuw verkocht worden. Het gaat onder meer om de volgende systemen: waarschuwings-systemen bij verslachte aandacht, ISA, een datarecorder bij een ongeluk, *lane keep assistance*, en *advanced emergency braking*.

Bron: EC (2019).

Een belangrijk begrip in dit rapport is de *penetratiegraad*: dat deel van het wagenpark dat uitgerust is met een bepaald systeem, of dat deel van de gebruikers dat het systeem actief gebruikt. Met de verplichting om systemen in nieuwe auto's te plaatsen zal de penetratiegraad toenemen, maar niet direct 100% zijn: er zijn immers ook nog oudere auto's op de weg. De verhoging van de penetratiegraad hangt dan samen met de vervanging van het wagenpark.

Tactisch niveau

Het tweede niveau waarop rijtaakondersteunende systemen kunnen aangrijpen, is het tactische niveau. Hiervoor bestaan systemen – al zijn ze nog niet op de markt – die advies geven over de te rijden snelheid of de te kiezen rijstrook, bijvoorbeeld om daarmee een zo goed mogelijke doorstroming te realiseren. Dat kan bijvoorbeeld een adviessnelheid op de snelweg zijn of een snelheidsadvies voor een groene golf in een gebied met veel geregelde kruispunten in een stad. De effecten van het systeem hangen af van de precieze boodschap die het systeem aan de bestuurder doorgeeft (zoals de snelheid in bovenstaande voorbeelden). Omdat het aantal mogelijkheden (dat wil zeggen, welke snelheid wordt wanneer getoond) oneindig is, kunnen we ze hier niet allemaal bespreken.

Een praktische, specifieke toepassing die we in dit rapport bespreken, is het snelheidsadvies wanneer de bestuurder een file nadert. Deze in-car filestaartbeveiliging is primair bedoeld voor de veiligheid. Het systeem is nog niet in gebruik, maar zou de doorstroming wel kunnen helpen verbeteren. Het tonen van maximumsnelheden in een auto is juridisch moeilijk omdat zowel bestuurder als overheid in het geval van een verkeersongeval achteraf lastig kunnen bewijzen welke maximumsnelheid de bestuurder geadviseerd heeft gekregen. Daarom zullen we deze systemen die een alternatieve maximumsnelheid aangeven, niet onderzoeken. De toepassing als adviessnelheid, bijvoorbeeld bij de filestaartbeveiliging, is juridisch eenvoudiger.

In sommige documenten wordt voor het tonen van maximumsnelheden in het voertuig ook de afkorting ISA (*Intelligent Speed Advise*) gebruikt; in dit rapport blijft die afkorting voorbehouden aan een systeem dat operationeel in het voertuig intervenueert.

Voor tactische regelingen hangen effecten op de doorstroming sterk af van de specifieke boodschappen die het systeem brengt. Op dit moment zijn er nog geen werkende systemen van deze aard op de weg. We onderzoeken in dit rapport de effecten van:

- Snelheidsadvies op de snelweg;
- Rijstrookadvies op de snelweg;
- Communicatie met verkeerslichten.

Strategisch niveau

Op dit derde niveau gaat het om advies over de route van een reis. Daarvoor zijn er in-car- en road-side-systemen die gedurende de trip advies geven over de reistijd en de vertragingen op een bepaalde route. Ook de effecten van deze systemen onderzoeken we in dit rapport. Routeadvies heeft geen operationele of tactische kant, en zal dus geen effect hebben op de eigenschappen van de weg (snelheid bij een bepaalde intensiteit of capaciteit van de weg).

3 Gerapporteerde effecten

In dit hoofdstuk bespreken we voor iedere *smart mobility*-maatregel de onderzoeksvragen 1 en 2.

3.1 In-voertuig-filestaartbeveiliging

Er is onderzoek gedaan naar hoe mensen met snelheidsadviezen omgaan. Zo werd in het project Talking Traffic gevonden dat mensen hun snelheid aanpassen bij een maximumsnelheid die in de auto getoond wordt, maar dat ze dat beduidend minder vaak doen dan wanneer een vast bord een lagere maximumsnelheid aangeeft (Bourdeaud'hui et al., 2020). TrafficQuest keek naar de vervanging van filestaartbeveiliging door in-voertuigsystemen (Hamers et al., 2019). Daaruit blijkt dat filestaartbeveiliging er niet alleen toe leidt dat gebruikers van deze in-voertuigsystemen hun snelheid aanpassen, maar dat ook andere weggebruikers dat doen. Op het moment dat er een paar automobilisten in het verkeer langzamer rijden, moeten andere voertuigen hun snelheid immers ook verlagen. Hamers et al. (2019) claimen dat de effecten van filestaartbeveiliging met portalen ook bewerkstelligd kunnen worden met in-voertuig-snelheidsadvies mits er voldoende voertuigen zijn die over dit systeem beschikken.

Een vereiste penetratiegraad wordt niet genoemd. Wel merken ze op dat de (initiële) bijdrage van een in-voertuig-filestaartbeveiliging waarschijnlijk het meest of het eerst effect heeft in gebieden waar een dergelijk beveiligingssysteem nu niet bestaat. Ook noemen Hamers et al. een mogelijk risico, namelijk dat er (mogelijk gevaarlijke) snelheidsverschillen ontstaan tussen automobilisten die zo'n systeem wel en niet gebruiken.

In het algemeen heeft filestaartbeveiliging een positieve uitwerking op de capaciteit en de snelheid van het verkeer. Het systeem is primair bedoeld als veiligheidssysteem, en het zorgt inderdaad voor minder ongelukken (Hamers et al., 2019). Het systeem heeft ook een direct effect op de doorstroming. Doordat bestuurders weten dat ze bij files geïnformeerd worden, weten ze ook dat er geen file is als die informatie uitblijft. Dat betekent dus dat ze een soort virtuele horizon krijgen: ze weten dat er verderop op de weg niet geremd wordt. Daardoor kunnen ze dichter op elkaar rijden en sneller doorrijden.

De effecten van filestaartbeveiliging (via portalen) op de snelheid en capaciteit van de wegvak zijn uitgebreid empirisch onderzocht. Zo vergelijkt Taale (2018) 210 verschillende studies over de effecten van benuttingsmaatregelen; filestaartbeveiliging is een van de onderzochte toepassingen. Uit de studie blijkt dat voor de onderzochte studies de capaciteit met gemiddeld genomen 2% stijgt. De gerapporteerde '5% hogere intensiteit' is lastig te begrijpen. Die heeft wellicht te maken met het feit dat de capaciteitsstijging pas bij hogere intensiteiten (en dus later in de tijd) tot een file leidt. Daardoor vindt de capaciteitsval later plaats en kan er gedurende een langere tijd meer verkeer verwerkt worden.

3.2 Intelligent Speed Adaptation

Met ISA kiezen bestuurders hun snelheid zelf. Uit empirische studies blijkt dat mensen daarmee wel een snelheid kiezen die dicht bij het maximum ligt. De mensen die gewend zijn onder de limiet te rijden, gaan sneller rijden en die gewend zijn sneller dan de limiet te rijden, gaan juist langzamer rijden (Vlassenroot et al., 2007). Theoretisch kunnen we hieruit afleiden dat de variatie aan snelheden zal afnemen: een groter deel van de mensen rijdt met dezelfde snelheid. Dat betekent dat de snelheid waarschijnlijk langer (dat wil zeggen tot een hoger intensiteitsniveau) rond de maximumsnelheid kan blijven liggen. Een ander gevolg is dat er minder snelheidsverschillen zijn in de verkeersstroom, waardoor het aantal inhaalbewegingen afneemt.

