

# Effecten C-ITS en automatisch rijden

Bert van Velzen – Sweco Nederland – bert.vanvelzen@sweco.nl

## Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 24 en 25 november 2016, Zwolle

### Samenvatting

De ontwikkeling van werkelijk intelligente systemen voor het autoverkeer komt goed op gang. Steeds geavanceerder systemen in auto's en langs de weg, leidend tot een toenemende automatisering van auto's, coöperatief zowel onderling als met wegwakstsystemen.

De 'zelfrijdende auto' staat de laatste tijd stevig in de belangstelling. Is dat de ultieme slimheid? Wordt die gehaald? En wat kan er dan (nog) meer? Met C-ITS kan in de tussentijd al veel bereikt worden, maar ook is er meerwaarde in de situatie met zelfrijdende auto's. En met snel rekenende zelfrijdende auto's kan er mogelijk nog meer uit C-ITS gehaald worden.

Inzicht in de effecten is belangrijk. Voor het maken van toekomstplannen voor het mobiliteitssysteem en ook voor de verdere ontwikkeling: wat gaat goed, waar liggen kansen, wat zijn misschien onbedoelde neveneffecten?

Deze bijdrage geeft een schets van de uitdaging die er ligt om de effecten te bepalen. Deze uitdaging ligt binnen de context van b.v. de zogenoemde Evaluatiecirkel [1] en gaat verkeerskundig de diepte in op een interessant deelgebied. De focus ligt op het werkelijke verkeer.

Eerst geven we een beschrijving van mogelijke veranderingen die optreden in de mobiliteitssituatie. Kort gaan we in op het brede spectrum, om vervolgens in te zoomen op de verkeersstroom op wegvakken van autosnelwegen.

Het is geen afgerond verhaal, maar biedt een aanzet en aandachtspunten om onderzoeken, metingen en analyses, in te richten. Vragen die aan de orde komen, zijn:

- Wat is een waarschijnlijk ontwikkelingsscenario? Hoe kunnen we dat monitoren?
- Waaraan gaan we zien hoe auto's het anders (beter) gaan doen, en welk effect heeft dat op de hele verkeersstroom?
- Welke mogelijkheden zijn er om dit goed in beeld te brengen? Welke data, uit welke bronnen? Wat kunnen we met modellen?

De opbouw is vanaf de gedragingen van individuele auto's, via hun wisselwerking met de omringende auto's, tot aan de macroscopische verkeersstroom. We gaan in op:

- De uitdaging om, terwijl het wagenpark continu in ontwikkeling is, toch analyses te kunnen doen.
- Definities van enkele basisindicatoren
- De zoektocht naar indicatoren die er werkelijk toe doen, waar C-ITS op kan inspelen
- De complexiteit van het vastleggen en interpreteren van strookwisselingen
- Het tijdwegdiagram als kapstok om e.e.a. overzichtelijk in beeld te brengen
- De relatie met en de inzet van verkeersmodellen te verbeteren en analyses te verrijken.

## **1. Inleiding**

### *1.1 Aanleiding*

Autorijden en daarmee het autoverkeer maken een transitie door die samenhangt met de ontwikkeling en toepassing van systemen voor het ondersteunen van de rijtaak en het versoepelen van de verkeersafwikkeling. Er is daarbij sprake van een steeds sterkere co-operatie tussen infrastructuur (inclusief de wegkantsystemen die daar deel van uitmaken), voertuigen (ook onderling) en hun bestuurders.

Welke effecten heeft dit en hoe kunnen we deze effecten bepalen (meten en berekenen)?

En dit niet alleen in de eindsituatie, maar ook in de transitieperiode. De begin-/voorsituatie ligt inmiddels in het verleden en hebben we misschien niet zo goed in vastgelegd als we straks zullen wensen.

Inzicht in effecten is van belang voor de sturing en geleiding van de ontwikkeling en toepassing, een samenspel van technologie, industrie, wegbeheer, mobiliteitsmarkt, maatschappij, overheid. In Nederland wordt dit in samenwerking opgepakt in Connecting Mobility, DITCM, Smart Mobility. Door metingen en analyses op een afgestemde manier te doen, wordt het makkelijker om resultaten tussen projecten onderling te vergelijken, van elkaar te leren en voort te bouwen.

### *1.2 Afbakening, context en opzet*

De steeds geavanceerdere auto's rijden veel kilometers op autosnelwegen, waar het verkeer het meest overzichtelijk is, meest kansrijk voor rijtaakautomatisering. Op snelwegen gaat het primair om de interactie van voertuigen onderling en met de verkeersstroom, waarbij de diverse wegkantsystemen ondersteunend zijn. Hier gaat deze paper voornamelijk op in.

Daarnaast is er de ontwikkeling van slimme systemen op het onderliggende wegennet, voornamelijk rond kruispunten (b.v. Beter Benutten, Talking Traffic). Hier gaat het voornamelijk om de interactie tussen de voertuigen en de wegkantsystemen (en minder tussen de voertuigen onderling), wegkantsystemen die erop gericht zijn om het voor alle voertuigen en daarnaast de andere modaliteiten (fietsers, voetgangers) zo efficiënt mogelijk te regelen. Typische C-ITS-concepten op het OWN zijn groene golven, time-to-green, time-to-red, GLOSA (Green Light Optimised Speed Advice). Efficiënter naar een kruispunt toe rijden, bij voorkeur niet hoeven stoppen, optimaal groen krijgen, beter over opstelstroken verdelen etc.

Verschijselen en effecten op netwerkniveau, mobiliteitspatronen en, op langere termijn, de ruimtelijke inrichting zijn zonder meer erg interessant en belangrijk, maar laten we in deze paper buiten beschouwing.

Onze focus ligt op doorstroming, hoewel comfort en veiligheid vaak de motivatie van een weggebruiker vormen om een (auto met een) geavanceerd systeem aan te schaffen en te gebruiken. Winst op doorstroming is veelal het gevolg, maar het zijn de

wegbeheerders en industrie die expliciet op verbetering van de doorstroming op wegvakken kunnen sturen<sup>1</sup>.

