TVW

Tijdschrift Vervoerswetenschap
Jaargang 51, nummer 1
Februari 2015
Pagina 3-16
ISSN: 1571-9227
www.vervoerswetenschap.nl

Betrouwbaarheid van reistijden in het LMS/NRM

Marco Kouwenhoven

Significance[1]

Marcel Mulder

Rijkswaterstaat-WVL [2]

Henk van Mourik

Ministerie van Infrastructuur en Milieu [3]

In dit onderzoek hebben we een indicator voor betrouwbaarheid gedefinieerd aan de hand van de standaardafwijking van de verdeling van reistijden. Bij deze indicator wordt gecorrigeerd voor de reistijdverwachting door reizigers en worden extreem lange reistijden uitgesloten. Op basis van een database met waargenomen reistijden op snelwegen en het onderliggende wegennet, hebben we een relatie gevonden tussen deze indicator en de gemiddelde reistijdvertraging. De beste functionele vorm voor deze relatie is een combinatie van een lineaire en logaritmische term. Deze vorm werkt beter dan andere vormen die in de literatuur beschreven staan.

Deze relatie is ingebouwd in een post-processing module voor het LMS en NRM. Op basis van de reistijden en vertragingen die deze modellen berekenen, kan de module een prognose geven voor de betrouwbaarheid van de reistijden voor diverse scenario's. De betrouwbaarheidsbaten zijn hierdoor niet langer een vast percentage van de reistijdbaten, maar kunnen per project verschillend zijn, afhankelijk van de aard van het project. Een eerste test laat zien dat dit percentage gemiddeld iets hoger ligt dan de standaardvuistregel van 25% die nu vaak gehanteerd wordt.

Trefwoorden: betrouwbaarheid, reistijdverwachting , robuustheid, verkeersmodellen

[1] kouwenhoven@significance.nl

[2] marcel.mulder@rws.nl

[3] henk.van.mourik@minienm.nl

1. Inleiding

In de Nota Mobiliteit uit 2004 introduceerde het Ministerie van Infrastructuur en Milieu een betrouwbare en voorspelbare reistijd als beleidsdoel (Ministerie V&W & VROM, 2004). Hiertoe was het nodig om verkeersmodellen, zoals het LMS en het NRM, uit te breiden met een extra indicator. Niet alleen verkeersintensiteiten, reistijden en congestie moesten als output geleverd kunnen worden, maar ook de betrouwbaarheid van de reistijden. Hiertoe werd een rekenmodule ("LMS-BT") ontwikkeld die gebaseerd werd op toenmalige inzichten in de relatie tussen betrouwbaarheid en andere kenmerken van een reis (Kouwenhoven et al. 2005). Echter, de uitkomsten van de rekenmodule werden door gebruikers als onrealistisch hoog beoordeeld.

Inmiddels is er veel meer onderzoek op dit gebied verricht, zowel in Nederland als internationaal. Tegenwoordig wordt betrouwbaarheid op een andere manier gedefinieerd dan in 2004. Destijds werd het percentage verplaatsingen dat "op tijd" was gehanteerd, tegenwoordig wordt de standaardafwijking van de reistijdverdeling gebruikt. Aansluitend op deze andere definitie heeft het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) onlangs een studie gepubliceerd waarin de waardering van reistijd en betrouwbaarheid is bepaald (KiM 2013, Kouwenhoven et al. 2014, zie ook het artikel over "De waarde van betrouwbare reistijden in personenverkeer en –vervoer in Nederland" in dit tijdschrift). Dit alles maakt het noodzakelijk om de LMS-BT rekenmodule te actualiseren en ervoor te zorgen dat deze weer helemaal overeenkomt met de meest recente inzichten. Deze nieuwe rekenmodule moet het mogelijk maken om in MKBA's de betrouwbaarheidsbaten van (infrastructuur-)maatregelen te bepalen. Deze worden nu via een standaardopslag van 25% op de reistijdbaten meegenomen (CPB, 2004). De nieuwe module moet het ook mogelijk maken om de effecten op betrouwbaarheid van verschillende varianten in een project te onderscheiden zodat deze meegenomen kunnen worden in het afweegkader.