Empirisch is er veel onderzoek gedaan naar inhalen. In populairwetenschappelijke publicaties wordt vaak gezegd dat inhaalbewegingen files veroorzaken. Dat is in sommige gevallen ook het geval (zie bijvoorbeeld Ahn & Cassidy, 2007). Deze verstoringen vinden echter pas plaats als het druk is, en die drukte kan juist worden vermeden door rijstrookwisselingen. Mensen wisselen dan als het ware naar een rustiger rijstrook, met minder verstoringen tot gevolg (zie bijvoorbeeld Patire & Cassidy, 2011). In veel gevallen is de verdeling van het verkeer over de rijstroken overigens niet gelijkmatig, ook niet als het druk wordt. Dat is iets wat ook empirisch voor Nederland is vastgesteld (Knoop et al., 2010). De wens om in te halen wordt daarbij als reden genoemd om bijvoorbeeld vaker links te rijden.

Ook bij stukken met een trajectcontrole is een afname van de snelheidsvariatie empirisch waargenomen. Hierdoor is ook de rijstrookverdeling veranderd, wat mede geleid heeft tot lagere capaciteiten. Harms (2006) heeft dit uitgebreid beschreven voor de 80 km/h-zones. Dit proces – lagere variatie, andere rijstrookverdeling en dus een verlaging van de capaciteit – zou ook met ISA kunnen plaatsvinden.

3.3 Adaptive cruise control

In het algemeen geldt dat een kortere volgtijd – mits veilig en zonder ongelukken mogelijk – tot een hogere doorstroming leidt. Essentieel is dus hoe de volgfstand van Nederlandse bestuurders anders is dan die van ACC-systemen. In het algemeen rijden bestuurders in Nederland op de snelweg dicht op elkaar. Een typische capaciteitswaarde is 2.400 vtg/uur/strook, ofwel 1 voertuig per 1,5 seconde.

De analyses van ACC gaan decennia terug. Al in 1999 gaven Minderhoud en Bovy (1999) aan dat de impact van ACC-systemen afhangt van de specifieke implementatie. In hun simulaties testten ze verschillende systemen. Een opmerkelijke bevinding in deze studie is dat de capaciteit van de weg toeneemt als de ACC-systemen stevig mogen remmen. Mogen ze – zoals dat nu het geval is – alleen zacht remmen, dan is er geen capaciteitswinst, zelfs niet als een zeer korte volgtijd van 1,2 seconden wordt ingesteld.

Van der Werf et al. (2002) analyseerden gedetailleerdere modellen, en concluderen dat ACC-systemen (van dat decennium) geen groot effect op de capaciteit hebben, positief noch negatief. Ondertussen zijn de systemen verbeterd en veranderd. Een recenter werk is het overzichtsartikel van Hoogendoorn et al. (2014) dat voor ACC verschillende effecten vindt op de capaciteit; meestal gaat het hierbij om een verlaging (tot tientallen procenten), afhankelijk van de aannames in de simulaties. Wel merken zij op dat de aangehaalde effecten in simulatie bepaald zijn, waardoor er onzekerheid over de effecten bestaat.

Deze inzichten kunnen worden verbeterd met experimentele studies. Die zijn er slechts beperkt. Viti et al. (2008) hebben bestuurders gedurende een langere tijd gevolgd, en daarbij eerst hun rijgedrag zonder ACC gemonitord en vervolgens met ACC. Daaruit blijkt dat bij dezelfde snelheid bestuurders zelf over het algemeen dicht op hun voorligger rijden dan wanneer zij ACC gebruiken. ACC heeft daarmee dus een negatieve uitwerking op de wegcapaciteit. Ook Schakel et al. (2017) volgden mensen langere tijd (4 tot 5 weken) in een met ACC uitgeruste auto. Ook in deze studie wordt het rijgedrag zonder ACC vergeleken met het rijgedrag met ACC. De auteurs komen tot dezelfde bevindingen als Viti et al. (2008) 10 jaar eerder: met ACC ingeschakeld zijn de volgtijden langer, en de wegcapaciteit lager. Wel zouden volgens Schakel et al. (2017) auto's waar ACC is ingeschakeld, mogelijk dicht op elkaar kunnen rijden als ze de file uitrijden, waardoor de afrijcapaciteit hoger is.

Opmerkelijk is dat ACC-systemen in de modernste auto's – in tegenstelling tot wat veelal gedacht wordt – een lange reactietijd hebben. Experimenteel onderzoek toont dat het 1,9 tot 2,7 seconden duurt voordat de auto met ACC op zijn voorligger reageert (Makridis et al., 2020). Kortere volgtijden dan bestuurders zonder ACC aanhouden is dan niet mogelijk. Dat leidt tot de conclusie dat – ondanks eerdere simulatiestudies – ACC voornamelijk negatieve effecten zal hebben op de doorstroming, zowel in onder-kritische situaties als op de capaciteit.

ACC beïnvloedt ook de stringstabiliteit van het verkeer. Stringstabiliteit beschouwt hoe een kleine remactie van het eerste voertuig sterker wordt uitgevoerd door de tweede, en nog sterker door de derde, enzovoort. Experimenteel is gevonden dat voertuigen van hetzelfde merk een instabiele string vormen (Milanés & Shladover, 2014). Hierdoor kan, als er veel voertuigen met ACC achter elkaar rijden, een kleine remactie al tot een aanmerkelijke snelheidsverlaging leiden. Datzelfde fenomeen treedt niet alleen op als precies dezelfde auto's achter elkaar rijden. Knoop et al. (2019) beschrijven eenzelfde experiment, maar dan met auto's van wisselende merken. Ook in dat geval leidt een kleine snelheidsreductie op de snelweg bij de voorste auto tot een aanzienlijke verlaging van de snelheid van andere voertuigen (van 100 km/h bij de eerste tot iets meer dan 40 km/h bij het zevende voertuig). Dat geeft aan dat de kortste volgtijden van ACC-systemen (die al langer zijn dan die van bestuurders) niet haalbaar zijn bij een hoge penetratiegraad. Hierdoor moet een (nog) langere volgtijd gekozen worden.

3.4 Cooperative adaptive cruise control

Het artikel van Hoogendoorn et al. (2014) geeft een overzicht van de effecten van *vehicle automation*: naast ACC, zoals boven genoemd, gaat het ook over CACC. De aangehaalde artikelen gaan vooral over gesimuleerde verkeersstromen. In de conclusie melden Hoogendoorn et al. dat communicatie tussen voertuigen de verkeersdoorstroming positief kan beïnvloeden, en dat dat voor zelfrijdende voertuigen zonder communicatie dat niet voor de hand ligt. Dat is in het licht van de ACC-studies te begrijpen: ACC reageert alleen op de directe voorligger en is relatief traag in zijn reactie. Dat kan ondervangen worden door communicatie. Omdat een remactie van tevoren aangekondigd wordt, kunnen auto's daardoor dichter op elkaar rijden.

Recenter werk (Calvert et al., 2017) geeft aan dat (bij penetratiegraden van onder circa 70%) de effecten beperkt blijven. Simulatiestudies volgen elkaar regelmatig op; een daarvan is Mesionis et al. (2020). Over het algemeen is de bevinding in studies dat CACC een (mogelijk groot) positief effect heeft op de snelheid en de capaciteit. Wel is het effect afhankelijk van de precieze manier waarop welke informatie verzonden wordt en hoe auto's op de CACC-boodschappen reageren. Ook is het effect van de tijd die een boodschap erover doet om van auto naar auto te gaan, van belang.

3.5 Rijstrookassistentie

Er bestaan verschillende versies van rijstrookassistentie. Zo zijn er systemen die de bestuurder waarschuwen (bijvoorbeeld door geluid, trilling in het stuur of trilling in de zitting) en systemen die de auto actief tussen de lijnen houden. Bij de actieve systemen is nader onderscheid te maken tussen LKA-systemen en LCC-systemen. Een LKA-systeem (*lane keep assistance*) helpt de auto terug te sturen als de auto de rijstrook dreigt te verlaten. Als een bestuurder hier het stuurwiel loslaat, blijft de auto wel tussen de lijnen, maar zal hij oncomfortabel zigzaggen. Het tweede systeem (*lane centering control*) werkt al bij kleinere uitwijkingen en houdt de auto in een comfortabel pad tussen de lijnen. Deze verschillen beschrijven de doelen van verschillende systemen; de kwaliteit van de werking ervan is afhankelijk van de implementatie (hoe goed heeft de fabriek het systeem gemaakt) en de infrastructuur (bijvoorbeeld de kwaliteit van de wegbelijning).

