

Mobiliteitseffecten van vroege vormen van zelfrijdende auto's –

Een systeem dynamische benadering

Steven Puylaert – Studio Bereikbaar – steven.puylaert@studiobereikbaar.nl

Maaïke Snelder – TNO / TU Delft – maaïke.snelder@tno.nl

Rob van Nes – TU Delft – r.vannes@tudelft.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk

24 en 25 november 2016, Zwolle

Mobiliteitseffecten van vroege vormen van zelfrijdende auto's – Een systeem dynamische benadering

Nieuwe auto's worden steeds meer uitgerust met automatische functies. De eerste automodellen (level 1 en 2 volgens de indeling van SAE) zijn reeds in de winkel verkrijgbaar. Verdergaande vormen van automatisering (level 3 en verder) worden nu ontwikkeld. Om investeringsbeslissingen te maken is het voor overheden van belang inzicht te verkrijgen in de mobiliteitseffecten van zelfrijdende auto's. Op dit moment focust de kwantitatieve literatuur met betrekking tot deze effecten vooral op capaciteitseffecten op een enkel wegvak. De literatuur over de effecten van zelfrijdende auto's op grote schaal blijft vooralsnog vooral kwalitatief.

Dit artikel beschrijft het Systeem Dynamisch model (SD-model) wat is ontwikkeld om de mobiliteitseffecten van vroege vormen van zelfrijdende auto's (level 1,2 en 3) in Nederland te verkennen. De structuur van het SD-model is gebaseerd op de structuur van de ScenarioVerkenner. Het ontwikkelde model is meer verkennend dan exact, en is bedoeld om in korte tijd verschillende scenario's te kunnen doorrekenen. Het verkennende karakter biedt voordelen omdat op dit moment de effecten van zelfrijdende auto's onbekend zijn. Het model is intern gevalideerd en vergeleken met andere simulatiemodellen (waaronder het LMS). Uit de validatie blijkt dat het SD-model geschikt is om verkennende studies uit te voeren.

In een studie is het SD-model toegepast op vier karakteristieke relaties in Nederland. In deze simulaties tussen 2010 en 2050 neemt geleidelijk het aantal zelfrijdende voertuigen toe, er blijft altijd spraken van gemengd verkeer. Voor deze relaties zijn twee scenario's (autonoom en coöperatief) met bandbreedtes doorgerekend om het effect van zelfrijdende auto's op de vervoerwijzekeuze, het vertrektijdstip en de reistijd te bepalen. De simulaties laten een stijging van 1% tot 9% van het aantal autoverplaatsingen zien, afhankelijk van het scenario en het relatietype. Zelfrijdende auto's die niet communiceren (autonome auto's) zullen hierdoor tot meer files leiden. Op de onderzochte snelwegrelatie leidt dit tot 12% extra voertuigverliesuren, gecorrigeerd naar een lagere reistijdwaardering voor level 3 bestuurders. Dit laat zien dat de voordelen van autonome zelfrijdende voertuigen vooral bij de eigenaren van zelfrijdende voertuigen liggen en niet bij het overige autoverkeer. Coöperatieve auto's, die ook communiceren met anderen, leiden op de meeste relaties tot een gelijk aantal verliesuren als in de situatie zonder zelfrijdende voertuigen. De overheid zal tot de komst van zelfrijdende auto's van level 4 en 5 andere maatregelen moeten zoeken om de verwachte files tegen te gaan.

1. Introductie

Moderne auto's worden in toenemende mate uitgerust met deels zelfrijdende functies. De Amerikaanse *Society of Automotive Engineers* (SAE International, 2014) heeft 6 niveaus van zelfrijdende auto's gedefinieerd. In hun schaal is level 0 een auto zonder automatische functies en level 5 een voertuig dat volledig zelf kan rijden onder alle omstandigheden. Eerste versies van zelfrijdende auto's zijn op dit moment op de weg te vinden: in luxe wagens zit bijna standaard adaptive cruise control en lane keeping (level 1 en 2). In level 2 heeft de bestuurder nog een deel van de rijtaak, waar in level 3 de auto verantwoordelijk is voor de volledige rijtaak, echter nog niet onder alle omstandigheden. In level 3 auto's wordt verwacht dat de bestuurder soms de besturing moet overnemen als de auto dit aangeeft. Bij level 4 en 5 is dit niet meer het geval en kan de auto of zichzelf in veiligheid brengen (level 4), of kan hij zelf rijden onder alle omstandigheden (level 5). Dit onderzoek focust alleen op level 0, 1, 2 en 3.

Het implementatiepad van zelfrijdende auto's is nog gehuld in mist. Het is sterk onzeker wanneer welke levels van automatisering verkrijgbaar zullen zijn, wat de penetratiegraad is op welk moment en hoe dit varieert per regio of land. Ook de effecten die zelfrijdende auto's zullen hebben op autobezit, de reistijdwaardering van de bestuurders, de capaciteit en de reiskosten zijn onzeker. Door al deze onzekerheden is het moeilijk om uitspraken te doen over het aantal gereden kilometers, uitstoot en files in de toekomst. Voor overheden is het echter wel van belang om inzicht te hebben in deze factoren aangezien dit aan de basis staat voor hun mobiliteitsbeleid voor de komende jaren.

Volgens Milakis, Van Arem, & Van Wee (2015) en Fagnant & Kockelman (2014) focust kwantitatieve literatuur op het gebied van effecten van zelfrijdende auto's op dit moment vooral op enkele wegen en lokale verbeteringen of verstoringen. Literatuur op een schaalniveau hoger is weer voornamelijk kwalitatief (KPMG; CAR Group, 2012; Litman, 2014; Raspe, Zwaneveld, & Delgado, 2015). Deze beschikbaarheid van literatuur sluit niet aan bij de dagelijkse praktijk van overheden. Op dit moment zijn macroscopische modellen het instrument om voorspellingen te doen over de effecten van beleidsmaatregelen. Deze modellen zijn echter niet ontworpen om ook zelfrijdende auto's te kunnen simuleren. Door hun gedetailleerde karakter kunnen zij daarnaast slecht omgaan met de vele onzekerheden die de "zelfrijdende auto innovatie" met zich meebrengt. De eerste studies (Snelder, van Arem, van Grol, Hoogendoorn, & van Nes, 2015; Tetraplan, 2015) (bijvoorbeeld met het LMS) met deze modellen naar zelfrijdende auto's laten zien dat het detailniveau tot lange rekentijden leidt en hen daardoor ongeschikt maakt voor verkenningen. Een ander nadeel is dat zelfrijdende auto's niet als aparte modaliteit worden gemodelleerd in deze modellen, maar dat alleen de eigenschappen van de 'gemiddelde' auto aangepast kunnen worden.