Hiertoe is een nieuwe module ("LMS-BT2") ontwikkeld door Significance in opdracht van Rijkswaterstaat WVL. De basis van de module wordt gevormd door (nieuwe) relaties tussen deur-tot-deur betrouwbaarheid van reistijden en enkele kenmerken van een reis (gemiddelde snelheid, vertraging door files, afstand, hoeveelheid verkeer). Deze relaties zijn ingebouwd in een extra module voor de bestaande verkeersmodellen. Uit de prognoses voor gemiddelde reistijd, vertraging, etc. wordt vervolgens een prognose voor de reistijdbetrouwbaarheid berekend. Dit is gebeurd voor snelwegen (zoals ook al in de oude LMS-BT module gebeurde). Echter, er is ook een eerste, beperkte verkenning gedaan van betrouwbaarheid op niet-autosnelwegen.

2. Methodologie

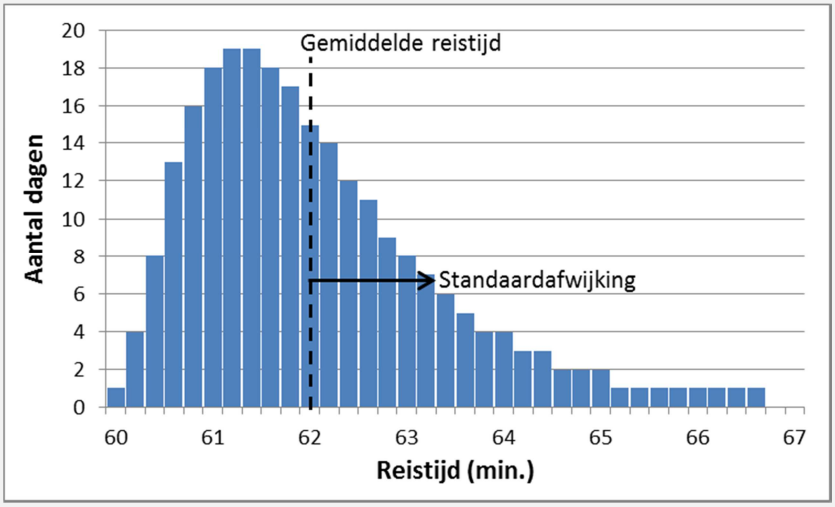
Het LMS en het NRM geven een prognose voor de gemiddelde reistijd voor iedere reiziger op een gemiddelde werkdag (afhankelijk van herkomst, bestemming en periode van de dag). Deze gemiddelde reistijd bevat eventuele vertragingen als gevolg van files. Om een prognose te geven voor de betrouwbaarheid van reistijden willen we een (empirische) relatie gebruiken tussen betrouwbaarheid en variabelen die in het LMS/NRM beschikbaar zijn, zoals free-flow reistijd, intensiteit, routelengte etc. Om een dergelijke relatie te bepalen is een database met waargenomen niveaus van betrouwbaarheid nodig, evenals een database met alle andere variabelen. Deze database wordt beschreven in Hoofdstuk 3.

Bij het samenstellen van een dergelijke database moet een aantal keuzes worden gemaakt, die een belangrijke invloed hebben op het resultaat. Deze keuzes worden vaak alleen impliciet beschreven in de literatuur, maar in dit verhaal willen we ze expliciet beschrijven.

1. We gebruiken de "standaardafwijking van de reistijdverdeling" als onze betrouwbaarheids-indicator, of beter gezegd onze onbetrouwbaarheidsindicator[4].

Stel, iemand reist elke dag van zijn huis naar zijn werk. Hij vertrekt altijd op hetzelfde moment en doet er elke dag precies 60 minuten over de reis. Dan is zijn reistijd perfect betrouwbaar en de onbetrouwbaarheidsindicator is 0 minuten.

Echter, wanneer deze reistijd van dag tot dag varieert tussen 60 en 67 minuten, dan is zijn reistijd niet helemaal betrouwbaar. Wanneer we in een diagram aangeven hoe vaak elke reistijd voorkomt in een jaar, dan krijgen we bijvoorbeeld de verdeling uit figuur 1.



Figuur 1: Voorbeeld van een reistijdverdeling (1)

Gemiddeld is de reistijd 62 minuten: 60 minuten voor free-flow omstandigheden en (gemiddeld) 2 minuten voor vertraging. De mate waarin de reistijd varieert wordt aangegeven met de "standaardafwijking", die een maat is voor de breedte van de verdeling van de reistijden. Dit noemen we onbetrouwbaarheid. In dit voorbeeld is de standaardafwijking (en dus de onbetrouwbaarheid) 1,3 minuten. Voorafgaand aan een reis weet je dus nooit precies de reistijd: je weet alleen dat de reis ongeveer 62 minuten gaat duren, met een onbetrouwbaarheid van 1,3 minuten.