Sterlund (2017) vindt in empirische data dat LKA een substantieel aandeel (30-50%) van de ongevallen van voertuigen die uit hun strook raken (eenzijdige ongevallen), had kunnen voorkomen. Een stap verder gaan de onderzoekers in Sterlund et al. (2017). Daarin analyseren de onderzoekers het aantal ongelukken dat daadwerkelijk gebeurt met en zonder LKA. Ze vinden dat LKA het aantal eenzijdige ongelukken dat ontstaat doordat een auto ergens tegenaan botst, doet afnemen met meer dan 50%. De gerapporteerde percentages maken het mogelijk om de impact van LKA op de totale hoeveelheid ongelukken te bepalen (Tan et al., 2020), wat de doorstroming indirect kan verbeteren.

Het ligt in de lijn der verwachting dat mensen in auto's met LCC minder geneigd zijn om van rijstrook te wisselen. Immers, in deze auto's kost het minder moeite om in de rijstrook te blijven dan in een auto zonder dat systeem, waardoor het juist een grotere extra inspanning vereist om van rijstrook te wisselen. Dat is empirisch onderzocht en bevestigd door Schakel et al. (2017). De uiteindelijke consequentie daarvan voor de doorstroming is – net als bij LKA – niet eenduidig. De lagere aantallen rijstrookwisselingen kunnen leiden tot minder verstoringen. Het kan ook betekenen dat mensen minder snel geneigd zijn om in te halen en daarom een lagere snelheid aanhouden. Daardoor zullen meer mensen elkaar volgen (in plaats van inhalen en dan weer bij de voorligger wegrijden). Verstoringen nemen toe bij een groep auto's die elkaar volgen. Zo'n verstoring wordt vaak opgelost als er zo veel lege ruimte tussen auto's is dat een automobilist niet direct hoeft te reageren op een rembeweging van zijn voorligger (Pueboobpaphan & Van Arem, 2010). Doordat meer mensen elkaar volgen en elkaar minder inhalen, neemt de verstoring toe, waardoor uiteindelijk een file ontstaat. Zo leiden minder inhaalbewegingen mogelijk tot een lagere capaciteit.

3.6 Tactische regelingen

De vorige toepassingen gingen over dat een auto zelf iets doet of observeert, wat een uitwerking heeft op de doorstroming. Doorstroming kan ook een doel zijn waarvoor een wegbeheerder een bepaalde boodschap naar een voertuig stuurt. Door nieuwe technieken ontstaan er in de toekomst mogelijkheden om snelheids- en zelfs rijstrookadvies te geven. Studies hierover beschrijven de effecten van die technieken vanuit de theorie, en meestal vanuit simulaties. Een belangrijk en helder overzicht van de mogelijkheden geven Schakel en Van Arem (2014). In dit geval is de techniek op zichzelf niet voldoende om de doorstroming te verbeteren, maar wordt deze gebruikt als middel om bestuurders te laten doen wat een wegbeheerder bedacht heeft. De effecten van deze smart mobility-maatregelen zijn dan ook sterk afhankelijk van de achterliggende ideeën voor verkeersregeling en de bijbehorende berichten die in een specifieke regeling geïmplementeerd worden.

3.6.1 Snelheidsadvies en -beperking op de snelweg

De vrije capaciteit van de weg is hoger dan de afrijcapaciteit. Dit principe wordt gebruikt bij *main line metering* (Carlson et al. 2010) Er zijn empirische aanwijzingen dat de stroomafwaartse capaciteit daalt naarmate de snelheid in de file lager wordt (Yuan et al., 2015). De essentie van *main line metering* is dat de verkeersintensiteit wordt verlaagd om te voorkomen dat er een file ontstaat, en zo de capaciteit (en doorstroming) hoog te houden, bijvoorbeeld door de snelheid stroomopwaarts van de bottleneck te verlagen. Hierbij verwijzen we naar figuur 2.1: in gebied 1 wordt de snelheid verlaagd, waardoor de uitstroom in gebied 2 hoger kan blijven, en de totale vertraging afneemt.

In de praktijk is deze methode voor zover bekend nog niet op een zodanige schaal toegepast dat het principe zichtbaar werkt. Wel is het geprobeerd met matrixborden, ook in Nederland. In een praktijktest (Hegyí & Hoogendoorn, 2010) is aangetoond dat snelheidsverlaging via de matrixborden de intensiteit inderdaad omlaag brengt. Daarmee konden files worden opgelost en de uitstroom worden vergroot.

3.6.2 Hulp bij rijstrook wisselen

Met *connected* en *automated vehicles* kunnen bestuurders worden geholpen om met de juiste snelheid en in het bijzonder tussen de juiste voertuigen van rijstrook te wisselen. Khattak et al. (2020) analyseren dit met behulp van simulatie. De capaciteit van de weg kan enkele procenten hoger worden door het moment om van rijstrook te wisselen juist te kiezen. Als daarbij ook nog gebruik wordt gemaakt van de mogelijkheden die *connected* en *automated vehicles* bieden om (met CACC) de snelheden van de elkaar volgende auto's aan te passen, kan de capaciteitswinst in de orde van tientallen procenten komen.

Ook Chen et al. (2021) gaan in op de voordelen die het heeft om gestuurd van rijstrook te wisselen. Zij beschrijven drie strategieën met *connected* en *automated vehicles* die de doorstroming kunnen verbeteren. De essentie van de drie strategieën is dat de ruimtes tussen de voertuigen opgevuld kunnen worden, waarmee de capaciteit toe kan nemen.

3.6.3 Intelligente verkeerslichten

In stedelijk gebied is er ook ruimte om de doorstroming met tactische regelingen te verbeteren. Doordat informatie van de verkeerslichten wordt doorgegeven aan de auto's, kunnen de bestuurders van die auto's hun snelheid tijdig aanpassen. Dat kan door snelheden voor een groene golf aan te geven, zoals nu bijvoorbeeld al gebeurt in Helmond/Eindhoven. Ook kan dat met invoertuigtechnieken, waarbij het verkeerslicht met het voertuig communiceert. In Ingolstadt, thuisstad van automerk Audi, wordt daar al langer mee geëxperimenteerd (Audi, 2019; Zweck & Schuch, 2013).

In Nederland zijn de meeste verkeerslichtregelingen adaptief, wat wil zeggen dat de groen- en rood-tijden afhangen van het verkeer dat gemeten wordt. Hierdoor is het niet makkelijk te voorspellen wanneer een verkeerslicht op groen gaat springen. Door hierover van tevoren (in-car) advies te geven, wordt de flexibiliteit van die regeling beperkt. Sommige Nederlandse experts geven daarom aan dat zulk advies weliswaar de doorstroming van individuele voertuigen kan verbeteren, maar dat daardoor de hele regeling minder goed geoptimaliseerd kan worden (Van Katwijk et al., 2011). Anderen prijzen een volledig flexibel systeem juist wel aan (zie bijvoorbeeld Lämmer & Helbing, 2008). In het geval van zogenoemde starre verkeerslichtregelingen, dat wil zeggen verkeerslichten waarvoor de groen- en rood-tijden vooraf bepaald zijn, is het makkelijker om dergelijke informatie door te geven. Omdat de rood- en groentijden bekend zijn, kan er een passend snelheidsadvies gegeven worden, en lijkt de informatie de doorstroming te helpen verbeteren.