De uitdagingen zoals in [1] geschetst, betreffen i) het bepalen van de effecten op verkeersstroomniveau, ii) het kwantificeren van de effecten, iii) uniformiteit effectbepaling. In deze paper hopen we daar enige input voor te geven.

De beschrijving is voornamelijk gericht op de werkelijke situatie, de praktijk buiten op straat. Daarnaast zijn er aspecten die vooraf dan wel beter (of juist alleen maar) in een laboratorium (m.n. rijnsimulator) onderzocht kunnen worden. Ook biedt inzet van een verkeersmodel belangrijk inzicht. Op deze wisselwerking, passend in de Evaluatiecirkel [1], gaan we kort in.

We proberen inzicht te krijgen in de wijze *waarop* de nieuwe auto's ander (beter) rijgedrag vertonen en hoe zich dat vertaalt naar de verkeersstroom. Liever oorzakelijke verbanden dan alleen (maar) statistische correlaties.

Deze bijdrage is mede gebaseerd op voorwerk dat in DITCM-verband (Dutch Integrated Testsite for Cooperative Mobility) gedaan is in een aantal expertsessies. Dank gaat daarom uit naar Marieke Martens (UT), Martie van der Vlist (Goudappel/DAT), Ronald van Katwijk (TNO/Traffic Quest), Coen Obdeijn (V-Tron), Jacques Terken (TUE), Igor Passchier (TASS).

### *1.3 Leeswijzer*

We spreken in het navolgende vaak voor het gemak over 'nieuwe auto's', maar daarmee bedoelen we impliciet de wegakantsystemen waarmee ze in verbinding staan.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van toepassingen, tijdpad en data. Hoofdstuk 3 geeft de positie van dit stuk in het veld van onderzoeksvragen, hypotheses tot en met data. Hoofdstuk 4 geeft een globale beschouwing van de potentiële fenomenen. Hoofdstuk 5 gaat in op het concreet (meten en) beschrijven. Hoofdstuk 6 gaat kort in op de relatie met laboratorium en modelonderzoek en maar de cirkel rond.

Deze bijdrage bevat diverse beschouwingen, veronderstellingen en aspecten die zich lenen voor verdere discussie, formulering tot te onderzoeksvraagstukken etc.

## **2. Overzicht: toepassingen/systemen, tijdpad, gegevens**

### *2.1 Gevarieerd opgebouwde verkeersstroom*

We hebben te maken met een verkeersstroom waarin meerdere soorten voertuigen en vooral met verschillende niveaus van automatisering rijden. Een greep van wat er op een weg voorbij kan komen:

- traditionele voertuigen, met hooguit passieve veiligheidssystemen als ABS en airbag.

---

<sup>1</sup> De weggebruiker doet voornamelijk mee door de snelste route te kiezen.

- vaak al wel uitgerust met een navigatiesysteem, in toenemende mate voorzien van ruwe actuele verkeersinformatie.
- voertuigen met verschillende niveaus mate van rijtaakondersteuning (cruise control, lane keeping, adaptive cruise control (ACC), cooperative adaptive cruise control (CACC)); een prillere gedachte is b.v. haptisch rijden (zie NRC 2-3 juli, TU-Delft ergosystemen)
- diverse apps die de menselijke bestuurder informeren, adviseren en stimuleren tot bepaald gedrag en/of handelingen (zie b.v. het spookfile-project op de A58 en de apps ontwikkeld voor de A67).
- op termijn dergelijke toepassingen die de menselijke bestuurder omzeilen.
- verdere automatisering van de rijtaak, tot en met:
  - de zelfrijdende auto
  - de zelf *en* coöperatief rijdende auto.

De gegeven opsomming past in de levels 0 en 1 van de SAE-indeling (zie onderstaand overzicht). De huidige zelfrijdende auto's van Tesla, Google e.d. bewegen zich op de levels 2 en 3.

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

(Bron: SAE International J3016, 2014 [2])

Een lage penetratiegraad van de deelgroepen kan een handicap vormen om effecten op verkeersstroomniveau zichtbaar te krijgen, vooral voor specifieke apps in het pilotstadium. Soms is een beperkte penetratiegraad (b.v. 10 %) reeds voldoende om een macroscopisch effect te bereiken doordat andere weggebruikers 'meegesleept' worden in het gedrag. Merk op dat dat geldt zowel voor de verbeterende nieuwe systemen als voor de achterblijver (de enkele 'kale auto' die niet 'meedoet', sleep ook anderen mee in zijn (dan) hinderlijke gedrag.

Een aanname is dat de verschillende systemen geen tegengestelde werking moeten vertonen. Ze zouden van eenzelfde optimalisatieconcept (verkeersstroomtheoretisch kader) moeten uitgaan. Meest basaal gezegd moeten ze in ieder geval 'hufteerproof' zijn. Het dilemma tussen systeem- en gebruikersoptimum vormt eveneens een aandachtspunt.

Naast de diversiteit van voertuigen en systemen, zal er ook sprake blijven van een mix van verschillende rijstijlen: chauffeurs verschillen, de techniek en systemen per automerk verschillen en verwacht mag worden dat zelfrijdende auto's gebruik(er)sinstellingen kennen (snel naar bestemming, werken onderweg, sightseeing etc.).

## *2.2 Continue ontwikkeling: monitoring plus gerichte evaluaties*

Vaak valt de term transitie, overgang. Dat veronderstelt echter dat er een startsituatie is en een eindsituatie. Verwacht mag worden dat de slimheid in het autoverkeerssysteem niet ophoudt met ontwikkelen, dat er geen vaste eindsituatie bereikt zal worden. Het is b.v. niet klaar als alle auto's zelfrijdend zijn; coöperatief liggen er dan nog veel kansen. Verdere verschuivingen in wagenpark en vooral ruimtelijke inrichting nemen sowieso meer tijd in beslag.

Het is dus nooit klaar en ook tussentijds is het waarschijnlijk niet mogelijk om voldoende lange stabiele periodes (periodes waarin de samenstelling van de verkeersstroom stabiel is) aan te wijzen om, op de wijze van ex-post-evaluaties, 0-, 1-, 2-metingen etc. in het werkelijke verkeer, de praktijk, te doen<sup>2</sup>.