Dit artikel presenteert een macroscopisch model waarmee de impact van vroege vormen van zelfrijdende voertuigen (level 1,2 en 3) op mobiliteit kan worden verkend. Het model gebruikt hiervoor de simulatieaanpak genaamd Systeem Dynamica (SD-model), en is gebaseerd op de structuur van de ScenarioVerkenner (Malone, Verroen, Korver, & Heyma, 2001). De toegevoegde waarde van het model is dat verkenningen gedaan kunnen worden en de bandbreedte van de onzekerheden in kaart gebracht kunnen worden. Het doel is om inzicht te kunnen bieden in de belangrijkste effecten en niet in

details te verzenden. Het model gebruikt een combinatie van scenario- en transportmodellering en maakt geen gebruik van een expliciet netwerk, maar van basale snelheid intensiteitscurves. Dit maakt de rekentijd kort, en samen met een simpele structuur, is het daardoor geschikt om meerdere scenario's te vergelijken. In dit onderzoek wordt zowel een autonoom als een coöperatief ontwikkelingsscenario gesimuleerd. Het verschil hierin is dat autonome auto's alleen hun omgeving monitoren, waar coöperatieve auto's ook met andere voertuigen of infrastructuur informatie uitwisselen. Beide ontwikkelingspaden zijn gesimuleerd voor een casestudie in Nederland.

Hoofdstuk 2 beschrijft de structuur van het SD-model. De casestudie is beschreven in hoofdstuk 3, net als de resultaten van de simulaties. In hoofdstuk 4 worden de conclusies besproken.

2. Methode

2.1 Scope

Het SD-model focust op gemengd verkeer van level 0, 1, 2 en 3 (SAE International, 2014). Milakis et al. (2015) hebben in hun 'ripple model' de verschillende levels van de SAE aan mogelijke invloeden op vraag en aanbod van vervoer gelinkt. In dit artikel worden level 1 en 2 als één vorm gezien, aangezien hun impact vergelijkbaar is. Van personenvervoer is zowel de vraag als de aanbodkant opgenomen in het model, maar van vrachtvervoer is alleen de invloed op het aanbod gemodelleerd.

De onderzoeken van Milakis et al. (2015), Litman (2014) en Snelder et al. (2015) geven een beeld van de mogelijke effecten van zelfrijdende auto's op mobiliteit: capaciteitseffecten (maximumcapaciteit, schokgolven, capaciteitsval en netwerkeffecten), het effect op de reistijdwaardering (van de bestuurder) en de directe kosten (benzinekosten, verzekeringskosten), de verplaatsingsafstand, parkeereffecten, vervoerwijzekeuze voor vracht, veiligheid en betrouwbaarheid van reistijden. Dit artikel beperkt zich tot de eerste drie effecten (de capaciteit, de reistijdwaardering en de directe kosten), aangezien deze het meest direct zijn en het meest expliciet genoemd worden in literatuur.

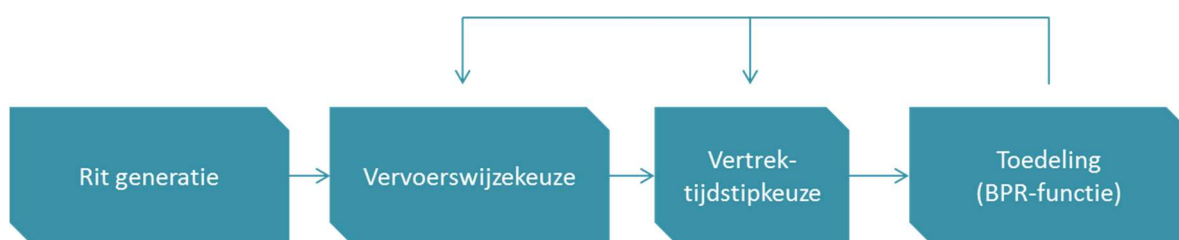
De effecten die zelfrijdende auto's hebben op capaciteit kunnen worden samengevat in viertal parameters (Hoogendoorn, van Arem, & Hoogendoorn, 2014; Snelder et al., 2015): een hogere maximumcapaciteit, een vermindering van het aantal schokgolven, het verkleinen van de capaciteitsval en het beter verdelen van voertuigen over het netwerk. Het tweede effect wat meegenomen wordt is dat bestuurders van zelfrijdende auto's hun tijd anders kunnen besteden en dus een andere reistijdwaardering hebben. Dit effect speelt een rol in de vervoerwijzekeuze en de vertrektijdstipkeuze. Het derde effect wat meegenomen wordt zijn de directe kosten van een reis per auto, deze dalen waarschijnlijk voor zelfrijdende auto's. Dit komt door lagere brandstofkosten door efficiënter rijden, lagere verzekeringskosten en minder onderhoud (Litman, 2014; Snelder et al., 2015).

2.2 Het Stelsel Dynamisch model (SD-model)

In deze verkennende fase is er een model nodig waarin in korte tijd met verschillende instellingen simulaties gedraaid kunnen worden. De huidige verkeersmodellen zijn sterk in details maar daardoor ook complex. Aangezien de onzekerheden over de effecten van zelfrijdende auto's groot zijn, voegt een hoger detailniveau weinig toe. In dit artikel is Stelsel Dynamica als methode gekozen omdat Stelsel Dynamica het mogelijk maakt verschillende scenario's snel te analyseren, hiermee kan de methode met de onzekerheden van de "zelfrijdende auto innovatie" omgaan (Abbas, 1990; Pruyt, 2013; Sterman, 2000). Stelsel Dynamica maakt gebruik van causale relaties tussen elementen van een systeem. Door deze te kwantificeren is het mogelijk het gedrag van dit systeem over de tijd te onderzoeken. Systemen Dynamica kan toegepast worden op kleine systemen als een bedrijf, maar ook op grote systemen zoals het klimaat van onze aarde (Meadows, Meadows, Randers, & Behrens, 1972; Sterman, 2000). De structuur van het SD-model is gebaseerd op de ScenarioVerkenner (Malone et al., 2001), een model in de jaren 90 ontwikkeld door TNO om voorspellingen te doen over mobiliteit in de verre toekomst. De ScenarioVerkenner methode is omgeschreven naar andere software (VENSIM), op sommige punten versimpeld en is uitgebreid met verschillende voertuigcategorieën voor level 1 & 2 en 3 zelfrijdende auto's.