3.7 Routeadvies

Routeadvies door navigatie-apps leidt gebruikers over het algemeen om de vertragingen heen. Hiervoor bestaan al veel werkende systemen, zowel in-car als road-side. Ook de radio wordt nog gebruikt als informatiebron voor file-informatie (Bereikbaar Haaglanden, 2017). Mensen volgen deze routeaanwijzingen niet altijd op – zie ook KiM (2017) voor een analyse van de gedragingen als gevolg van dergelijke informatie. De aanwijzingen hebben echter een duidelijk meetbaar effect op de keuze van de route. Schlaich (2010) toont met empirische data aan dat de getoonde reistijd een meetbaar effect heeft op de keuze tussen (twee alternatieve) routes. Wel is het van belang dat het systeem de reistijd voorspelt, al is dat niet noodzakelijkerwijs de huidige reistijd. Immers, een file verderop in de geplande route kan in de tussentijd groeien of verdwijnen. Dat betekent dat informatie van de actuele verkeerstoestand niet tot de kortste route leidt (Schaap et al., 2018), ook al zijn de verschillen vaak gering. Google Maps geeft daarom bij het plannen aan of de vertraging toe- of afneemt. Bij reguliere (dat wil zeggen dagelijks terugkerende) files is het wel mogelijk de filelengte te voorspellen op het moment dat de weggebruiker bij de file is – hoewel dat geen sinecure is. Een aanpak met 'big data' en machine learning is hier mogelijk; deze wint ook aan populariteit (zie bijvoorbeeld Lv, 2014). Deze aanpak bij het voorspellen van reistijden werkt echter alleen bij terugkerende patronen, en geeft over het algemeen niet aan wat de onzekerheid is. Dat betekent dat de voorspellende systemen in situaties die afwijken van de gebruikelijke ook een totaal verkeerde reistijd kunnen voorspellen, zonder dat ze daarvoor gewaarschuwd hebben.

Belangrijk bij het routeadvies is dat daarbij vanuit het netwerkperspectief gekeken wordt. Als een individuele bestuurder een andere route neemt, zal zijn reistijd afnemen, maar zijn reisafstand toenemen. Dat heeft consequenties, ook voor de mensen die al op een route rijden waar dan iemand bij komt. In termen van netwerkeffecten betekent dat het volgende:

- Reizigers langs de oorspronkelijke route hebben minder vertraging;
- Reizigers langs de nieuwe route hebben mogelijk meer vertraging;
- Reizigers die van route veranderen, krijgen daardoor vaak een langere reisafstand.

Het is afhankelijk van de aantallen reizigers op beide routes en van de lengte van beide routes welk van bovenstaande 3 effecten uiteindelijk een grotere impact zal hebben op de reistijd.

4 Het bepalen van de effecten van smart mobility-maatregelen in de toekomst

Dit hoofdstuk gaat over de mogelijkheden die er zijn om in de toekomst, als ze er eenmaal zijn, achteraf te beoordelen wat de smart mobility-systemen voor effect hebben op de doorstroming. Daarbij gaat het om systemen die in de toekomst (meer) op de markt komen en waarvan we effecten op de verkeersstroom nog niet kennen. In paragraaf 4.1 presenteren we eerst de manier van analyseren, waarbij er twee mogelijkheden zijn:

- (1) *Bottom-up, dat wil zeggen empirische gegevens verzamelen over hoe auto's of bestuurders reageren, en op basis daarvan afleiden hoe de eigenschappen van de verkeersstroom veranderen;*
- (2) *Top-down, dat wil zeggen gemeten empirische gegevens over de verkeersstroom proberen te verklaren op basis van (idealiter) de gemeten penetratiegraad van elk van de systemen.*

In paragraaf 4.2 beschrijven we welke data daarvoor nodig zijn en hoe die mogelijk verzameld kunnen worden.

4.1 Bottom-up of top-down

Er zijn in het algemeen twee mogelijkheden om te kijken wat het effect is van smart mobility-maatregelen op de doorstroming van het verkeer. Als eerste kunnen we voor individuele auto's of bestuurders onderzoeken in hoeverre de systemen het rijgedrag aanpassen, en daarna analyseren wat die aanpassingen voor de doorstroming betekenen. Omgekeerd kunnen we, ten tweede, onderzoeken wat de veranderingen in de doorstroming zijn en tegelijkertijd analyseren in hoeverre bestuurders bepaalde systemen (actief) gebruiken. Daarna kan, met voldoende metingen, een relatie gelegd worden tussen de doorstroming en de mate van gebruik van (elk van de actieve) systemen.

Beide mogelijkheden hebben voor- en nadelen. Hieronder bespreken we de aandachtspunten van beide mogelijkheden. Tevens laten we voor beide mogelijkheden zien hoe ze werken, waarbij we de impact van CACC op de doorstroming als voorbeeld nemen. Bij beide onderzoeksbenaderingen is het doel om de effecten van de smart mobility-maatregelen *empirisch* te onderbouwen.

4.1.1 Bottom-up: van individuele eigenschappen naar doorstroming

Laten we eerst uitgaan van de eigenschappen en gedragingen van de bestuurder en zijn voertuig. Het belangrijkste voordeel van deze bottom-upaanpak is dat de data eenduidig zijn en dat het mogelijk is om een enkele smart mobility-maatregel in de empirische data te isoleren, om zo het effect van die maatregel te analyseren.

Een nadeel van deze aanpak is dat deze alleen inzicht geeft in de manier waarop mensen die gebruik maken van de smart mobility-maatregel zich anders gedragen, en dat er onvoldoende tot geen inzicht ontstaat in de effecten die de systemen hebben op de overige verkeersdeelnemers (door een ander gedrag van de bestuurders die wel met dat systeem rijden). Daarnaast is het essentieel om een volledige en duidelijke vertaling te hebben van het rijgedrag naar de doorstroming. Als er zaken zijn die ontbreken – er is bijvoorbeeld wel informatie over het afstand houden maar niet over de rijstrookkeuze – kan die vertaling mank gaan en kunnen de uitkomsten onjuist zijn. Goede simulaties kunnen deze nadelen deels ondervangen.

Voor het voorbeeld van CACC zou deze methode betekenen dat de relatie tussen de snelheid en de volgafstand tussen 2 voertuigen bijvoorbeeld op een testbaan wordt onderzocht. Ook kan uitgezocht worden in welke situaties welke berichten tussen de voertuigen verzonden worden en hoe die voertuigen met verschillende berichten omgaan (dat wil zeggen in welke gevallen die berichten hun acceleratie op welke manier beïnvloeden). Daarna kan met een theoretisch model of – waarschijnlijker gezien de verwachte complexiteit van de interacties – met een simulatiemodel de effecten op de hele verkeersstroom bepaald worden.

In een simulatiestudie is het vervolgens mogelijk de verschillende penetratiegraden van zo'n systeem te simuleren, evenals de aantallen gebruikers die daadwerkelijk van het systeem gebruik maken. Dit kan aanvullend worden uitgesplitst naar rijstrook, voertuigtype, of gewenste snelheid. Al die kruisrelaties zouden ook op kleine schaal gekwantificeerd kunnen worden, zoals de relatie tussen gewenste snelheid van een bestuurder en het gebruik van CACC (dat wil zeggen: rijdt iemand met CACC typisch sneller dan het overige verkeer of niet). Dat kan weer met rijnsimulatorstudies (waarbij mensen in een rijnsimulator zitten en hun rijgedrag bestudeerd wordt) of met 'naturalistic driving' (waarbij mensen in een auto die volgehangen is met sensoren deelnemen aan het echte verkeer en zo hun rijgedrag bestudeerd wordt). In een simulatiemodel kunnen ook andere voertuigen en bestuurders met bepaalde eigenschappen worden gesimuleerd, zodat bijvoorbeeld ook de effecten van de combinatie van CACC en routegeleiding onderzocht kunnen worden.

Het raamwerk voor dit soort simulatiemodellen bestaat al. Er zijn modellen waarin al deze gedragingen gemodelleerd kunnen worden. De crux is echter de input voor deze modellen, en die moet uit de empirische studies komen. Hoe nauwkeuriger de input voor de simulatiestudie, hoe nauwkeuriger de uitkomst bepaald kan worden van het effect dat de maatregel op de doorstroming heeft. Hoe belangrijk goede aannames zijn, bleek al uit vroege ACC-studies. Zo bleek de aanname van een aantal decennia geleden dat ACC-systemen zonder vertraging zouden reageren, in de praktijk niet juist te zijn. De reactietijd van het systeem ligt tussen de 1,9 en 2,7 seconde (Makridis et al., 2020).