Dit is de definitie die het Ministerie ook hanteert en ook internationaal veel gebruikt wordt (RAND Europe, 2004; Hamer et al., 2005; HEATCO, 2006). Het voordeel van deze indicator is dat het een intuïtieve definitie is die gemakkelijk te begrijpen is. Daarnaast wordt het inbouwen van betrouwbaarheid in transportmodellen erg lastig als gecompliceerdere definities gebruikt worden. Het nadeel van deze indicator is wel dat er geen rekening gehouden wordt met de scheefheid van de reistijdverdeling en dat juist de staart van de verdeling belangrijk is voor betrouwbaarheid (zie o.a. van Lint et al. 2008).

[4] Hoe groter de standaardafwijking, hoe minder betrouwbaar de reistijd, dus hoe lager de betrouwbaarheid. Als de standaardafwijking als indicator wordt gehanteerd is het handiger om te spreken van een onbetrouwbaarheidsindicator: hoe groter de indicator, hoe groter de onbetrouwbaarheid.

Het is gebruikelijk om een reistijdverdeling te maken door de gemiddelde reistijd te meten op een aantal (werk-)dagen in bijvoorbeeld een jaar wanneer je steeds op hetzelfde moment vertrekt (bijv. elke dag tussen 08:00 en 08:15). Betrouwbaarheid is daarmee gekoppeld aan de dag-tot-dag variabiliteit van reistijden. In dit onderzoek hebben we gekeken naar de gemiddelde reistijd op alle werkdagen in 2012 voor voertuigen die steeds in hetzelfde kwartier zijn vertrokken. Dat betekent dat we voor elk kwartier een andere reistijdverdeling hebben en dus een andere waarde van de onbetrouwbaarheidsindicator.

Let op dat we door steeds de gemiddelde reistijd over een periode van een kwartier te nemen, we voertuig-tot-voertuig variatie van reistijden niet meenemen in onze definitie van de onbetrouwbaarheidsindicator. Deels is dit logisch: een deel van de voertuig-tot-voertuig variatie wordt veroorzaakt door verschillen in rijgedrag tussen personen. Maar voor een deel sluiten we hiermee ook variatie uit die door de infrastructuur wordt veroorzaakt. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het iets later vertrekken, waardoor je net voor een rood stoplicht moet stoppen en daardoor een minuut vertraging krijgt. Echter, in dit project is dit soort variatie dus uitgesloten van de indicator.

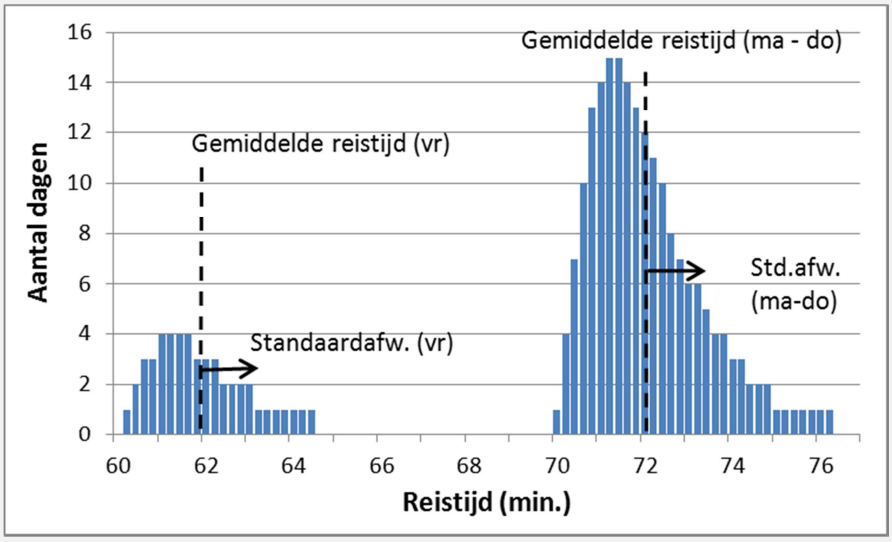
2. Het LMS/NRM geeft prognoses voor reistijden en intensiteiten voor een gemiddeld uur tijdens de ochtendspits (die loopt van 07:00 tot 09:00), tijdens de avondspits (16:00 tot 18:00) en tijdens de restdag (10:00 tot 15:00, met een aparte ophoogfactoren om ook het verkeer tijdens de overige uren van de dag mee te kunnen tellen). In ons project hebben we de gemiddelde waarde van de onbetrouwbaarheidsindicator uitgerekend voor alle kwartieren die in deze drie dagperiodes vallen, en vervolgens per periode gemiddeld (dus 8 kwartieren voor elke spits, en twintig kwartieren voor de restdag).