2.3 Structuur van het SD-model

Het doel van het model is om de mobiliteitseffecten van vroege vormen van zelfrijdende auto's in Nederland van 2013 tot 2050 te kunnen onderzoeken. 2050 is als einddatum gekozen omdat er verwacht wordt dat level 4 voertuigen dan een significant aandeel vormen (Nieuwenhuijsen, 2015). Per tijdstap (een week) wordt de vervoerwijzekeuze, het aantal reizen met de auto in de spits en de reistijden van de auto berekend. Figuur 1 beschrijft de 4 stappen waar het model uit bestaat. Er zijn drie belangrijke stappen: de vervoerwijzekeuze, de vertrektijdstipkeuze en de bepaling van de reistijd (toedeling). De volgende paragrafen beschrijven deze stappen in meer detail.



Figuur 1 De vierstappen in het model

Stelsel Dynamica maakt gebruik van gemiddelde relaties tussen variabelen, hierdoor kan er geen toedeling op een expliciet netwerk worden gedaan. Het model gebruikt daarom verschillende karakteristieke relaties. Voor elke relatie is er een snelheid-intensiteit curve (BPR-curve) waarmee de reistijd wordt bepaald. Deze reistijd wordt teruggevoerd naar de vervoerwijzekeuze en de vertrektijdstipkeuze voor de volgende berekenstap. Het model neemt aan dat mensen geleidelijk over een half jaar hun keuze aanpassen. De tijdstap van het model is een week, dit is de grootste tijdstap waarin extreme veranderingen nog waarneembaar zijn.

Er zijn twee simulatieomgevingen gebruikt om de simulaties uit te voeren: een 'Ceteris Paribus omgeving' en een 'echte wereld omgeving'. Bij Ceteris Paribus worden alle omgevingsfactoren constant gehouden, behalve de introductie van zelfrijdende voertuigen. In de 'echte wereld' worden naast de introductie van zelfrijdende auto's ook de capaciteit van het huidige wegennet, de populatie, het autobezit, de kosten voor openbaarvervoer en de snelheid van het openbaarvervoer en een toename van het vrachtvervoer meegenomen.

De modaliteitskeuze

Het basisjaar van het model is 2013. Voor het ijken van de vervoerwijzekeuze is data uit het OViN gebruikt (CBS, 2014). In het Ceteris Paribus scenario zal het totaal aantal verplaatsingen gelijk blijven, in het echte wereld scenario neemt dit geleidelijk toe volgende voorspellingen van het PBL (PBL, 2013). De gemeenten in Nederland zijn opgedeeld in 6 typen, elk met hun eigen bevolkingsgroei. Deze typen vormen ook de herkomst-bestemmingsmatrix. De typen zijn: 1) Grote steden in de Randstad, 2) Randgemeenten grote steden in de Randstad, 3) Overige steden Randstad, 4) Uit- en instralingsgebieden Randstad, 5) Steden rest Nederland en 6) Overige gebieden rest Nederland. Deze 6 gebieden leiden tot een HB-matrix van 36 cellen. Echter kan er ook verkeer zijn binnen cellen, daarom worden er 6 schaduwcellen toegevoegd (Malone et al., 2001). Het SD-model maakt geen onderscheid in reismotief, leeftijdscategorie of inkomen. Het enige onderscheid dat gemaakt wordt is de beschikbaarheid van een auto en het niveau van automatisering van de auto.

Met een logit model wordt berekend hoeveel mensen met een bepaalde modaliteit reizen (zie vergelijking 1). De utiliteitsfunctie wordt getoond in vergelijking 2. De constante en de schaalfactor zijn gekalibreerd aan de hand van gestapelde data uit het OViN van 2010 tot 2013. De directe kosten van de reis is voor automobilisten met een zelfrijdende auto lager, ook is voor level 3 bezitters de reistijdwaardering lager.

$$T_{m,r} = P_r \frac{e^{V_{m,r}}}{e^{\sum V_{m,r}}} \quad (1)$$

$$V_{m,r} = -\mu_m (TT_{m,r} * VoT_m + Bra_{m,r} * d_{m,r} + C_{m,r}) \quad (2)$$

Waarin:

V	=	Utiliteit [-]	VoT	=	Reistijdwaardering [€/uur]
μ	=	Schaal factor [1/€]	C	=	Constante [€]
TT	=	Reistijd [uur]	d	=	Afstand [km]
Bra	=	Brandstofkosten [€/km]	T	=	Verplaatsingen [#]
P	=	Productie [# verplaatsingen]	m	=	Index van de vervoersmiddelen
r	=	Index van de relatie			

In de modaliteitskeuze worden de verplaatsingen in vier categorieën ingedeeld: verplaatsingen waarvoor geen auto beschikbaar is, verplaatsingen waarvoor een normale auto beschikbaar voor is (level 0), verplaatsingen waarvoor een level 1 of 2 auto

beschikbaar voor is, of verplaatsingen waarvoor een level 3 auto beschikbaar is. De eerste groep mensen (geen auto) kan kiezen tussen reizen als passagier, met de trein, met BTM (bus tram metro) of met actieve modaliteiten (fietsen of wandelen). De andere drie groepen (level 0, 1&2 en 3) kunnen ook nog uit als bestuurder reizen. Of mensen wel of geen auto beschikbaar hebben wordt bepaald op basis van OViN-data. Het percentage verplaatsingen per automatiseringscategorie is bepaald op basis van onderzoek van Nieuwenhuijsen (2015).

Voor vrachtauto's wordt er geen modaliteitskeuze of vertrektijdstipkeuze gemaakt. Het aantal vrachtautoverplaatsingen is direct gekoppeld aan het aantal verplaatsingen van personenauto's. Uit telgegevens uit 2013 blijkt dat 8% van de verplaatsingen op het hoofdwegennet met vrachtwagens wordt gemaakt (NDW, 2016). Dit wordt over de gehele simulatie constant gehouden. Uit de gegevens blijkt dat 6% van de verplaatsingen met vrachtwagens in een spitsuur wordt gemaakt (NDW, 2016). Het percentage vrachtwagens per automatiseringsniveau wordt gelijkgetrokken met personenvoertuigen.