Voor het voorbeeld van CACC-systemen liggen vergelijkbare fouten op de loer. Bij deze systemen is de tijd van belang die nodig is om een CACC-boodschap door te geven, en het is van belang die tijd in een simulatie niet te verwaarlozen. Al die aspecten moeten eerst – bij voorkeur empirisch – worden onderzocht voordat een simulatie een betrouwbaar resultaat kan geven. Merk op dat kleine verschillen in weggedrag al een behoorlijk verschil in capaciteit kunnen geven. En kleine verschillen in capaciteit hebben een groot effect op de snelheid.

4.1.2 Top-down: effecten afleiden uit collectieve eigenschappen

De andere aanpak is top-down, waarbij de doorstroming geanalyseerd wordt, en tegelijkertijd de penetratiegraden van de smart mobility-maatregelen. Het voordeel van deze methode is dat de analyse veel directer is: er wordt direct een verband gelegd tussen oorzaak (smart mobility-systemen) en gevolg (effecten). Dat is een voordeel ten opzichte van de bottom-upmethode, waarbij gemeten kleine effecten met simulatie opgeschaald moeten worden om inzicht te krijgen in de totale effecten op de verkeersstroom.

De top-downaanpak heeft ook nadelen of aandachtspunten. Als het gaat om in-voertuigsystemen, is het onduidelijk hoeveel voertuigen precies welke systemen aan hebben staan. De doorstromingseffecten kunnen op een niet-lineaire manier afhangen van elk van die systemen. Daarom is het nodig om over voldoende metingen te kunnen beschikken, met voldoende verschillende penetratiegraden van verschillende systemen. Idealiter zijn de metingen van het verkeer en de penetratiegraden locatie- en tijdspecifiek. Als tijdsinterval is bijvoorbeeld een minuutniveau geschikt, en voor de afstandsschaal is dat een afstand die in dat tijdsinterval gereden kan worden, bijvoorbeeld een kilometer. Zo kunnen de effecten van smart mobility-maatregelen preciezer bepaald worden.

Voor het voorbeeld van CACC zou dat betekenen dat voor een wegvak (mogelijk zelfs meer wegvakken om meer data te verkrijgen) de minuutsintensiteit van de auto's gemeten wordt, evenals het aantal auto's dat met CACC uitgerust is. Hierbij kan worden gekeken naar het aantal auto's dat uitgerust is met het systeem, en dat vervolgens als verklarende variabele te gebruiken, of naar het gebruik van het systeem. In het laatste geval is het nodig te weten hoeveel gebruikers er op dat moment van het systeem gebruik maakten of het aan hadden staan. Idealiter is deze informatie beschikbaar voor precies die auto's die gedurende de meetminuut van de intensiteit langskwamen. Dan kan – met voldoende metingen – de relatie tussen de snelheid en de intensiteit bepaald worden, met als extra verklarende variabele de aantallen auto's uitgerust met CACC, dan wel de aantallen auto's die CACC in gebruik hebben. In die relatie zal veel ruis zitten. Deze wordt deels veroorzaakt door intrinsieke stochasticiteit (alle bestuurders rijden anders), en wellicht ook deels door andere verklarende variabelen (bijvoorbeeld het aandeel vrachtverkeer, of een andere smart mobility-maatregel).

Indien data ook voor andere verklarende factoren beschikbaar zijn, kan de impact daarvan meteen meegeschat worden. Daarvoor moeten statistische methoden gebruikt worden die de effecten van de verschillende maatregelen uiteenrafelen en hun individuele bijdrage kwantificeren. Als eerste idee zou hierbij een multiple regressie gebruikt kunnen worden indien er voldoende data verzameld zijn. Een mogelijkheid daarbij is dat de effecten niet lineair zijn of dat de effecten van de verschillende smart mobility-maatregelen niet onafhankelijk van elkaar zijn, waardoor het juiste effect van (elk van de) maatregelen niet nauwkeurig bepaald kan worden. Bij wisselende beschikbaarheid van de gemeten data (penetratiegraden van de verschillende systemen zijn op verschillende plekken bekend) valt te denken aan *multi-level modelling*.

Merk op dat als de relatie tussen intensiteit en snelheid (met als parameters de effecten van de smart mobility-maatregelen) bekend is, de relatie tussen intensiteit en doorstroming daaruit theoretisch kan worden afgeleid. Door de intensiteit met de snelheid te vermenigvuldigen kan ook de capaciteit bepaald worden.

4.1.3 Vergelijking

Beide benaderingen, bottom-up en top-down, bieden mogelijkheden om de effecten empirisch te onderbouwen. De bottom-upbenadering biedt kwantitatief meer houvast omdat het onderzoek vanuit de basis opgezet kan worden, waarbij de effecten van andere maatregelen minder vertekenen. Ook kunnen met simulatiemodellen de penetratiegraden veranderd worden, zodat de effecten voor een grote reikwijdte bepaald kunnen worden. Bij een top-downbenadering is het veel lastiger om de gegevens te extrapoleren: de effecten zijn gemeten over een bepaalde reikwijdte (bijvoorbeeld 0-20% penetratiegraad van CACC), en het is niet eenduidig of de trend die voor de bemeeten reikwijdte gevonden is, door te trekken is naar een andere (bijvoorbeeld 50% penetratiegraad van CACC). In het algemeen zijn de effecten van bepaalde ingrepen in de verkeersstroom niet lineair. Ook kan met een bottom-upbenadering duidelijker geanalyseerd worden wat de effecten van de individuele systemen zijn: in een testsituatie is het mogelijk om bepaalde systemen aan te zetten en andere uit, en verschillende combinaties te simuleren.

4.2 Nieuwe databronnen

Bij het analyseren van de impact van systemen in de auto is het van belang om te weten of auto's zijn uitgerust met deze systemen, en of de bestuurder ze gebruikt. Een mogelijkheid om hier inzicht in te krijgen is door de voertuigeigenaren te vragen hoe zij de systemen gebruiken.

Bestuurders hebben niet altijd goed voor ogen welk systeem in hun auto zit en hoe ze dat gebruiken. Het is van belang om te onderzoeken in welke situatie welke ADAS gebruikt wordt. Die informatie verzamelt het voertuig zelf. Het kan daarom nuttig zijn om na te gaan in hoeverre de in-voertuiginformatie waarover autofabrikanten (OEM's) beschikken, gebruikt kan worden voor het onderzoek naar de effecten van ADAS op de doorstroming.

Met deze data kan het mogelijk worden om voor dezelfde bestuurder het rijgedrag met en zonder ADAS te vergelijken. Uiteraard past hierbij de kanttekening dat een bestuurder er zelf voor kiest om de ADAS in bepaalde situaties wel of niet aan te zetten. Ook dat kan onderzocht worden met data van de OEM's: in welke situatie zetten bestuurders welke systemen aan en uit?

Het kan dus nuttig zijn de informatie uit de auto's te gebruiken voor verder onderzoek. Deze informatie is overigens zeker niet als vanzelfsprekend beschikbaar. OEM's verzamelen veel van de informatie, waarschijnlijk ook met het oog op de volgende niveaus van automatisch rijden. Deze informatie gebruiken zij veelal om een volgende generatie voertuigen een natuurlijker gedrag te laten vertonen, dat wil zeggen passender bij het gedrag dat een menselijke bestuurder zou vertonen. Voor de OEM's zijn deze data dus van grote waarde, en zij zullen deze data waarschijnlijk, uit concurrentieoverwegingen, willen beschermen. Dat maakt het niet eenvoudig ze te verkrijgen. Voor beperkte onderzoeksprojecten en met een geheimhoudingovereenkomst zijn hiervoor wellicht mogelijkheden. Ook zijn meer geaggregeerde data mogelijk gemakkelijker te verkrijgen. Zo kunnen beleidsmakers een specifieke vraag stellen (bijvoorbeeld over het gebruik van ADAS) die in een geaggregeerde vorm beantwoord kan worden; een OEM zou de vraag dan eventueel kunnen beantwoorden zonder de individuele data te delen.