   Let op dat dit anders is dan het eerst uitrekenen van de gemiddelde reistijd over bijv. de gehele ochtendspits voor elke dag van het jaar en daarna hiervan een verdeling te maken en de standaardafwijking te bepalen. Reistijden zijn niet constant over een spits, en deze variatie moet meegenomen worden in de onbetrouwbaarheidsindicator. Daarom is het van belang om eerst de standaardafwijking te bepalen voor een korte periode (15 minuten of korter, afhankelijk van de tijdsduur waarover de gemiddelde reistijd als min of meer constant kan worden verondersteld) en pas in de laatste stap het gemiddelde te nemen over een dagdeel.

3. In het beleid van het Ministerie wordt betrouwbaarheid gezien vanuit het gezichtspunt van de reiziger, dus in termen van de voorspelbaarheid van zijn reistijd. Daarom moet betrouwbaarheid ook gedefinieerd worden in termen van de afwijking van de werkelijke reistijd ten opzichte van de verwachte reistijd. Dus we moeten niet kijken naar de pure dag-tot-dag variatie van de reistijden, maar hierbij corrigeren voor de variatie in de verwachte reistijd.

Stel dat op deze route (met een free-flow reistijd van 60 minuten) op elke maandag, dinsdag, woensdag en donderdag een file is waardoor er precies 10 minuten vertraging ontstaat. Op deze dagen duurt de reis altijd exact 70 minuten, terwijl deze op vrijdagen gewoon 60 minuten blijft. De reistijd varieert weliswaar in dit voorbeeld, maar hij is nog steeds perfect voorspelbaar. De reistijd is perfect betrouwbaar.

Stel nu dat de reistijden op alle dagen variëren: op maandag tot en met donderdag tussen 70 en 77 minuten en op vrijdag tussen 60 en 65 minuten, beiden met dezelfde vorm van de verdeling. De reistijdverdeling ziet er nu als volgt uit:



Figuur 2: Voorbeeld van een reistijdverdeling (2)

De gemiddelde reistijd over alle dagen van de week is 70 minuten. De verwachte (= gemiddelde) vertraging is dus 10 minuten. De standaardafwijking voor elke dag van de week is nog steeds 1,3 minuten. Dus de totale onbetrouwbaarheid over de hele week blijft 1,3 minuten.

4. Extreem lange reistijden hebben een sterke invloed op de standaardafwijking. Deze lange reistijden kunnen veroorzaakt worden door fouten in de detector, maar ze kunnen ook in het echt optreden (bijvoorbeeld als gevolg van een zwaar ongeval, of van extreem slecht weer). Moeten dit soort reistijden wel of niet meegenomen worden in de berekening van de standaardafwijking? Om deze vraag te beantwoorden is het van belang om te begrijpen hoe de resultaten gebruikt gaan worden. De speed-flow curves die in het LMS/NRM zijn ingebouwd bevatten geen extreme gebeurtenissen. En ook de waardering van betrouwbaarheid uit het KiM onderzoek is gebaseerd op reistijdverdelingen zonder extremen. Ten slotte geloven we dat deze bijzondere reistijden andere oorzaken hebben dan de gewone dag-tot-dag variatie. Om deze redenen hebben we besloten deze extreme reistijden uit te sluiten van de analyse. Verderop in dit verhaal zullen we laten zien wat de consequentie is van deze beslissing.