Vertrektijdstipkeuze

Van de verplaatsingen die met de auto gemaakt worden, wordt op eenzelfde wijze als bij de vervoerwijzekeuze bepaald hoeveel verplaatsingen in de spits gemaakt worden. Het logit-model heeft twee keuzes: in de spits rijden of buiten de spits rijden. Dit model gebruikt de reistijdwaardering, de reistijd en een constante. De reistijd en de constante zijn bepaald op basis van het OViN 2010 tot en met 2013. De reistijdwaardering wisselt per level van automatisering. De gehele functie is beschreven in vergelijking 3.

$$V_{p,r} = -\mu (TT_{p,r} * VoT + C_r) \quad (3)$$

Waarin:

V	=	Utiliteit [-]	VoT	=	Reistijdwaardering [€/uur]
μ	=	Schaalfactor [1/€]	C	=	Constante ¹ [€]
TT	=	Reistijd [uur]	p	=	Index van de periode (in de spits, buiten de spits)
r	=	Index van de relatie			

Toedeling – bepaling van de reistijd

Voor verplaatsingen gemaakt in de piek wordt de reistijd berekend. Dit wordt niet gedaan op de traditionele manier van een toedeling van de vraag naar een netwerk, maar met behulp van een BPR-functie (snelheid – intensiteit relatie). De hiervoor gebruikte functies staan beschreven in vergelijking 4 en 5.

$$S_r = \frac{S0_r}{1 + \beta_r * (IC_r)^4} \quad (4)$$

$$IC_r = \frac{\sum_l (I_{rl} + HGVI_{rl} * PCU) * PCUA_l}{Cap_r} * OF \quad (5)$$

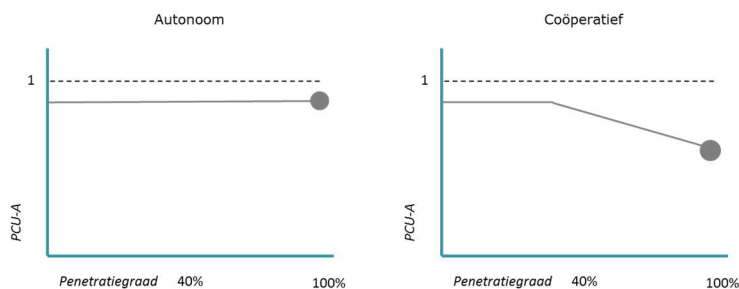
¹ Voor verplaatsingen buiten de piek is de constante nul

Waarin:

S	=	Snelheid in periode p [km/h]	PCU	=	Passenger car unit voor vrachtwagens
S_0	=	Free-flow snelheid [km/h]	$PCUA$	=	Passenger car unit voor automatisering
I	=	Intensiteit personenvoertuigen [voert/uur]	β	=	Stedelijkheidsgraad
$HGVI$	=	Intensiteit vrachtwagens [voert/uur]	l	=	Index niveau van automatisering { $l \in 0, 1/2, 3$ }
Cap	=	Capaciteit [voert/uur]	OF	=	Overlap factor
p	=	Index van de periode (piek or dal)	r	=	Index relatie

De vorm van de BPR-functie is overgenomen uit de ScenarioVerkenner (Malone et al., 2001). De free-flow snelheid (S_0) is afgeleid van verplaatsingen in de nacht uit het OViN. De β , de verstedelijkingsgraad, is overgenomen van de ScenarioVerkenner. Per level van automatisering wordt een andere PCUA-waarde gebruikt. Als automatisering tot kortere volgtijden leidt is deze waarde kleiner dan 1. Bij grotere volgtijden is deze waarde groter dan 1. Voor de automatisering van vrachtverkeer wordt dezelfde PCU-waarde gebruikt. Om vrachtverkeer om te rekenen naar personenauto equivalenten wordt een traditionele PCU gebruikt. Deze waarde is 1.8, wat dezelfde waarde is als in het LMS.

Microsimulaties tonen aan dat de PCUA-waarde per level varieert afhankelijk van de penetratiegraad van coöperatief verkeer. Dit komt doordat boven een bepaalde waarde coöperatief rijden tot extra voordelen leidt. Figuur 2 toont de relatie gebaseerd op microsimulatie studies (Arnaout & Bowling, 2011; Ngoduy, Hoogendoorn, & Liu, 2009; van Arem, van Driel, & Visser, 2006) tussen de PCUA waarde en de penetratiegraad van het aantal coöperatieve voertuigen. In deze PCUA worden zo twee effecten gecombineerd: de effecten van het automatiseren van de auto (ontstaat vanaf de eerste auto op de weg) en van de het laten communiceren van voertuigen (ontstaat vanaf een bepaalde drempelwaarde). Deze PCUA grafiek verschilt voor level 1&2 en level 3, omdat er voor level 3 meer vergaande effecten worden verwacht. De penetratiegraad in de grafiek is de som van alle communicerende auto's op de weg. Hierin wordt meegenomen dat level 3 voertuigen ook level 1 voertuigen kunnen volgen als deze hiervoor uitgerust zijn.



Figuur 2 Relatie tussen de penetratiegraad en de PCUA-waarde in een Autonom (links) en Coöperatief (rechts) scenario.

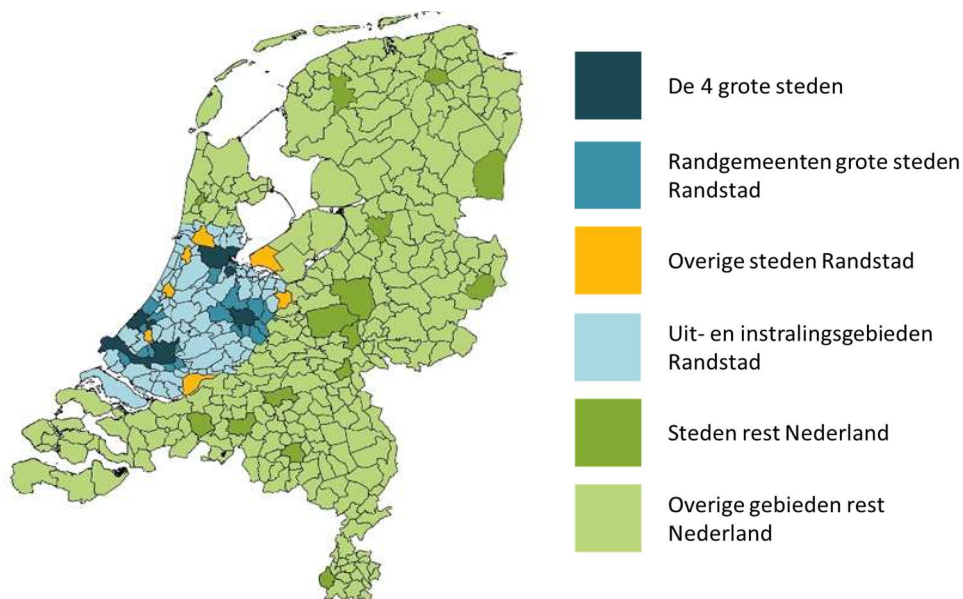
De berekende reistijd op basis van de BPR-functie wordt teruggevoerd naar de modaliteits- en vervoerwijzekeuze.