Interessant in dit perspectief is dat de toekomstige autogebruiker steeds minder vaak de eigenaar van de auto zal zijn. Al langere tijd bestaan er leaseauto's, waarvan de eigenaar een groot wagenpark beheert. Ook komt private lease steeds vaker voor, waarbij soms de OEM eigenaar van de auto blijft. Tot slot is een te verwachten ontwikkeling voor de toekomst dat autodelen een belangrijker rol gaat spelen dan autobezit. Daarbij is zelfs de bestuurder van de auto niet de vaste bestuurder van die betreffende auto; deze deelt de auto met anderen. Dat heeft twee effecten:

- (1) *De data die lastig te krijgen zijn via de OEM en niet toegankelijk zijn voor de eigenaar, zijn wellicht wel beschikbaar voor een eigenaar van een wagenpark. Deze kan mogelijk meer moeite doen om deze data te verkrijgen dan een gebruiker. Dat data over rijgedrag beschikbaar zijn en uit de auto gehaald kunnen worden, bewijst de ANWB. Hier kunnen auto-eigenaars een goedkopere verzekering afsluiten als zij een 'dongle' in de auto plaatsen. Deze dongle wordt geplaatst op de 'OBD2-poort' en kan informatie van de auto uitlezen, die vervolgens wordt gedeeld met de verzekeraar. De verzekeraar kijkt naar mogelijk risicovolle bewegingen, zoals hard optrekken of remmen. Het algemene principe hierachter, en de relevantie voor dit onderzoek, is dat (1) via de OBD2-poort data van het voertuig op een gestandaardiseerde manier op te vragen zijn en (2) mensen bereid zijn die data te delen mits er een vergoeding tegenover staat. Een probleem hierbij is dat niet alle data van ADAS op dit moment op een gestandaardiseerde vorm via de OBD2-poort uit te lezen zijn.*
- (2) *Minder duidelijk is welke systemen in de auto actief zijn. Nu al is het voor veel bestuurders van hun eigen auto onduidelijk welke systemen er precies in zitten en wat die systemen doen. Zo vragen Harms en Dekker (2017) en Harms et al. (2020) bezitters van auto's of hun auto uitgerust is met verschillende ADAS. Daaruit blijkt dat zelfs de bezitters van de auto niet altijd weten of het voertuig over een bepaald systeem beschikt. Naarmate mensen in meer verschillende auto's rijden en het aantal hulpsystemen toeneemt, kan de kans toenemen dat de bestuurder een verkeerde verwachting heeft. Het verder standaardiseren van indicatoren voor deze hulpsystemen (zoals gesuggereerd in Harms & Dekker 2017) kan daartegen helpen.*

De informatie over hoe een auto zich gedraagt (dat wil zeggen het ‘rijgedrag van de auto’), is nuttige informatie voor auto’s met systemen die het rijden actief beïnvloeden. De Europese Unie heeft in dit verband het project *Open ACC* opgezet (Ciuffo et al., 2020; Makridis et al., 2020). Dit project heeft als doel om het rijgedrag van auto’s met deze systemen zo goed mogelijk te kwantificeren. De verzamelde data, als ook de tools, zijn vrij beschikbaar, en het doel is om de dataset uit te breiden. Het is daarom goed deze database als eerste te raadplegen. Een kanttekening daarbij is dat de systemen niet altijd hetzelfde gedrag hoeven te laten zien. Dat kan veranderen na een update van het systeem, dat kan veranderen per land, of er kunnen verschillen bestaan tussen door de fabriek bepaalde gebieden (bijvoorbeeld een auto reageert anders op de openbare weg dan op een testbaan).

Een laatste mogelijkheid om data te verkrijgen is door een verplichting van de overheid. In plaats van deze informatie in een product op de markt te analyseren (bijvoorbeeld door bovengenoemd project), zou de overheid inzicht kunnen eisen in de verzamelde data en de precieze werking van de systemen voordat een voertuig de weg op mag. Dat is een ingrijpende maatregel die in internationale samenwerking genomen zou moeten worden. Vanaf 2022 is in de Europese Unie een zwarte doos verplicht; deze slaat informatie op over de werking van systemen zodat deze gegevens na een ongeluk kunnen worden geanalyseerd (zie tekstkader Europese Unie). Het is aan te bevelen dat die zwarte doos de gegevens van *alle* sensoren opslaat en na een ongeluk vrijgeeft, evenals hoe de auto gereageerd heeft. Daarmee kan een toezichthouder zien hoe de auto reageert. Daarnaast, en voor veiligheid belangrijker, kunnen andere autofabrikanten leren van dat ongeluk en zo kan het verkeer veiliger worden.

5 Conclusies

In dit rapport staat de vraag centraal wat de te verwachten effecten zijn van een aantal smart mobility-maatregelen op de doorstroming. Daarbij onderscheidden we twee onderzoeksvragen:

- (1) *Welke effecten van smart mobility-systemen op de doorstroming van verkeer zijn bekend?*
- (2) *Hoe kunnen de effecten van smart mobility-maatregelen op doorstroming in de toekomst bepaald worden (deze vraag is relevant voor de maatregelen waarvoor de effecten niet bekend zijn)?*

De eerste vraag betreft de effecten van smart mobility-maatregelen op (a) de snelheid bij onderkritische drukte en (b) de capaciteit. De antwoorden op deze vraag vatten we samen in tabel 5.1. De bovenste helft van de tabel gaat over de effecten op de snelheid bij onderkritische drukte en de onderste helft gaat over de effecten op de capaciteit. Daarbij geven we aan of het effect positief of negatief is, waarop het gebaseerd is (theorie, empirie of simulaties) en hoe groot het is.

Smart mobility-maatregel	Snelheid onder-kritische drukte		
	Richting effect	Basis	Omvang effect
In-voertuig filestaartbeveiliging	Hoger	Theoretisch (literatuur)	?
ISA	Hoger	Empirisch op basis van kleine test	Klein
ACC	?	N.v.t.	N.v.t.
CACC	Hoger	Simulaties & Theoretisch	Groot
LKA en LCC	?	Theoretisch op basis van analogie	Klein
Tactische regelingen	Hoger	Simulaties & Theoretisch	Groot

Smart mobility-maatregel	Capaciteit		
	Richting effect	Basis	Omvang effect
In-voertuig filestaartbeveiliging	Hoger	Theoretisch (literatuur) & analogie	2%
ISA	Lager	Theoretisch op basis van analogie	?
ACC	Lager	Theoretisch op basis van analogie & Empirisch op kleine schaal	Groot
CACC	Hoger	Simulaties & Theoretisch	Groot
LKA en LCC	Lager	Theoretisch op basis van analogie	Klein
Tactische regelingen	Hoger	Simulaties & Theoretisch	Groot

Uit de tabel kunnen we afleiden dat smart mobility-maatregelen die als comfortvoorziening in de auto ontwikkeld zijn, vaak een negatief (direct) effect hebben op de doorstroming. Het meest duidelijk is het effect van *adaptive cruise control* (ACC). Wel liggen er grote kansen om de doorstroming te bevorderen door de bewegingen van voertuigen actief te beïnvloeden. Dat kan via de voertuigen zelf, bijvoorbeeld met *cooperative adaptive cruise control* waarbij communicatie de nadelen van ACC (lange responstijd, niet verder dan 1 voertuig vooruitkijken) kan opheffen. De snelheid van communicatie is dan wel van belang.