Een traject van monitoring lijkt de moeite waard. De periodiek te meten doorstromingsprestatie leggen we naast een goede beschrijving van de situatie. Wijzigingen die zoal optreden zijn: meer functionaliteit in de auto's, kwaliteitsverbeteringen op deelfuncties, een groter aandeel van specifieke systemen in het wagenpark (hogere penetratiegraad), etc. De set van vast te leggen kenmerken moet uitgewerkt en bijgehouden worden.

Om binnen deze voortschrijdende ontwikkeling op gang te houden en te volgen, zullen evaluaties op deelaspecten uitgevoerd moeten worden. Dit vergt steeds goed nadenken over de onderzoeksopzet, zodat de juiste vergelijkingen gemaakt en conclusies getrokken kunnen worden, waaronder het definiëren van onderzoeks- en controlegroep. Dat laatste is niet triviaal, want het maken van onderscheid tussen enerzijds een onderzoeksgroep (b.v. een aangewezen groep auto's met specifieke nieuwe ('nieuwste') systemen) en anderzijds een controlegroep (alle overige auto's, *zonder* die systemen) is een aanpak die strikt genomen alleen opgaat voor beschrijvingen/prestaties op individueel niveau. En ook dan in beperkte mate: de controlegroep heb je niet in de hand, zal doorontwikkelen en op den duur bovendien tevens *nog* nieuwere systemen bevatten.

---

<sup>2</sup> Laboratorium- en modelmatig onderzoek kennen die handicap niet: daar kun je de omstandigheden kiezen en vast zetten.

Voor beschrijvingen die betrekking hebben op de *wisselwerking* tussen auto's is het niet meer zinvol om de auto's in te delen in enerzijds onderzoeksgroep en anderzijds controlegroep. Dan moet opgeschaald worden: een verkeersstroom *met* 'nieuwe' auto's versus een verkeersstroom *zonder* 'nieuwe' auto's (maar verder vergelijkbaar etc.).

### 2.3 Data-beschikbaarheid

Echt gedetailleerde informatie van *alle* voertuigen zou ideaal zijn, maar is een utopie. Dat wil zeggen van *alle* voertuigen op elk tijdstip  $t$  de ruimtelijke coördinaten  $x(t)$ ,  $y(t)$  en eventueel de hoogte  $z(t)$ <sup>3</sup>. Als je daarbij ook de weg goed kent (markering, verharding, informatie over bochten, bochtigheid, omgeving, visuele obstakels etc.) kun je heel veel analyseren.

Van de nieuwste auto's kan technisch gezien de meeste informatie vastgelegd worden<sup>4</sup>. In de wisselwerking tussen deze auto's en de rest van de verkeersstroom levert dit echter maar 1 kant van het verhaal. Aanvulling op deze gegevens is dus nodig, in de regel bestaande uit metingen langs de wegwijk, onderscheiden in puntmetingen (radar-, laser-, infrarood- en lusedetectie) en trajectmetingen (beeldherkenningscamera's, blue tooth, GSM), en uit overige floating vehicle data (TomTom, HERE, Be-Mobile). In een specifiek onderzoek kan aan aanvullende sensoren (camera, dashcam) gedacht worden, waarmee enkele voertuigen of een vloot uitgerust worden (afhankelijk van het onderzoeksbudget) om het overige verkeer, de overige voertuigen te observeren.

De toename van databeschikbaarheid maakt dat op elk moment de *eerdere* situaties minder goed of gedetailleerd zijn vastgelegd, en *latere*, toekomstige situaties altijd beter. Voor het volgen van de ontwikkeling in de tijd hebben we graag enkele robuuste en toekomstvaste indicatoren.

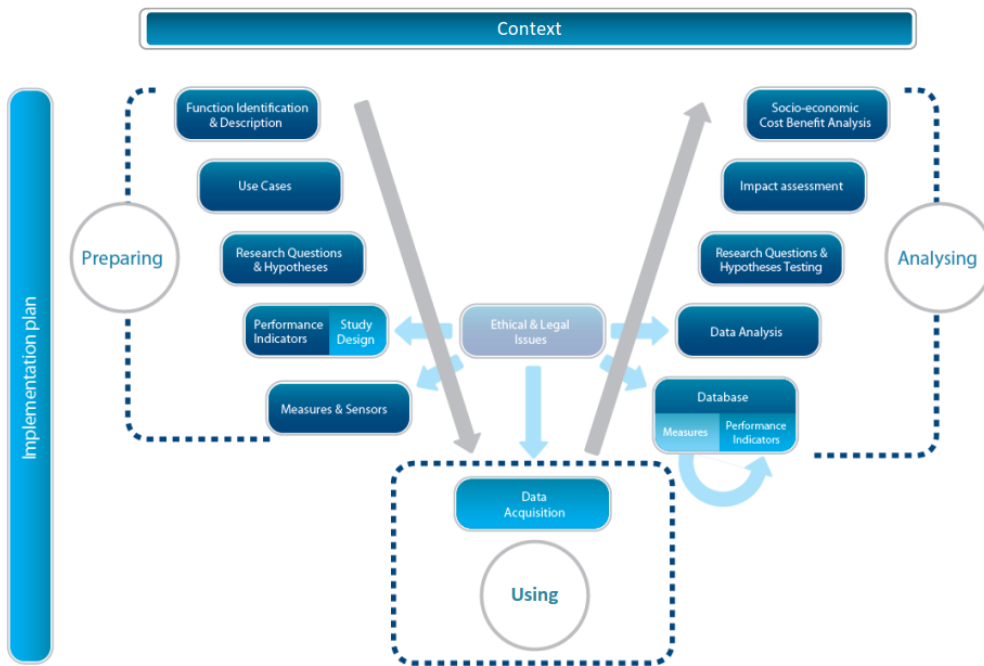
### 3. Onderzoeksvragen/hypothesen formuleren of fenomenen beschrijven?

Om effecten te bepalen is het gebruikelijk om te werken volgens het zogenoemde V-model van FESTA [3] [4] (zie de figuur). Dit volgt de letter V: links bovenaan beginnend bij een beschrijving van het systeem en via use cases, onderzoeksvragen en hypothesen, via indicatoren afdalend tot diep op de data, en daarna weer opschalend op tot geaggregeerde analyse en conclusies rechtsboven. In deze paper volgen we deze route losjes, waarbij use cases, onderzoeksvragen en hypothesen summier geadresseerd worden, niet scherp benoemd; we richten ons primair op beschrijving en indicatoren.