2.4 Validiteit van het model

De validiteit van het model is op verschillende manieren getest. Onder anderen de interne validiteit, de structuur, extreme waarden, grenzen en vergelijkingen met vergelijkbare modellen zijn getest. Deze testen zijn de meest relevante uit het boek *Business Dynamics* van Sterman (2000). Samengevat is de conclusie van de vergelijkingen en andere testen dat het model geschikt wordt geacht om verkenningen te doen de effecten van vroege vormen van zelfrijdende auto's.

3. Casestudie Nederland

Het SD-model is toegepast op 4 karakteristieke relaties om het effect van vroege vormen van zelfrijdende auto's op de mobiliteit te bepalen. De tijdshorizon is van 2013 tot 2050. Figuur 3 toont een kaart van Nederland met de indeling van de Nederlandse gemeenten. Deze zes typen zijn dezelfde als de ScenarioVerkenner gebruikt.



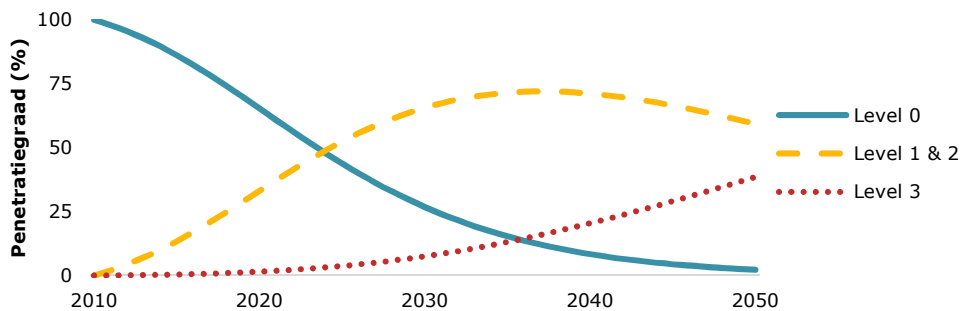
Figuur 3 Kaart van Nederland met de 6 gebiedstypen

De vier relaties waar dit artikel op focust zijn:

1. Verplaatsingen in de vier grote steden (binnen donkerblauw) (binnenstedelijk).
2. Verplaatsingen tussen een stad in de Randstad (geel) en de uit- en instalingsgebieden van de Randstad (licht blauw) (provinciaal).
3. Verplaatsingen van overig gebieden rest Nederland (licht groen) naar overige gebieden rest Nederland (licht groen) (ruraal)
4. Verplaatsingen tussen de vier grote steden (tussen twee donkerblauwe gebieden) (snelwegen)

3.1 Penetratiegraad zelfrijdende voertuigen

Wanneer hoeveel zelfrijdende voertuigen op de weg zijn is hoogst onzeker. Figuur 4 toont de aanname van de penetratiegraad per level per jaar. Dit is gelijk voor het autonome als voor het coöperatieve scenario. De penetratiegraden zijn overgenomen van Nieuwenhuijsen (2015). Zover bekend is dit de enige studie waar een kwantitatief model gebruikt is om voorspellingen te doen over de penetratiegraad. De resultaten van het onderzoek van Nieuwenhuijsen zijn 10 jaar verschoven. Dit is gedaan omdat het model een te optimistisch beeld laat zien voor 2015. Het model van Nieuwenhuijsen voorspelt namelijk dat er in 2015 al 30% level 2 voertuigen op de weg zijn, waar dit in werkelijkheid minder dan 1% is. De vorm van de curves wordt wel vertrouwd, alleen het startpunt wordt daarom verschoven. Verder voorspelt het model van Nieuwenhuijsen het autobezit en niet het aantal gemaakte verplaatsingen, hiertussen kan een verschil zitten. Litman (2014) beschrijft dat auto's in de eerste 10 jaar van hun levensduur dubbel zo vaak worden gebruikt dan in de jaren daarna. Omdat het model simpel gehouden is, is dit effect niet meegenomen. Het model zou daardoor namelijk leeftijdscategorieën voor voertuigen moeten hebben. Daarnaast is het onderzoek van Nieuwenhuijsen bedoeld voor personenauto's, maar, bij gebrek aan ander onderzoek, ook toegepast voor vrachtverkeer.



Figuur 4 Het percentage automatische voertuigen in Nederland tussen 2010 en 2050, afgeleid van Nieuwenhuijsen (2015).

3.2 Aannames over capaciteit, reistijdwaardering en monetaire kosten van automatische voertuigen

Tabel 1 toont de modelinvoer voor het autonome en coöperatieve scenario. Dit zijn de PCUA waarde, de reistijdwaardering en de monetaire kosten. Uit literatuur is niet alleen een gemiddelde waarde afgeleid, maar ook een boven en ondergrens. Niet alleen de base-case maar ook deze bandbreedtes zijn gesimuleerd. Dit is gedaan door 2000 runs te simuleren met invoerwaarden met een uniforme verdeling tussen de grenzen.

Tabel 1 Model input voor het autonome en coöperatieve scenario voor de reistijdwaardering, de capaciteit en de monetaire kosten.

Level	Relatietype	Penetratiegraad	Autonoom		Coöperatief	
			Basis	Bandbreedte	Basis	Bandbreedte
Reistijdwaardering (VOT)						
0	Alle	[0%-100%]	100%	-	100%	-
1 en 2	Alle	[0%-100%]	100%	-	100%	-
3	In grote steden	[0%-100%]	100%	-	100%	-
3	Ruraal en regionaal	[0%-100%]	90%	80%-100%	90%	80%-100%
3	Tussen grote steden	[0%-100%]	80%	70%-90%	80%	70%-90%
PCU (Capaciteit)						
0	Alle	[0%-100%]	1	-	1	-
1 en 2	In grote steden	[0%-100%]	1	1,1 - 0,9	1	1,1 - 0,9
1 en 2	Ruraal	[0%-100%]	1	1,05 - 0,95	1	1,05 - 0,95
1 en 2	Regionaal	[0%-100%]	1	1,05 - 0,95	1	1,05 - 0,95
1 en 2	Tussen grote steden	[0%-40%]	1	1,05 - 0,95	1	-
1 en 2	Tussen grote steden	[40%-100%]	1	1,05 - 0,95	0,95	1,1 - 0,9
3	In grote steden	[0%-100%]	0,95	1,1 - 0,9	0,95	1,0 - 0,9
3	Ruraal en regionaal	[0%-40%]	1	1,05 - 0,95	1	-
3	Ruraal en regionaal	[40%-100%]	1	1,05 - 0,95	0,95	1,0 - 0,9
3	Tussen grote steden	[0%-40%]	1	1,05 - 0,95	1	-
3	Tussen grote steden	[40%-100%]	1	1,05 - 0,95	0,9	1,0 - 0,7
Brandstofefficiency						
0	Alle	[0%-100%]	1	-	1	-
1 en 2	Alle	[0%-40%]	0,95	-	0,95	-
1 en 2	Alle	[40%-100%]	0,95	-	0,85	-
3	In grote steden	[0%-100%]	0,95	-	0,95	-
3	Ruraal en regionaal	[0%-40%]	0,95	-	0,95	-
3	Ruraal en regionaal	[40%-100%]	0,95	-	0,85	-
3	Tussen grote steden	[0%-40%]	0,95	-	0,95	-
3	Tussen grote steden	[40%-100%]	0,95	-	0,85	-