   Een voordeel van deze benadering is ook dat er een scheiding gemaakt kan worden tussen betrouwbaarheid en robuustheid. Betrouwbaarheid is de normale of reguliere dag-tot-dag variatie van reistijden, en robuustheid is een kenmerk dat aangeeft hoe het netwerk omgaat

met grote verstoringen, oftewel, het aantal en de omvang van de extreem lange reistijden zijn een indicator voor de robuustheid of kwetsbaarheid van het netwerk. In dit onderzoek is wel gekeken of er een relatie gevonden kon worden tussen de bijdrage die de extreem lange reistijden geven aan de standaardafwijking van de reistijdverdeling en de trajectkenmerken zoals reistijdvertraging, lengte en aantal rijstroken, maar dat heeft niet geleid tot een nauwkeurige functie. Andere benaderingen om robuustheid van netwerken te onderzoeken, zoals het bepalen van het effect van een blokkade van een individuele link in een netwerk, werken daarvoor beter (o.a. Knoop et al. 2007).

3. Data

Het grootste deel van het Nederlandse snelwegennet is uitgerust met lusdetectoren die het aantal passerende voertuigen en gemiddelde snelheid meten. Gemiddelde waardes hiervan per kwartier waren beschikbaar voor dit project. We hebben 250 snelwegtrajecten gedefinieerd variërend van 2 tot 225 kilometer. Daarnaast hebben we ook 40 trajecten op het onderliggende wegennet geanalyseerd (2 tot 14 kilometer) waarbij met videocamera's met nummerbordherkenning reistijden konden worden gemeten.

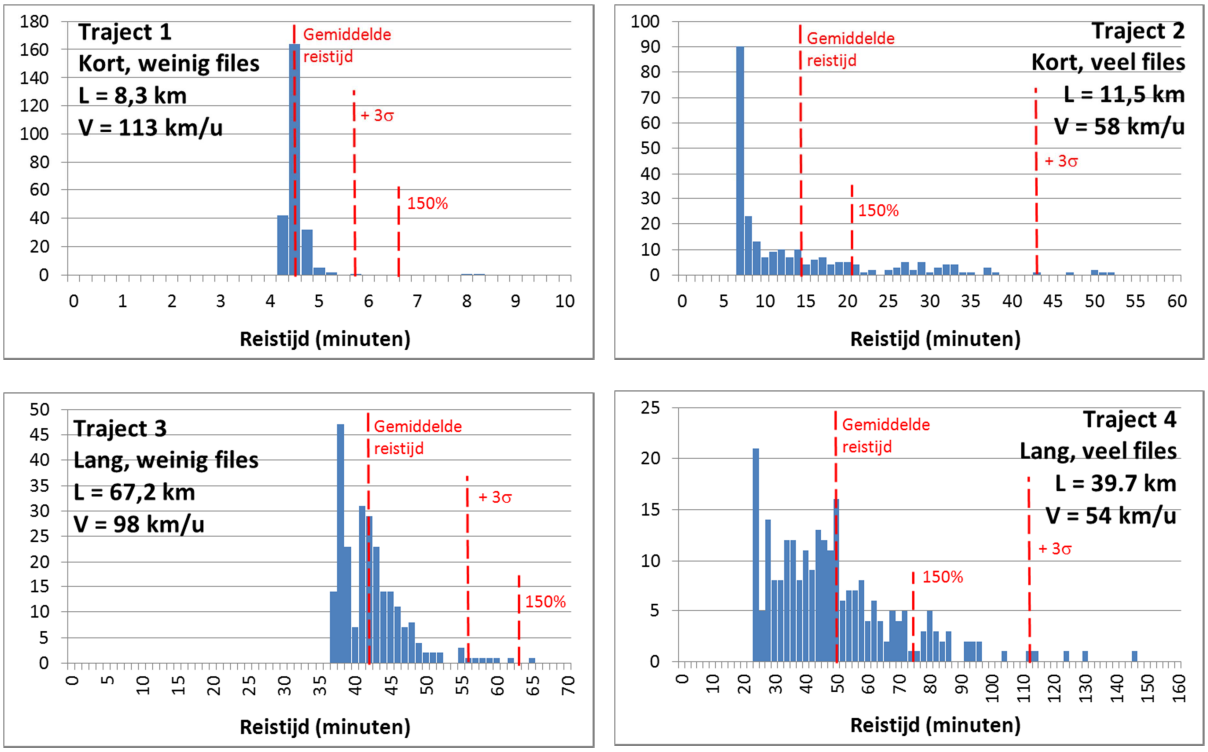
Stap 1: bepaling van de ruwe reistijden

De gemeten gemiddelde snelheid per lusdetector is omgezet naar een gemiddelde reistijd tussen twee detectoren. Door optelling konden de reistijden voor een volledig traject worden bepaald.[5] Hierbij werd rekening gehouden met het feit dat een voertuig op een lang traject niet alle detectoren in hetzelfde kwartier passeert. Bij de trajecten op het onderliggende wegennet konden de reistijden direct worden afgeleid uit de tijdstippen van passage van individuele voertuigen bij de camera's aan het begin en het einde van het traject.