Daarnaast zijn er veel kansen om de doorstroming te bevorderen door het verkeer bewust te sturen via tactische regelingen. Dat betekent dat specifieke voertuigen een advies krijgen om (ten behoeve van de doorstroming) te versnellen of te vertragen, of van rijstrook te wisselen. Het uiteindelijke effect hangt daarbij sterk af van de specificaties van de adviezen.

Bij de route-informatie is het voor een goede doorstroming van belang dat de meest actuele route-informatie beschikbaar is. Informatie die reistijden voorspelt (in de toekomst), is mogelijk zelfs nog beter. Dat voorspellen is van groter belang naarmate de tijd tussen de informatie en het moment waarop een auto bij de mogelijke vertraging aankomt, groter is. Alternatieve routes kunnen de snelheid weliswaar verhogen, maar ook voor vertraging elders zorgen. Daarnaast zorgen ze over het algemeen voor langere afstanden.

Ten aanzien van de tweede onderzoeksvraag hebben we twee manieren uiteengezet om de effecten van smart mobility-systemen te bepalen. Het meest exact is een bottom-upmanier, waarbij het rijgedrag van een auto met hulpsystemen onderzocht wordt en de effecten op het niveau van de verkeersstroom via simulatiemodellen opgeschaald worden. Daarvoor zijn accurate data noodzakelijk. Het is lastig om deze data zelf te verzamelen, omdat van buitenaf niet duidelijk is wat er in de auto gebeurt. In dit kader is het van belang na te gaan in hoeverre het mogelijk is deze door autofabrikanten te leveren data in te winnen, al dan niet in geaggregeerde vorm. Daarnaast is het aan te raden autofabrikanten te verplichten data van alle sensoren aan te leveren in bepaalde situaties, bijvoorbeeld na een ongeluk. Dat is van belang om ervan te leren en zo de verkeersveiligheid te vergroten.

Summary

Smart mobility as relating to traffic flows on roads

Digital technology will play an increasingly important role in car driving. In this report we examine the effects that smart mobility systems have on traffic flows on roads. We particularly examine the smart mobility systems that impact the task of driving.

There are two main questions:

- (1) *What are the known effects of **smart mobility** systems on traffic flows?*
- (2) *How can the effects that **smart mobility** systems have on traffic flows be determined in future (this question is relevant to measures for which the effects are unknown)?*

We focus primarily on in-vehicle systems: these systems can bring information into the car, or are technologies within the car itself. Systems that strive to influence drivers without using technologies in the car, like dynamic speed limits displayed on portals, are beyond the scope of this report.

Known effects of smart mobility on traffic flows

As based on scientific literature and non-scientific reports, we mapped the reported effects as pertaining to the first main question. These known effects derive from empirical research, based on simulations or theoretical considerations. In many cases no literature exists to support the direct effects that smart mobility measures have on traffic flows; in such cases we stated the reported consequences of the measure (for example, less variation in speeds), and searched for literature that cited the reported impact that effects had on flows. It is for example sometimes possible to indirectly determine how a measure impacts traffic flow.

Many of the smart mobility measures involve systems which support car drivers. Here we analysed the effects of in-vehicle tailback protection, intelligent speed adaptation (ISA), adaptive cruise control (ACC), cooperative adaptive cruise control (CACC), lane assistance (LKA or LCC) and tactical control. The effects on the flow were divided into two classes, as determined by the cause of the delay. The two classes are distinguished according to the ratio between traffic that wants to use the road, and the relevant road section's capacity. In the first class, the intensity on the road is lower than the capacity, and the downstream capacity limitation has no impact on the flow. In this class, many of the smart mobility measures increase speed; however, the effects of some of these measures remains unclear.

The greatest effects in this class come from tactical arrangements in which road authorities specifically instruct vehicles, or from CACC, whereby vehicles communicate with each other to improve traffic flows. In the second class, capacity limitations or increases in downstream demand results in lower speeds, for example pertaining to a narrowing of the road or a ramp where the start of the traffic congestion forms. For this class, the measures have varying effects when capacity limitations exist. Again, tactical arrangements and CACC have the greatest positive effects. Notably, ACC - adaptive cruise control without communication - negatively impacts traffic flows.

Route advice appears to impact the drivers' route choices, yet the impact on traffic flow differs: generally, route advice results in increased distances travelled and decreased delays on the original route, while delays on the alternative route increase.

Future determination of effects of smart mobility on traffic flow

For the second main question we outlined two possible approaches for determining the effects of smart mobility measures in future: a top-down approach and a bottom-up approach.

The top-down approach compiles a wealth of data from traffic flows and the use of smart mobility systems. Once sufficient data is available we can – in principle – determine the effects of each system. The effects on traffic flow are not linearly dependent on the extent of use, and, moreover, the various systems will influence one another. If sufficient information is available, it becomes possible to make estimations. Determining how much the systems are used is difficult, because determining which driver is using which system and when is also difficult. The data collected by car manufacturers may be able to help with this. A further complication is the difficulty of extrapolating to a more widespread use of measures, as well as the fact that it may not be possible to accurately quantify the impact of combinations of measures.

The second approach is the bottom-up approach, whereby the effects on a particular smart mobility system are fully mapped in an experimental setting; this can be a test track for example, where we would analyse the intermediate distances vehicles maintain at what speeds. Quantifying the effects that occur when various systems are combined is also possible. Once these relationships are known we can use a microscopic traffic simulation to determine the effects that smart mobility measures have on traffic flows. However, to derive reliable results from this simulation, an accurate input of how the systems work (obtained via the bottom-up approach) is essential. This bottom-up approach can also quantify the effects for a degree of use not yet observed in actual traffic.

Referenties

AAA (2019). *Advanced driver assistance technology names: Aaa's recommendation for common naming of advanced safety systems*. Technical report. American Automobile Association.

Ahn, S. & Cassidy, M. (2007). Freeway traffic oscillations and vehicle lane-change maneuvers. In Allsop, R.E., Bell, M.G.H. & Heydecker, B.G., editors, *Proceedings of the International Symposium of Transportation and Traffic Theory* (pp. 691-710). Amsterdam: Elsevier.

Audi (2019). *Groen licht door slimme audi techniek*. Geraadpleegd via <https://nieuws.audi.nl/groen-licht-door-slimme-audi-techniek/>

Bereikbaar Haaglanden (2017). *Inventariserend onderzoek gebruik verkeersinformatie onder automobilisten*. Technical report. Rotterdam: Onderzoeksbureau EVA

Bourdeaud'hui, J., Devriese, J., Michielsen, K. & Vandenbossche, J. (2020). *Evaluatie opvolggedrag en impact talking traffic*. Technical report. Melle, België: BeMobile.

Calvert, S., Schakel, W. & Van Lint, J. (2017). Will automated vehicles negatively impact traffic flow? *Journal of Advanced Transportation* 17.

Carlson, R.C., Papamichail, I., Papageorgiou, M. & Messmer, A. (2010). *Variable speed limits as a mainline metering device for freeways*. Technical report.

Cassidy, M. & Bertini, R. (1999). Some traffic features at freeway bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 33(1): 25-42.

Ciuffo, B., Mattas, K., Anesiadou, A. & Makridis, M. (2020). *Open ACC database*. <http://data.europa.eu/89h/9702c950-c80f-4d2f-982f-44d06ea0009f>
Technical report. Brussels: European Commission, Joint Research Centre (JRC).

Chena, Danjue, Anupam Srivastava & Soyoung Ahn (2021). Harnessing connected and automated vehicle technologies to control lane changes at freeway merge bottlenecks in mixed traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 123.

EC (2019). *Road safety: Commission welcomes agreement on new EU rules to help save lives*. Press release, 26 March 2019, Brussels: European Commission.
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_1793

Edmonds, E. (2018). *AAA Finds Driver Assist Vehicle Systems Struggle in Real-World Conditions*. AAA Newsroom. Geraadpleegd via <https://newsroom.aaa.com/2018/11/americans-misjudge-partially-automated-driving-systems-ability-based-upon-names/>

Hall, F.L. & Agyemang-Duah, K. (1991). Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* No.1320, 91-98.