= geen bandbreedte (niet opgenomen in de gevoeligheidsanalyse)

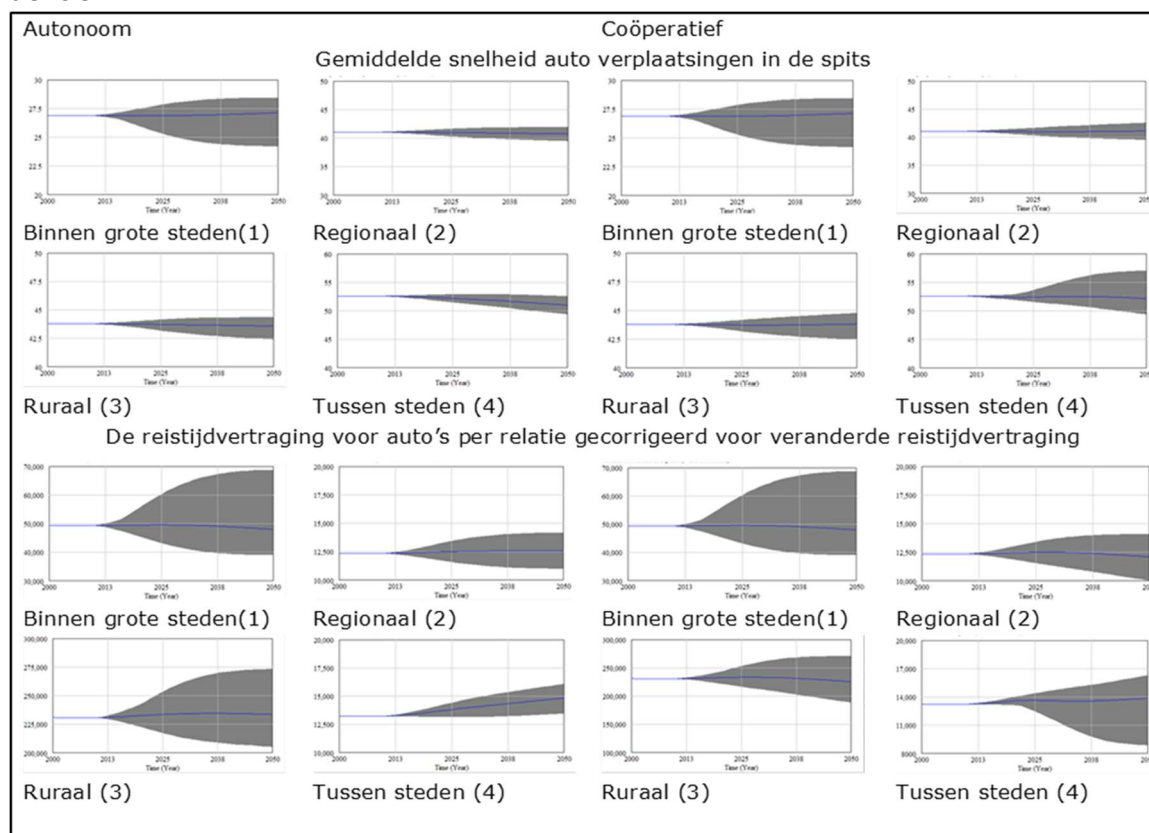
Tabel 2 vat samen welke veranderingen in de 'echte wereld omgeving' worden meegenomen. In de 'Ceteris Paribus omgeving' worden deze aspecten niet meegenomen. De aannames zijn gebaseerd op overheidsbronnen of aannames van het LMS.

Tabel 2 Model invoer voor het Echte wereld scenario

Variable	Verandering per jaar	Bron
Bevolkingsgroei	Tussen 0,1% en 0,4%	PBL (2013)
Toename autobezit	0,2 %-punt extra autobezit	LMS aannames (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2015)
Hogere OV kosten per kilometer	0,5% extra €/km	
Afname auto kosten per kilometer	0,7% minder €/km	
Meer vrachtverkeer	1,4% extra vrachtwagens	
Snellere of meer treinen	0,3 minuten sneller (tussen 2017 en 2030)	Programma Hoog Frequent Spoor (Mansveld, 2014)
Capaciteit wegen	Tussen de 0,8% en 1,3% extra	Aanname op basis van wegwitbreiding tussen 2014 en 2017 (Rijksoverheid, 2015)

3.3 Resultaten Ceteris Paribus omgeving

Figuur 5 toont de verwachte invloed van zelfrijdende auto's voor het Autonome en Coöperatieve scenario. De blauwe lijn in het midden toont de basissimulaties, de grijze gebieden geven de bandbreedtes aan. In de figuren hebben de Y-assen verschillende schalen. Er is aangenomen dat in de stad (relatie 1) coöperatieve functies geen verschil maken, daarom zijn de simulaties van het autonome en coöperatieve scenario daar identiek.



Figuur 5 Uitkomsten van de simulaties voor de 'Ceteris Paribus omgeving' voor het autonome (links) en coöperatieve (rechts) scenario

Over het algemeen kan worden verwacht dat het aantal autoverplaatsingen toeneemt door de afname van de reistijdwaardering en de kosten van een reis. Door deze extra auto's op de weg nemen de files toe (meer voertuigverliesuren). Zelfrijdende auto's kunnen echter ook de capaciteit van de wegen vergroten, waardoor files afnemen. Het netto-effect op files kan dus zowel positief als negatief zijn.

Het aantal autoverplaatsingen in de grote steden (relatie 1) neemt met 1% toe. In de basissimulaties neemt de snelheid iets toe (1%) en de voertuigverliesuren iets af (3%). Wel is in de steden de bandbreedte van de simulaties groot: 20% minder vertraging tot 40% extra vertraging.