---

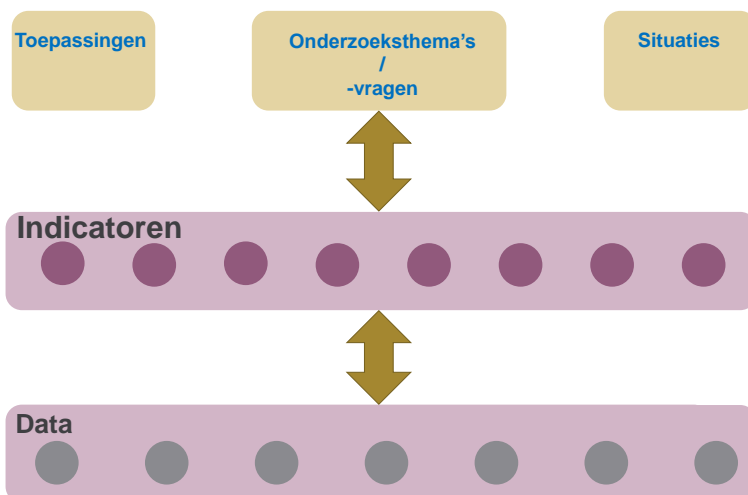
<sup>3</sup> Bijvoorbeeld met een coördinaatassen langs en loodrecht op de as van de rijbaan (zoals in het tijd-wegdiagram).

<sup>4</sup> En wordt ook voor het real time functioneren van de auto's gebruikt, Off-line is meer tijd voor evt. aanscherping van de positiebepaling (ruw GPS lijkt in ieder geval te grof). Brede beschikbaarstelling voor onderzoek is nog wel een belangrijk issue om te tackelen.



Figuur: FESTA V-model [4]

Ook zonder scherpe onderzoeksvragen en hypothesen op te stellen, komen in het beschrijven van het onderwerp/object al indicatoren naar voren. Vaak zijn dit indicatoren die aanleiding geven tot en gebruikt kunnen worden om onderzoeksvragen te formuleren en te beantwoorden. Een soort vraag-aanbod-wisselwerking, die ook speelt tussen indicatoren en data. Een indicator die niet gevoed kan worden met data, 'leeft' niet. En als data beschikbaar is, worden er al gauw indicatoren mee gemaakt<sup>5</sup>. In onderstaand schema is dit geschematiseerd. Het is aan de uiteindelijke onderzoeksopzet om voor vragen, indicatoren en data de juiste keuzes te maken.



Figuur: relatie onderzoeksvragen, indicatoren, data.

We schuiven het formuleren van onderzoeksvragen daarom even voor ons uit en laten bij voorkeur ook de harde data-realiteit niet beperkend zijn.

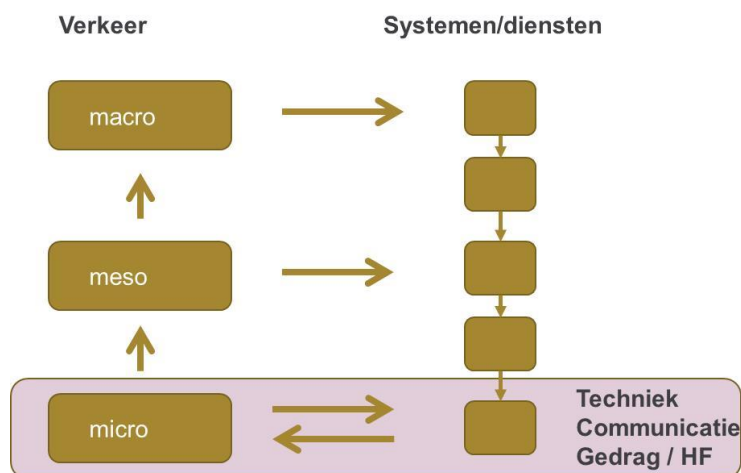
<sup>5</sup> Data (meten) heeft alleen zin als je via indicatoren tot weten komt.

#### 4. Welke fenomenen treden mogelijk op, waar moeten we op letten?

Hieronder volgt een beschouwing van mogelijke verschijnselen/effecten, met het accent op doorstroming. Voornamelijk de vinger leggen op files: ontstaan, voorkomen, uitstellen. Er zal naar verwachting verkeerskundig steeds efficiënter gereden worden. Dat het ook comfortabeler en veiliger is, is daarbij mooi meegenomen: het versterkt de acceptatie van de concepten en systemen en een directe winst is dat de spitsen al verlicht worden doordat het aantal door menselijke onoplettendheid veroorzaakte ongevallen afneemt.

Voor de gedachtenvorming onderscheiden we in de dynamiek van de verkeersstroom grofweg de niveaus micro, meso en macro. Scherpe grenzen trekken we daarbij niet.

- *Micro* gaat over het voertuig (inclusief zijn bestuurder) in directe relatie tot de meters infrastructuur waar het rijdt en de directe voor-, naast- en achterliggers.
- *Meso* gaat ruw gezegd over de 'groep' waarin het voertuig op dat moment rijdt, pakweg vijf à tien voertuigen vooruit (en achteruit en ernaast). M.a.w. de groep voertuigen die binnen enkele seconden voor een heel andere situatie kan zorgen.
- *Macro* betreft de toestand verder vooruit: of er al dan geen file op een kilometer stroomafwaarts staat, kan van invloed zijn op het rijgedrag.



*Figuur: analyses/monitoring op verschillende niveaus van de verkeersstroom vormt input voor systemen/adviezen die op microniveau de auto in gaan.*

De traditionele auto opereert voornamelijk op microniveau, en ook de auto met ACC. Het iets verdere vooruit kijken doet de bestuurder. De zelfrijdende auto opereert ook voornamelijk op microniveau, heeft qua vooruitkijken nog een uitdaging, maar leert snel. Het macroniveau 'komt binnen' via navigatie, verkeerssignalering en dergelijke. C-ITS-oplossingen als spookfilewaarschuwing koppelen meso/macro terug naar een optimalisatie op microniveau (waar de automobilist (maar ook de zelfrijdende auto) er zijn voordeel mee kan doen). CACC wordt ingeschakeld door de (menselijke of automatische) bestuurder, die zelf de resterende taken verzorgt, zoals strookwisselen, inhalen.