Stap 2: uitsluiting van extreme reistijden

Zoals hiervoor al uitgelegd, hebben we besloten om extreme reistijden uit te sluiten. Het is echter niet meteen duidelijk waar de grens voor een extreme reistijd ligt. Hiervoor hebben we de reistijdverdelingen van alle trajecten bestudeerd. Dit illustreren we aan de hand van vier verschillende trajecten: twee korte en twee langere trajecten, waarvan steeds één met weinig files (dus een hoge gemiddelde snelheid) en één met veel files (en dus een lage gemiddelde snelheid). Deze trajecten hebben verschillende typische reistijdverdelingen, zie Figuur 3.

[5] Reistijden zijn gecorreleerd tussen opeenvolgende lusdetectoren. Dus de standaardafwijking van de reistijd op een lang traject kan niet (makkelijk) bepaald worden uit de standaardafwijkingen van de afzonderlijke linkreistijden.



Figuur 3: Reistijdverdeling voor 4 werkelijke trajecten. Voor elk traject is de gemiddelde snelheid aangegeven, evenals het punt "+3σ" (= de gemiddelde reistijd plus drie maal de standaardafwijking van de verdeling) en het punt "150%" (= 150% van de gemiddelde reistijd). De trajecten zijn:
Traject 1: A16 tussen oprit 17 (Breda-Noord) en afrit 14 (Hazeldonk 6000-7000)
Traject 2: A15 tussen oprit 28 (Arkel) en afrit 25 (Sliedrecht-Oost)
Traject 3: van A1 oprit 10 (Soest) via knooppunt Hoevelaken naar A28 afrit 23 (Staphorst)
Traject 4: van A9 oprit 12 (Alkmaar) via Holendrecht naar A2 (knooppunt Everdingen)

Allereerst valt op dat de verdelingen in het algemeen niet zo geleidelijk verlopen als in de voorbeelden uit het begin van dit artikel. Verder hebben de twee trajecten met weinig files relatief smalle verdelingen, terwijl de trajecten met veel files erg breed zijn en lange staarten hebben. Ook zijn enkele extreme reistijden zichtbaar. Echter, het is de vraag wat een goed criterium is om de extreme te onderscheiden van de normale reistijden. Gevoelsmatig moeten extreme reistijden hooguit een paar keer per jaar voorkomen (anders zijn ze niet extreem). Het moeten reistijden zijn die duidelijk buiten de normale staart van de reistijdverdeling vallen. Bij trajecten met weinig files ligt het 3σ-punt relatief dicht bij de gemiddelde reistijd, en visueel vaak nog in de normale staart van de reistijdverdeling. Het 150%-punt (= 1,5 keer het gemiddelde) vormt een veel beter onderscheid tussen de gewone en de extreme reistijden. Bij trajecten met veel filevorming is dat precies andersom.

Op basis hiervan is besloten om binnen deze studie een extreme reistijd te definiëren als een reistijd die groter is dan anderhalf keer de gemiddelde reistijd, en die tevens meer dan drie keer de standaardafwijking hoger ligt dan de gemiddelde reistijd. Het blijkt dat deze extremen gemiddeld vier keer per jaar voorkomen. De standaardafwijking van de reistijdverdeling zonder deze extreme reistijden (=reguliere onbetrouwbaarheid) is gemiddeld 29% lager dan de standaardafwijking van de reistijdverdeling met deze extremen (= totale onbetrouwbaarheid). Met andere woorden: de extreme reistijden zijn verantwoordelijk voor bijna een derde deel van de totale onbetrouwbaarheid.