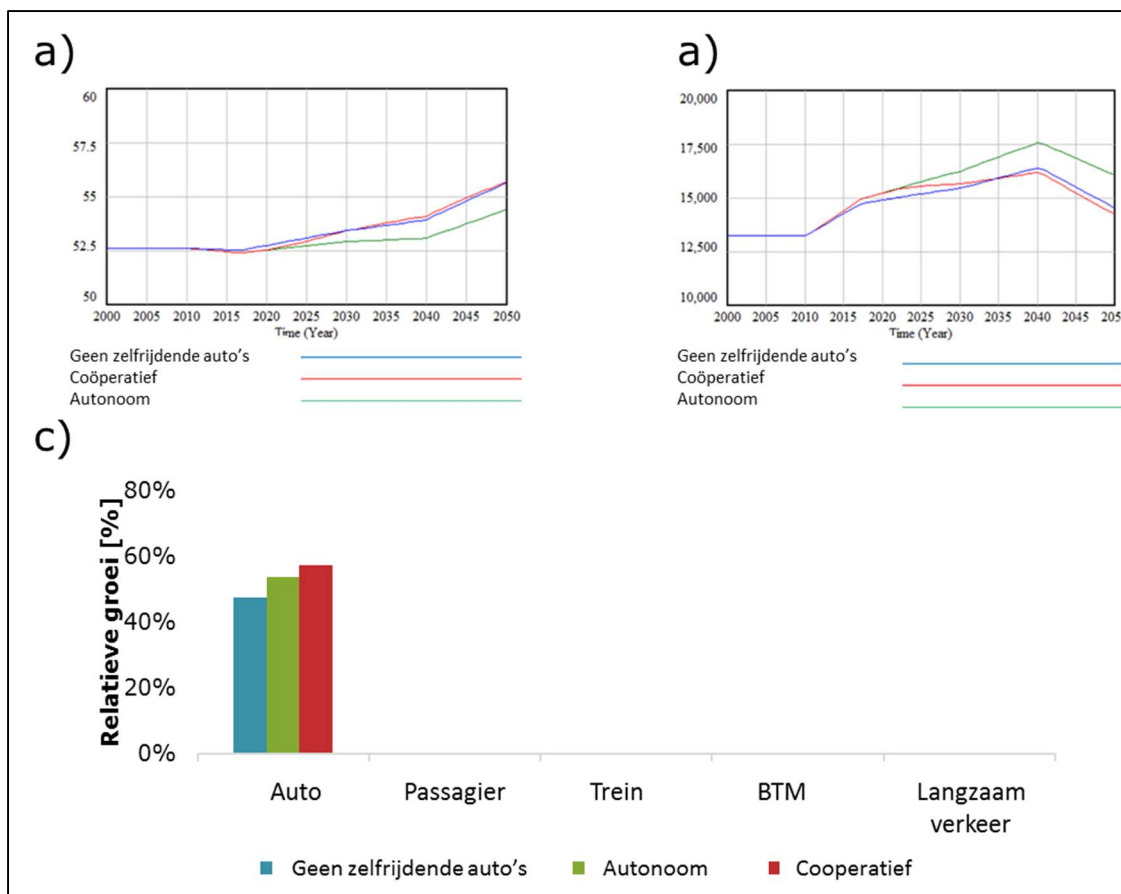
Ook op regionale relaties (relatie 2) neemt het aantal autoverplaatsingen in 2050 toe met 1% in het autonome scenario, en 2% in het coöperatieve scenario. In het autonome scenario stijgen de voertuigverliesuren met 2% in de basissimulatie. In het coöperatieve scenario dalen de voertuigverliesuren juist met 2%. Op deze relatie zijn de onzekerheidsbandbreedtes kleiner dan in de stad. Dit is een direct gevolg van de aannames met betrekking tot de invoer van het model.

Op rurale relaties (3) is voor het coöperatieve scenario een vergelijkbaar beeld te zien als op regionale relaties. Er komen meer voertuigen, en de reistijd daalt met ongeveer 3%. In het autonome scenario is te zien dat er ook meer voertuigen komen maar dat de reistijd met 1% stijgt. Net als op de regionale relaties is te zien dat deze relaties minder gevoelig zijn voor veranderingen dan in de stad. Dit komt omdat er op dit moment al weinig congestie is op dit type weg.

Op de wegen tussen de vier grote steden (relatie 4) is het grootste effect te zien. In het autonome scenario wordt 6% extra verkeer verwacht, in het coöperatieve scenario 9%. Door deze extra voertuigen ontstaat er meer file en daardoor extra voertuigverliesuren: 12% in het autonome en 4% in het coöperatieve scenario. In het autonome scenario is te zien dat de onzekerheidsbandbreedtes positief en negatief ongeveer dezelfde grootte hebben. Voor het coöperatieve scenario geldt dat de bandbreedtes positief groter zijn dan negatief.

3.4 Resultaten 'echte wereld' omgeving

Figuur 6 laat de resultaten zien van simulaties in de 'echte wereld' omgeving. Deze simulaties zijn alleen voor relatie 4 (tussen de vier grote steden) uitgevoerd omdat hier het beste een inschatting gemaakt kon worden van wegbreedingen.



Figuur 6 Resultaten van de simulaties in de 'echte wereld' omgeving. a) gemiddelde snelheid voor autoverplaatsingen in de spits; b) economische waarde van de voertuigverliesuren (gecorrigeerd voor een andere reistijdwaardering); c) relatieve groei in verplaatsingen tussen de drie scenario's.

In deze simulaties zijn dezelfde effecten te zien als in het Ceteris Paribus scenario. In de alle drie de scenario's wordt de auto aantrekkelijker. De komst van zelfrijdende auto's versterkt dit effect. Aangezien autonome voertuigen weinig capaciteitsvoordelen meebrengen is te zien dat de gemiddelde snelheid lager is dan in de andere scenario's. Ook de voertuigverliesuren gecorrigeerd naar de reistijdwaardering stijgt. De eerste jaren van de simulatie lijken het coöperatieve en autonome scenario sterk op elkaar doordat de 40% penetratiegraad drempel nog niet gehaald is. Daarna vertonen het coöperatieve en het scenario zonder zelfrijdende voertuigen grote overeenkomsten.