We werken de niveaus iets verder uit. Voor meso en micro, de voor C-ITS interessante niveaus, trachten we later in deze paper indicatoren te formuleren.



### *Micro*

Op individueel voertuiggedrag zijn de effecten naar verwachting het sterkst. Er wordt anders (dan 'voorheen') gereden, afstand gehouden, gestuurd, van strook gewisseld, geaccelereerd en geremd. Relevante indicatoren zijn indicatoren die dat onderscheid in beeld kunnen brengen. Zullen we de steeds weer nieuwere voertuigen herkennen? Waaraan? Vallen ze op? Hoe afwijkend zal het gedrag van 'de nieuwe auto' zijn, mogen zijn?

- Denk als uitgangssituatie aan ervaren automobilisten; deze voorspellen (anticiperen op) het gedrag van een andere auto/weggebruiker op basis van visuele informatie. Zij moeten niet onaangenaam verrast worden door al te afwijkend gedrag.
- De zelfrijdende auto's bijvoorbeeld moeten zich niet te vreemd gedragen, en ook dit oordelend vermogen ontwikkelen. Nieuwelingen in het verkeer. Snel, want met elkaar, lerend, dat wel.
- Dichterbij is de ontwikkeling van ACC: deze auto's vertonen (wellicht in het kinderziekt stadium) wat afwijkend gedrag: net iets te snel en te veel afstand houden [5]. Andere auto's kunnen dan contraproductief reageren.

Een aannemelijk scenario is dat de nieuwe auto's steeds min of meer binnen het spectrum van in de praktijk voorkomend rijgedrag (moeten) vallen, en dat langs deze weg het spectrum geleidelijk verbreedt en/of opschuift naar steeds 'beter' rijgedrag. Beter in welke zin dan ook: veiliger, efficiënter, ... .

### *Meso*

Het mesoniveau is waar de voertuigen in onderlinge wisselwerking de feitelijke afwikkelingskwaliteit realiseren en waar de C-ITS-systemen werken. Naast gemiddelde snelheid van de stroom en de intensiteit willen we verder inzoomen, met vragen als: wat zijn de longitudinale snelheidsverschillen, hoe is de verdeling ervan? Hoeveel en welke strookwisselingen worden er op welke manier uitgevoerd? Wat zijn de volgafstanden en -tijden, hoe zijn die verdeeld? Hoe dragen de strookwisselingen, korte en/of lange volgtijden en grote en/of kleine snelheidsverschillen bij aan of gaan ten koste van de kwaliteit van de verkeersafwikkeling?

### *Macro*

Verdere aggregatie naar macroniveau, het hele wegvak en de hele spitsperiode. De verwachting is dat vergaande automatisering de afwikkelingscapaciteit vergroot, zelfs zo sterk dat we op enkele wegvakken met een strook minder toe kunnen. Omdat dat een hogere penetratiegraad vergt, speelt dit op de langere termijn.

## **5. Beschrijving verkeer – basisindicatoren en sleutelindicatoren**

Voor de beschrijving bouwen we op vanuit micro, naar meso. Dat begint met individueel rijgedrag. Zie ook de in DITCM-verband (de Landelijke Tafel Human Behaviour) opgestelde notitie [6]. Dit begint in het hoofd van de autobestuurder en zijn kijkgedrag, voor zover de persoon nog 'in de keten' zit, en anders in de algoritmen die alle sensor- en andere informatie verwerken. Dat domein is cruciaal maar uiterst complex, we gaan er hier niet verder op in. We kijken naar het uiterlijke gedrag van de auto's.

In principe is alle gedrag waarop *medeweggebruikers* hun gedrag bepalen belangrijk: rijstrook en positie daarin, acceleratie, hiaten (volgafstanden en -tijden), snelheden, (longitudinale en laterale) snelheidsverschillen, etc.

Voor indicatoren zijn meerdere definities mogelijk. B.v. volgafstand: staart-kop-afstand of kop-kop-afstand. De gemiddelde kop-kop-volgtijd is omgekeerd evenredig met de intensiteit. Etc.

Hieronder doen we voor enkele basisindicatoren, steeds voorafgegaan door een korte typering<sup>6</sup> van de indicator en een keuze voor definitie, een voorzet voor het gebruik van een combinatie van puntmetingen (wegkant en in-car) en langsmetingen (in-car).

Ongeacht of deze met de huidige technologie (al) mogelijk zijn, en of zaken als privacy daarvoor goed geregeld kunnen worden.

Daarna pogen we het op te tillen naar het niveau van sleutelindicatoren die specifiek het presteren van C-ITS kenmerken.

Een voorschot op de onderzoeksopzet is dat er de groep voertuigen is die met het te onderzoeken specifieke systeem (zeg systeem X) zijn uitgerust. Daarvan zijn gedetailleerde in-car-gegevens beschikbaar. Daarnaast kunnen mogelijk ook voertuigen, uitgerust met andere systemen, zeg Y, Z, etc., in het onderzoek betrokken worden als bronnen van detailgegevens. Deze rijden in een omgeving van overige auto's, waarvan aan de buitenkant niet zichtbaar is hoe zij uitgerust zijn; wellicht hebben enkele daarvan zelfs ook systeem X, als dat vrij op de markt is. Van die overige auto's kunnen steekproefsgewijs gegevens verzameld worden via b.v. dash cams (te plaatsen in de X-, Y-, Z-auto's en/of andere auto's).

### 5.1 Volgtijd en -verdeling

De set van volgtijden karakteriseert voor een belangrijk deel de verkeersstroom. Bij een vaste intensiteit geldt: hoe smaller de verdeling hoe gelijkmatiger de stroom. Een opeenvolging van zeer korte volgtijden levert een grotere kans op schokgolven op, etc.