Hamers, P., Soekroella, A. & Taale, H. (2019). *Impact van c-its use cases*. Verslag challenge, Den Haag, 11 juni 2019.

- Harms, H. (2006). *80 km/u vertraagt? De oorzaken van de toename in filezwaarte na invoering van de 80 km/u maatregel*.
- Harms, I. & Dekker, G. (2017). *ADAS: from owner to user. insight in the conditions for a breakthrough of advanced driver assistance systems*. Utrecht: Connecting Mobility NL.
- Harms, I.M., Bingen, L. & Steffens, J. (2020). Addressing the awareness gap: A combined survey and vehicle registration analysis to assess car owners usage of ADAS in fleets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 134: 65-77.
- Hegy, A. & Hoogendoorn, S.P. (2010). Dynamic speed limit control to resolve shock waves on freeways-field test results of the specialist algorithm. In *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 519-524. IEEE.
- Hoogendoorn, R., van Arem, B. & Hoogendoorn, S. (2014). Automated driving, traffic flow efficiency, and human factors: Literature review. *Transportation Research Record*, 2422(1):113-120.
- Katwijk, Ronald van, Immers, Ben, Taale, Henk & Wilmink, Isabel (2011). *Stoplicht op oranje (geel) voor groen - een goed idee?* Delft: Traffic Quest.
- KiM (2017). *De rol van reisinformatie in het wegverkeer*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
- KiM (2020). *Kerncijfers mobiliteit 2020*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
- Khattak, Z.H., Smith, B.L., Park, H. & Fontaine, M.D. (2020). Cooperative lane control application for fully connected and automated vehicles at multilane freeways. *Transportation research part C: emerging technologies*, 111, 294-317.
- Knoop, V.L., Duret, A., Buisson, C. & Arem, B. van (2010). Lane distribution of traffic near merging zones – influence of variable speed limits. In *Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems*.
- Knoop, V.L., Wang, M., Wilmink, I., Hoedemaeker, D. M., Maaskant, M. & Meer, E.-J. van der (2019). Platoon of SAE level-2 automated vehicles on public roads: Setup, traffic interactions, and stability. *Transportation Research Record*, 2673(9): 311-322.
- Lämmer, S. & Helbing, D. (2008). Self-control of traffic lights and vehicle flows in urban road networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008(04): P04019.
- Linde, M. van der (2020). *Binnen de lijntjes kleuren met Lane Keeping Systemen: Het verkennen van de grenzen van het Operational Design Domain van Lane Keeping Systemen in bochten*. Master's thesis, Universiteit Hasselt.
- Lv, Y., Duan, Y., Kang, W., Li, Z. & Wang, F.-Y. (2014). Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2): 865-873.
- Makridis, M., Mattas, K., Anesiadou, A. & Ciuffo, B. (2020). Open ACC. *An open database of car-following experiments to study the properties of commercial ACC systems*. arXiv preprint arXiv:2004.06342.
- Mesionis, G., Brackstone, M. & Gravett, N. (2020). Microscopic modeling of the effects of autonomous vehicles on motorway performance. *Transportation Research Record*, 2674(11): 697-707.

Michon, J.A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In Leonard Evans & Richard C. Schwing, eds., *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-524). Boston: Springer.

Milanés, V. & Shladover, S.E. (2014). Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48: 285-300.

Minderhoud, M.M. & Bovy, P.H. (1999). Impact of intelligent cruise control on motorway capacity. *Transportation Research Record*, 1679(1): 1-9.

OVV (2019). *Wie stuurt? Verkeersveiligheid en automatisering in het wegverkeer*. Technical report. Den Haag: Onderzoeksraad voor Veiligheid.

Patire, A.D. & Cassidy, M.J. (2011). Lane changing patterns of bane and benefit: Observations of an uphill expressway. *Transportation Research Part B*, 45: 656-666.

Pueboobpaphan, R. & Arem, B. van (2010). Understanding the relation between driver/vehicle characteristics and platoon/traffic flow stability for the design and assessment of cooperative cruise control. In *Transportation research record*, volume 2189, 88-97.

SAE (2016). *Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles*. SAE International. https://www.sae.org/standards/content/j3016_201609

Schaap, N., Tutert, B. & Draijer, J. (2018). *Wie niet snel is, moet smart zijn - over real-time reisinformatie in de spits*. Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk.

Schakel, W.J. & Arem, B. van (2014). Improving traffic flow efficiency by in-car advice on lane, speed, and headway. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(4): 1597-1606.

Schakel, W.J., Gorter, C.M., Winter, J.C. de & Arem, B. van (2017). Driving characteristics and adaptive cruise control? A naturalistic driving study. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9(2): 17-24.

Schlaich, J. (2010). Analyses of route choice behavior using mobile phone trajectories. In *Proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

Sternlund, S. (2017). The safety potential of lane departure warning systems – A descriptive real-world study of fatal lane departure passenger car crashes in Sweden. *Traffic injury prevention*, 18(sup1): S18-S23.

Sternlund, S., Strandroth, J., Rizzi, M., Lie, A. & Tingvall, C. (2017). The effectiveness of lane departure warning systems: a reduction in real-world passenger car injury crashes. *Traffic injury prevention*, 18(2): 225-229.

Taale, H. (2018). *Effecten van benutting in Nederland een overzicht van 210 praktijk-evaluaties*. Den Haag: Rijkswaterstaat.

Tan, H., Zhao, F., Hao, H. & Liu, Z. (2020). Estimate of safety impact of lane keeping assistant system on fatalities and injuries reduction for China: Scenarios through 2030. *Traffic injury prevention*, 21(2): 156-162.

TrafficQuest (2019). *Verkeer in Nederland*. Delft: TrafficQuest.

- Vander Werf, J., Shladover, S.E., Miller, M.A. & Kourjanskaia, N. (2002). Effects of adaptive cruise control systems on highway traffic flow capacity. *Transportation Research Record*, 1800(1): 78-84.
- Viti, F., Hoogendoorn, S.P., Alkim, T.P. & Bootsma, G. (2008). Driving behavior interaction with acc: results from a field operational test in the Netherlands. In *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 745-750. IEEE.
- Vlassenroot, S., Broekx, S., De Mol, J., Panis, L.I., Brijs, T., and Wets, G. (2007). Driving with intelligent speed adaptation: Final results of the Belgian ISA-trial. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(3): 267-279.
- Yuan, K., Knoop, V.L. & Hoogendoorn, S.P. (2015). Capacity drop: Relationship between speed in congestion and the queue discharge rate. *Transportation Research Record*, 2491(1): 72-80.
- Zweck, M. & Schuch, M. (2013). Traffic light assistant: Applying cooperative ITS in European cities and vehicles. In *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, pp. 509-513. IEEE.

Colofon

Dit is een uitgave van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)

September 2021

ISBN/EAN: 978-90-8902-252-3
KiM-21-A012

Auteur

Victor Knoop

Vormgeving

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)

*De verantwoordelijkheid voor de inhoud en de conclusies van deze publicatie
ligt volledig bij het KiM.*

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)
Postbus 20901
2500 EX Den Haag
Telefoon: 070 456 19 65

Website: www.kimnet.nl
E-mail: info@kimnet.nl

Publicaties van het KiM zijn als PDF te downloaden van onze website www.kimnet.nl
U kunt natuurlijk ook altijd contact opnemen met één van onze medewerkers.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen onder vermelding van het KiM als bron.

Het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) maakt analyses van mobiliteit die doorwerken in het beleid en in de samenleving. Als zelfstandig instituut binnen het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) maakt het KiM strategische verkenningen en beleidsanalyses. De inhoud van de publicaties van het KiM behoeft niet het standpunt van de minister en de staatssecretaris van IenW weer te geven.



Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid

Dit is een uitgave van het

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Postbus 20901 | 2500 EX Den Haag
www.rijksoverheid.nl/ienw

www.kimnet.nl

ISBN 978-90-8902-252-3
September 2021 | KiM-21-A012