4. Conclusies en aanbevelingen

4.1 Verwachte effecten van vroege vormen van zelfrijdende auto's

Simulaties met het SD-model laten zien dat in zowel het autonome als het coöperatieve scenario het aantal verplaatsingen per auto toeneemt. In het autonome scenario leiden deze extra voertuigen tot een lagere gemiddelde snelheid en meer verliesuren (zelfs gecorrigeerd naar een lagere reistijdwaardering van zelfrijdende auto bestuurders). In de vier grote steden (in de stad) en tussen deze steden (snelweg) is dit effect het sterkst. In

het coöperatieve scenario te zien dat de capaciteitsvoordelen het effect van de extra voertuigen neutraliseren. De reistijdverliezen en gemiddelde snelheid blijven hier ongeveer gelijk.

In het model zijn niet alle in literatuur genoemde effecten meegenomen. Distributie-effecten, veiligere voertuigen en hogere beschikbaarheid van auto's als gevolg van autodelen zullen waarschijnlijk leiden tot meer gereden kilometers en extra vertragingen. De enige factor die het aantal voertuigkilometer kan doen dalen is het delen van ritten.

Dit onderzoek heeft zich vooral op congestie als gevolg van capaciteitsproblemen gericht. Zelfrijdende auto's zouden tot een verlaging van ongevallen kunnen leiden en daardoor ook tot minder files als gevolg van ongevallen.

4.2 Invloed op beleid

De simulaties laten zien dat het voordeel van autonome zelfrijdende auto's vooral bij de bezitters van deze voertuigen ligt. Voor hen is een autoverplaatsing aantrekkelijker, waar het voor de bestuurders van andere voertuigen onaantrekkelijker wordt. Bij coöperatieve voertuigen is dit effect minder groot, omdat deze ook een voordeel voor het gehele verkeerssysteem bieden. Vanuit een maatschappelijk oogpunt zou de overheid in het coöperatieve scenario moeten investeren.

4.3 De methode, verder onderzoek

De testen en simulaties met het SD-model laten zien dat het model geschikt is om verkenningen uit te voeren. Het model kan beleidsmakers helpen om snel inzicht in verschillende scenario's te verschaffen. Ook kan het inzicht verschaffen in welke modelruns het best met meer gedetailleerdere modellen kunnen worden uitgevoerd om het effect van zelfrijdende auto's in meer detail te analyseren. De belangrijkste voordelen ten opzichte van traditionele verkeersmodellen zijn dat het snel en adaptief is en dat zelfrijdende auto's endogeen gemodelleerd zijn.

Op dit moment kunnen nog niet alle effecten van zelfrijdende auto's gemodelleerd worden. Daardoor is het model nog niet in staat alle beleidsvragen te beantwoorden. Daarnaast is het model niet gedetailleerd genoeg om op alle detailniveaus uitspraken te doen. De belangrijkste verbetering is dat distributie-effecten ook worden meegenomen in het model; al kan dit lastig zijn in systeem-dynamische modellen. Verder zou het model uitgebreid kunnen worden met reistijdbetrouwbaarheid en robuustheidseffecten.

5. Referenties

- Abbas, K. A. (1990). The Use of System Dynamics in Modelling Transportation Systems With respect to New Cities in Egypt. *System Dynamics*, 90, 17.
- Arnaout, G., & Bowling, S. (2011). Towards reducing traffic congestion using cooperative adaptive cruise control on a freeway with a ramp. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 4(4), 699–717.
- CBS. (2014). *Documentatierapport Onderzoek verplaatsingen in Nederland (OViN)*. Heerlen.

- Fagnant, D., & Kockelman, K. M. (2014). The Travel and Environmental Implications of Shared Autonomous Vehicles, Using Agent-based Model Scenarios. *Transportation Research Part C*, 40, 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.trc.2013.12.001>
- Hoogendoorn, R., van Arem, B., & Hoogendoorn, S. (2014). Automated Driving, Traffic Flow Efficiency, and Human Factors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2422(2014), 113–120. <http://doi.org/10.3141/2422-13>
- KPMG; CAR Group. (2012). *Self-driving cars: The next revolution*. Delaware.
- Litman, T. (2014). Autonomous Vehicle Implementation Predictions Implications for Transport Planning. In *Transportation Research Board Annual Meeting* (pp. 36–42). Victoria. Retrieved from www.vtpi.org/avip.pdf
- Malone, K. M., Verroen, E., Korver, W., & Heyma, A. (2001). The Scenario Explorer for Passenger Transport: A Strategic Model for Long-term Travel Demand Forecasting. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 14(4), 331–353. <http://doi.org/10.1080/13511610120106138>
- Mansveld, W. (2014). *Besluiten PHS*. Den Haag.
- Meadows, D. ., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). The Limits to Growth. *Chelsea*, 205, 205. <http://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1972.tb05230.x>
- Milakis, D., Van Arem, B., & Van Wee, B. (2015). The ripple effect of automated driving. Retrieved from <http://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai%3Atudelft.nl%3Auuid%3Ae6ecff79-4334-4baa-a60b-3ed897587157>
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2015). *Beleidsuitgangspunten Weg en Spoorprognoses 2015*. Den Haag.
- NDW. (2016). INWEVA. Retrieved February 18, 2016, from <http://www.ndw.nu/toepassingen/bekijk/16/inweva/>
- Ngoduy, D., Hoogendoorn, S. P., & Liu, R. (2009). Continuum modeling of cooperative traffic flow dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 388(13), 2705–2716. <http://doi.org/10.1016/j.physa.2009.02.040>
- Nieuwenhuijsen, J. A. H. (2015). *Diffusion of Automated Vehicles*. TU Delft. Retrieved from repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:0f3f5155-88ec-4f66-bb3b-4a60fec61863/
- PBL. (2013). *Demografische ontwikkelingen 2010-2040*. (J. R. Eck, F. Van Dam, C. De Groot, & A. Jong, Eds.).
- Pruyt, E. (2013). *System Dynamics*. Delft: TU Delft. http://doi.org/10.1007/SpringerReference_7284
- Raspe, O., Zwaneveld, P., & Delgado, S. (2015). *De economie van de stad*. Den Haag.
- Rijksoverheid. (2015). Aanleg nieuwe wegen. Retrieved November 30, 2015, from <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/wegen/inhoud/aanleg-van-nieuwe-wegen>
- SAE International. (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems (J3016).
- Snelder, M., van Arem, B., van Grol, R., Hoogendoorn, R., & van Nes, R. (2015). *Methodische Verkenning Zelfrijdende Auto's en Bereikbaarheid*. Delft.
- Sterman, J. (2000). *Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston.
- Tetraplan. (2015). *Vejdirektoratet - Selvkørerende biler. Indledende trafikale følsomhedsberegninger*. Copenhagen.
- van Arem, B., van Driel, C. J. G., & Visser, R. (2006). The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4), 429–436. <http://doi.org/10.1109/TITS.2006.884615>