- Definitie (een keuze): bij het passeren van een vast punt op de weg: de tijd tussen passeren van de achterkant van een auto (achterbumper) en de voorkant van de volgende auto (voorbumper).
- Puntmetingen (lusdetectie (elektronisch signaal) corrigeren naar fysieke voor- en achterbumper))
  - Data
    - individuele passages van alle passerende voertuigen
    - in-car-data van groepen X, Y, Z etc. op de betreffende locatie
    - deze metingen vervangen/identificeren in de verdeling o.b.v. wegkant-data. Een 1-op-1-match met de wegkant-data is mogelijk, maar wellicht niet strikt nodig.
- Langsmetingen (meerrijdend)
  - Data
    - in-car-data van groep X en van Y, Z etc.

---

<sup>6</sup> Geen dekkende typering. Veel uitgebreider is Paul Green [7] in zijn beschrijvingen.

- Frequentie: ca. twee keer per seconde
- Dit levert o.a. inzicht op in:
  - de plek in de verdeling waar de verschillende categorieën slimme auto's (X, Y, Z) voorkomen.
  - veranderingen van de volgtijdverdeling (b.v. kortste (gevaarlijke) volgtijden steeds minder aanwezig) en of dat te relateren is aan specifieke nieuwe slimme functies.
  - verloop van de verdeling binnen 1 gebruiker, en hoe tussen de systemen X, Y, Z de verdeling verschilt

## 5.2 Verdeling laterale posities

Wat betreft de invloed van de laterale posities op de verkeersafwikkeling zal een grote variatie nadelig zijn, maar bij brede rijstroken weer minder. Slingeren is mogelijk hinderlijker dan niet in het midden rijden.

Definitie (een keuze): in welke rijstrook de auto rijdt *en* de positie in die rijstrook: de afstand van zowel het zwaartepunt als de linkerzijde van het voertuig tot aan de linker markering. Relevante extra informatie is o.a. de breedte van de rijstrook en de geometrie van de weg: recht, bocht etc.

Puntmetingen en langsmetingen min of meer langs dezelfde redeneerlijn als hiervoor voor de volgtijden geschetst, met als toevoeging eventueel camera-observaties van het overige verkeer. Merk op dat de langsmetingen inzicht leveren in slingeren.

## 5.3 Snelheidsverschillen

Snelheidsverschillen zijn een (basis)indicator voor verkeersveiligheid, maar in een lichter/eerder stadium hebben ze al invloed op de verkeersafwikkeling. Ook hiervoor kunnen verdelingen opgesteld worden, waarin de bijdrage van de auto's van de soorten X, Y, Z aangewezen wordt. Het eenvoudigst zijn de snelheidsverschillen met de directe voorliggers. Maar ook die met de 4 of 5 auto's verder vooruit zijn belangrijk; CACC gebruikt die nl. ook.

## 5.4 Rijstrookwisselingen

Rijstrookwisselingen<sup>7</sup> vormen een complex verhaal. Onder sommige omstandigheden nadelig voor de verkeersafwikkeling (verstoring van het verkeer op de nieuwe rijstrook, turbulentie), in sommige juist voordelig (opvullen van gaten in de stroom op de bestemmingsstrook en/of ruimte maken op de herkomststrook), en in andere weer helemaal niet van belang (rustig verkeer, eigen snelheid houden). Ook de wijze waarop de strookwisseling gemaakt wordt, is belangrijk: langzaam genoeg om anderen niet te verrassen, snel genoeg om anderen niet te hinderen. De begin- en eindsnelheid spelen ook mee.

Een handzame, heldere, eenduidige indicator voor strookwisselen is dus niet zomaar gedefinieerd. Wat we wel kunnen doen is een wijze van gestandaardiseerd vastleggen afspreken.

---

<sup>7</sup> We bedoelen hier vrijwillige strookwisselingen, niet de gedwongen strookwisselingen bij versmallingen en in- en uitvoeringen.

- Belangrijke contextdata vormen de posities en snelheden van omliggende voertuigen; herkomststrook: voorligger; bestemmingsstrook: de achterligger en zijn volgers.
- Van het voertuig zelf:
  - Start: plek/tijdstip van het verlaten van de positie in de rijstrook; meer naar links of rechts dan een gewone fluctuatie, of (mits dat eerder gebeurt) het moment van richting aangeven.
  - Tussentijdstippen: momenten van overschrijden van de markering door
    - betreffende zijde van het voertuig (buitenspiegel?),
    - zwaartepunt voertuig (dit evt. aanwijzen als 'het' moment van strookwisselen),
    - andere zijde van het voertuig.
  - Einde: bereiken van de stabiele rijlijn in de bestemmingsstrook.
  - Beginsnelheid en eindsnelheid
  - Eventuele remactiviteit.
- data van de groep voertuigen X
- van geobserveerde auto's die strookwisselingen uitvoeren

De wijze van ordenen en beoordelen ligt nog open. Aantal wisselingen naar links? Naar rechts? Hoe classificeren we de verkeerssituatie (buiten de direct omliggende auto's)? Wat zijn acceptabele aantallen? Etc.

Met de strookwisselingen hebben we een typisch complex mesoscopisch verschijnsel te pakken. Eenvoudiger te beschrijven en interpreteren zijn de longitudinale processen als het optreden van snelheidswisselingen, zoals in filegolven/schokgolven zonder dat er rijstrookwisselingen in voorkomen, wetend dat die er wel de oorzaak van kunnen zijn.

De dynamiek tussen de rijstroken is een typisch domein waar het doen en interpreteren van metingen zodanig complex wordt dat de gedachte opkomt om microsimulatiemodellen in te zetten, de metingen daaraan te linken. Hierop gaan we in een later hoofdstuk iets nader in.

### 5.5 Van basis- naar sleutelindicator

Op basis van de gegeven, beschrijvende basisindicatoren kunnen we nadenken over steekhoudende sleutelindicatoren, indicatoren die scherper de vinger leggen op 'waar het echt om gaat'. Kandidaten daarvoor zijn bijvoorbeeld de *kenmerken* van de verdeling: het gemiddelde, de breedte en/of de spreiding (standaarddeviatie), de ondergrens (kortste volgers) etc. Voor de laterale positie is vooral de breedte van de verdeling interessant. Bij strookwisselingen moet een relatie gelegd worden met de verstoring die er evt. het gevolg van is.

Dit leidt vanzelf tot een doorkijk naar het niveau van onderzoeksvragen en hypothesen. Deze hangen samen met het streven (van de C-ITS-toepassingen) om het verkeer te optimaliseren (efficiënter, comfortabeler, minder hinder), waarin het begrijpen en beïnvloeden van het ontstaan van files centraal staat. Een streven is b.v. het filevrij houden van wegvakken die tegen de capaciteit aan zitten. Op deze wegvakken ontstaan

'spontaan' files, spookfiles, die ook weer 'vanzelf' oplossen. Hoe herkennen we in de verkeersstroom de omstandigheden die de *kans* op filevorming vergroten?

Een paar hypothesen, ter verdere uitwerking, zijn:

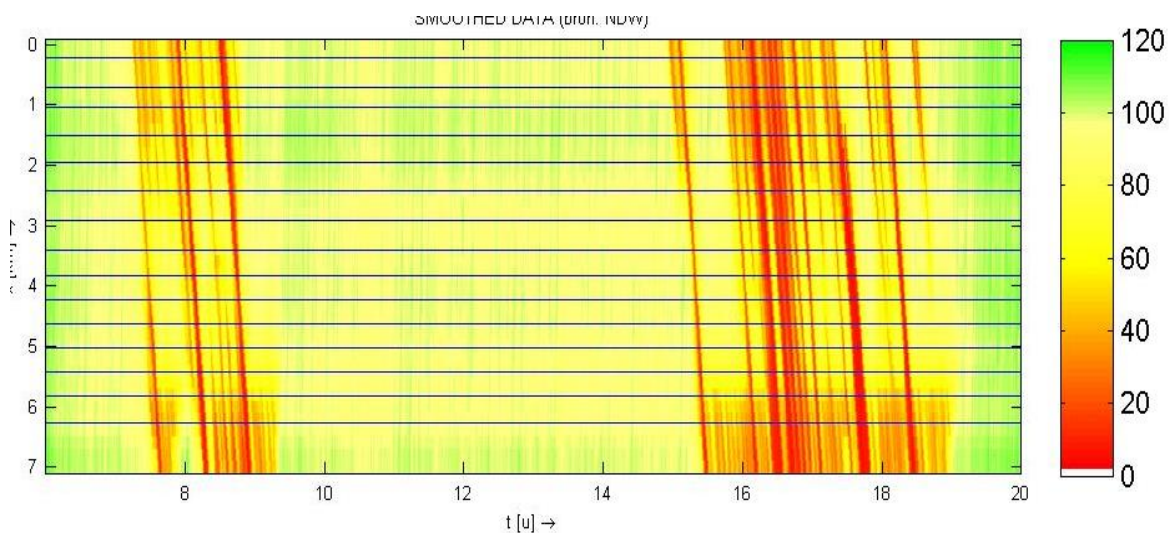
- er ontstaan vooral problemen als het snelheidsverschil met de (pakweg) vijfde voorligger te groot wordt.
- strookwisselingen zijn pas nadelig als i) het hiaat waar ingedoken wordt aan de wat krappe kant is en iii) de volgtijden van de (pakweg) vijf volgende auto's zodanig kort zijn dat het niet meer soepel opgevangen kan worden<sup>8</sup>.

Hierop doorredenerend zouden specifieke sleutelindicatoren geformuleerd en bepaald kunnen worden die i) de verkeersstroom karakteriseren en ii) aanknopingspunten vormen voor oplossingen.

### 5.6 Tijdwegdiagrammen

We maken nu eerst de stap naar een geaggregeerd beeld, als goede context om daarna kort nog enkele mesoscopische zaken te beschrijven.

Een gangbaar analyse-instrument is het tijdwegdiagram, voornamelijk gebruikt voor het helder presenteren van snelheden, files. Schokgolven zijn daarin als schuine banden (rode strepen die de lage snelheden voorstellen) te zien.

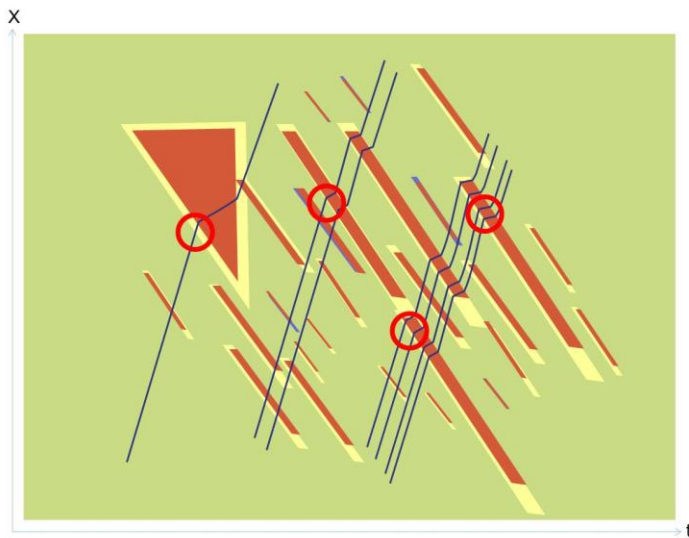


Deze diagrammen hebben standaard betrekking op de gehele verkeersstroom, de hele rijbaan, dus alle rijstroken. Hoe gedetailleerder deze diagrammen (of eigenlijk de onderliggende data), hoe nauwkeuriger de analyses die ermee gedaan kunnen worden. Op basis van de lusedetectoren is de resolutie typisch 500 meter bij 1 minuut. Er is veel te winnen door met behulp van datafusie (met b.v. FCD), smoothing e.d. een gedetailleerder beeld te vervaardigen.

In plaats van de snelheid kan ook een daarvan afgeleide grootte weergegeven worden, of de intensiteit of nog andere tijd-/plaatsafhankelijke grootheden, zoals de eerder genoemde snelheidsverschillen, kenmerken van de volgtijdverdeling (b.v. de 'ongelukkige' hiaten) etc.

<sup>8</sup> Druk verkeer met toch een brede volgtijdverdeling bevat dat soort verleidelijke, ongelukkige hiaten.

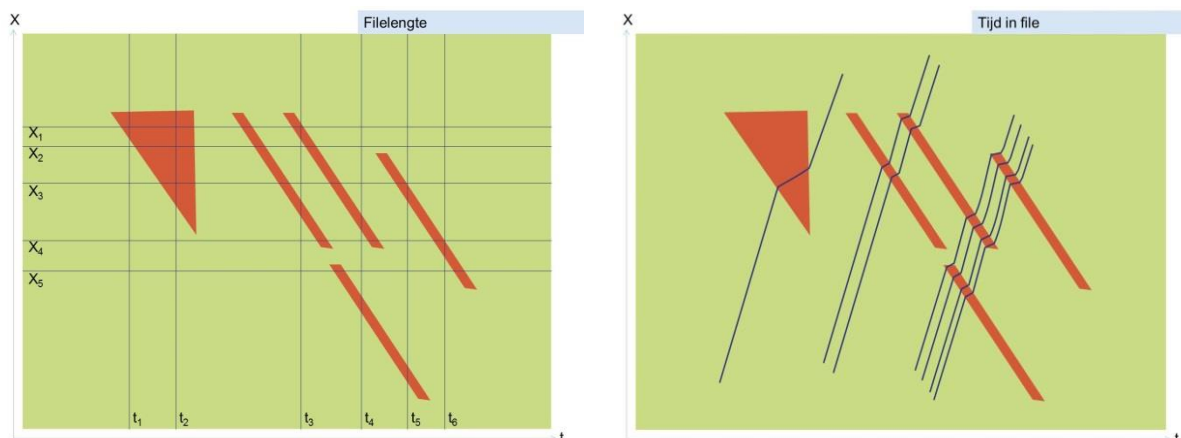
Als voorbeeld voor het gebruik gelden de Spookfile-apps. Deze beogen de schokgolven te verminderen, verzachten etc. Er zijn verschillende van die apps, die elk op hun eigen wijze de weggebruiker adviseren/verleiden. Het zou mooi zijn als hun effect op macroscopisch niveau te zien is aan het patroon in het tijdwegdiagram. Dit kan visueel ondersteund worden door de trajectoriën van deze auto's (met systeem X) in het diagram te plotten, mogelijk daarbij ook aan te geven op welke wijze/wanneer zij beïnvloed worden door de Spookfile-app. Interessant zijn in ieder geval de punten waar die trajectoriën van de X-auto's een filegebied of een schokgolf betreden, zoals in onderstaande figuur schematisch is weergegeven. Bij en na passage zou de schokgolf anders moeten verlopen: hapje eruit, smaller, eindigend etc.



Figuur: gestileerd tijdwegdiagram, met spookfile-events

### 5.7 Macro- en mesoanalyse

Het tijd-wegdiagram helpt ook om de analyses op macroniveau inzichtelijk te maken, zoals in bijgaande figuren schematisch is weergegeven. In deze figuren zijn de rode vlakken een filtering op file, d.w.z. een snelheid onder de 50 km/h en met een minimale lengte van 2 km.



Figuur: gestileerd tijdwegdiagram, toelichting macro-analyses

- Fileduur op een aantal locaties langs de weg (horizontale lijnen),
- filelengte op een aantal tijdstippen (verticale lijnen), of filezwaarte (gehele rode oppervlakte).

De 'tijd in file' (met het verkeer meebewegend) te bepalen door de trajectoriën te volgen; echte en fictieve trajectoriën (wiskundige integratie van het snelheidsveld).

## 6. Laboratoriumtests, modelmatige analyses

Verkeersmodellen kunnen bijdragen aan een beter inzicht in de effecten en in de potentiële effecten. Microsimulatiemodellen bevatten algoritmes voor het beschrijven van het individuele gedrag. Deze kunnen ingezet worden om gecontroleerd en reproduceerbaar aan enkele 'knoppen' te draaien en het meso- en macroscopische effect te bepalen (gedrags'knoppen', penetratiegraad verhogen etc.). Dit met het nodige beleid en kennis van de zeggingskracht van de modellen. C-ITS is immers nieuw terrein, en met name voor het modelleren van de C-ITS-gedragsmechanismen moet goede afstemming plaatsvinden met praktijkmetingen en laboratoriumonderzoek. Schakelen tussen ex-ante- en ex-post-onderzoek, zoals de Evaluatiecirkel [1] het noemt. Tot slot noemen we een hybride toepassing waar de presentatie-/rapportageschil van een verkeersmodel gebruikt wordt om de gemeten voertuigen geordend te presenteren, eventueel met het overige verkeer 'bijgesimuleerd' volgens de algoritmieken van het simulatiepakket.

## 7. Conclusies

In deze paper zijn gedachten en inzichten genoemd, die mede invulling geven aan het brede onderzoek dat rond C-ITS en automatisch rijden plaatsvindt. Veel werk is er nog te doen: uitwerken en definiëren van standaarden voor indicatoren, methodieken verder uitwerken, onderzoeken opzetten en de analyses doen.

## Referenties

1. *NM Magazine, 2016 nr. 2, p 9, de ontwikkeling van Connected ITS, Paul van Beek, Suzanne van Lieshout, Kerry Malone e.a., 2016*
2. *SAE J3016, Levels of driving automation for on road vehicles, J3016, 2014*
3. *FESTA Handbook version 5: [http://wiki.fot-net.eu/index.php/FESTA\\_Handbook](http://wiki.fot-net.eu/index.php/FESTA_Handbook), 2014*
4. *Leidraad evaluaties benutting, Rijkswaterstaat, 2011.*
5. *Nationaal VerkeerskundeCongres 2015, De invloed van Adaptive Cruise Control op het verkeer, Mark Gorter en Peter Morsink, , 5 november2015*
6. *Rijtaakindicatoren voor C-ITS-projecten, een verkenning naar een eenvoudig toe te passen set rijtaakindicatoren voor doorstroming en veiligheid, DITCM Innovations, februari 2016.*
7. *SAE J2944, Operational definitions of driving performance measures and statistics, Paul Green, 2014,*