Stap 3: correctie voor reistijdverwachting

Zoals eerder gezegd willen we de afwijking tussen de werkelijke reistijd en de verwachte reistijd bepalen. Omdat er weinig bekend is over welke reistijd automobilisten verwachten, hebben we in dit onderzoek als benadering het gemiddelde van de reistijden op dezelfde dag van de week in de vier voorafgaande weken en de vier daaropvolgende weken als reistijdverwachting gebruikt. Bijvoorbeeld, de reistijdverwachting voor woensdag 20 juni is het gemiddelde van de reistijden op woensdag 23 en 30 mei, woensdag 6, 13, 27 juni en woensdag 4, 11 en 18 juli. Als de reistijd op een van deze dagen als "extreem" geclassificeerd is, dan wordt deze niet meegenomen. Voor vakantieperiodes (wanneer er nauwelijks files zijn), wordt een gemiddelde over de vier dagen direct voor en na elke dag genomen. Als gevolg van deze correctie daalt de standaardafwijking met een extra 12% bovenop de 29% uit de vorige stap.

Stap 4: berekening van de onbetrouwbaarheidsindicator

Voor elke route, voor elke werkdag van het jaar, voor elk kwartier berekenen we de afwijking van de reistijd ten opzichte van de verwachte reistijd. Daarna berekenen we voor elke route, voor elk kwartier de standaardafwijking van de afwijkingen over alle werkdagen (waarbij de extreme reistijden reeds uitgesloten zijn). Voor elke periode van de dag (ochtendspits, avondspits, restdag) is de gemiddelde reistijd en de gemiddelde standaardafwijking berekend waarbij het gemiddelde wordt genomen over de relevante kwartieren en waarbij gewogen wordt met het (gemiddelde) verkeersvolume in dat kwartier.

4. Relatie tussen onbetrouwbaarheid en vertraging

In verkeersmodellen zoals het LMS en het NRM wordt voor elke reiziger een reistijd voor een gemiddelde werkdag berekend. Dit is dus inclusief een verwachte vertraging als gevolg van files. Om in deze modellen ook een onbetrouwbaarheidsindicator te kunnen berekenen, hebben wij relaties geschat tussen deze indicator aan de ene kant en variabelen die in het LMS/NRM beschikbaar zijn (reistijd, free-flow reistijd, reistijdvertraging, lengte traject, intensiteit, capaciteit, I/C verhouding, voertuigverliesuren) aan de andere kant. Middels deze relaties kunnen dan met de extra module voor het LMS/NRM ook indicatoren voor onbetrouwbaarheid worden bepaald.

Deze relaties zijn apart bepaald voor de ochtendspits (7 – 9 uur), avondspits (16 – 18 uur) en restdag. Hierbij zijn aparte relaties bepaald voor autosnelwegen en overige wegen. Voor elke periode van de dag en voor elk type weg is gekeken of de indicator gecorreleerd is met de waarde van andere variaben die in het LMS/NRM aanwezig zijn.

4.1 Autosnelwegen

Uit de literatuur is bekend dat er een sterke relatie bestaat tussen (reguliere) onbetrouwbaarheid en reistijdvertraging. Dat bleek ook voor de 250 snelwegtrajecten te gelden. Diverse relaties uit de literatuur zijn getest. Hellinga (2011) suggereerde een lineaire relatie tussen de standaardafwijking en de gemiddelde reistijd. Deze relatie bestaat inderdaad, maar verklaart niet alle variatie in de onbetrouwbaarheidsindicator tussen verschillende (snel)wegen. In de Verenigde Staten wordt in het kader van het Strategic Highway Research Program (SHRP-2, zie Mahmassani 2011) een relatie tussen de standaarddeviatie *per kilometer* en de gemiddelde reistijd *per kilometer* gehanteerd. De adjusted R^2 voor deze relatie is iets beter dan die voor de relatie van Hellinga, maar nog steeds is er veel onverklaarde variatie. Het toevoegen van kwadratische en kubische termen zoals gedaan wordt door Mott MacDonald (2009) in het Verenigd Koninkrijk

helpt weinig. Het werkt aanmerkelijk beter om een polynomische relatie te leggen tussen de standaardafwijking en de gemiddelde reistijd*vertraging* (i.e. het verschil tussen de gemiddelde reistijd en de free-flow reistijd), zoals Peer (2012) gedaan heeft voor een Nederlandse situatie. Het beste resultaat (in termen van adjusted R^2) krijgen we echter als we combinatie van een lineare en logaritmische vertragingsterm gebruiken in combinatie met een lineaire term met de lengte van het traject, hetgeen nog niet eerder in de literatuur gedaan is. De uiteindelijk gefitte functie is:

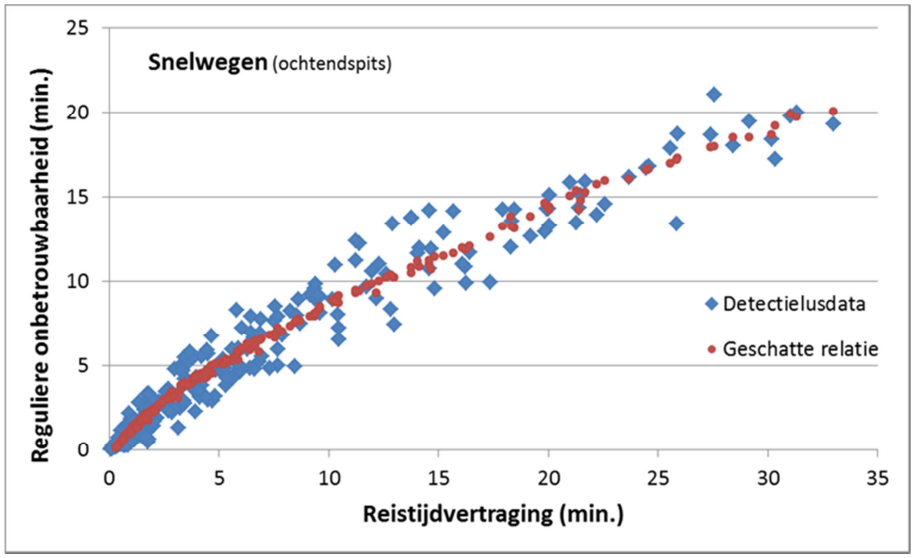
$$\sigma = \alpha \cdot RTV + \beta \cdot \log(RTV + 1) + \gamma \cdot L + C \quad (1)$$

waarbij σ de onbetrouwbaarheidsindicator is (i.e. de standaardafwijking), RTV de reistijdvertraging is (i.e. het verschil tussen gemiddelde reistijd en free-flow reistijd), en L de lengte van het traject. De fitparameters α, β, γ en C zijn bepaald middels een regressieanalyse. De parameters die significant zijn, staan in Tabel 1. In deze tabel is te zien dat de waardes van de parameters verschillen per periode van de dag. De tabel toont ook de Adjusted R^2 van de modelschatting. Die zit voor alle dagdelen ruim boven de 0,9, hetgeen aangeeft dat het een hele goede schatting is. Dit kan ook bekeken worden in Figuur 4. De blauwe punten in de figuur zijn de onbetrouwbaarheid en de reistijdvertraging op snelwegen voor de ochtendspits zoals werkelijk gemeten op basis van de detectielusdata. De rode punten zijn de berekende waardes voor de onbetrouwbaarheid met behulp van de geschatte relatie (let op: deze punten liggen niet perfect op een rechte lijn, aangezien elk traject een andere lengte heeft en dus een andere lengte-afhankelijke term in bovenstaande formule). Te zien is dat de rode punten een goede benadering van de blauwe punten zijn.

Tabel 1: Coëfficiënten voor de onbetrouwbaarheidsfunctie voor autosnelwegen per periode van de dag

	Ochtendspits			**Restdag**			**Avondspits**			*Eenheid*
Coëff.	**Coëfficiënt**		**(t-ratio)**	**Coëfficiënt**		**(t-ratio)**	**Coëfficiënt**		**(t-ratio)**	*coëff*
α	0.476	± 0.026	(18.2)	0.764	± 0.030	(25.7)	0.268	± 0.017	(16.1)	
β	4.538	± 0.415	(10.9)	0			5.555	± 0.351	(15.8)	*min.*
γ	-0.009	± 0.003	(-2.7)	-0.010	± 0.003	(-3.9)	0.011	± 0.003	(4.0)	*min./km*
C	-0.540	± 0.186	(-2.9)	0			-0.901	± 0.172	(-5.3)	*min.*
Adj. R^2	0.956			0.926			0.960			

Noot: de t-ratio is de verhouding tussen de waarde van de coëfficiënt en de onnauwkeurigheid van de coëfficiënt. Een coëfficiënt is significant verschillend van nul (met 95% zekerheid) als de waarde van de t-ratio groter is dan 1.96 of kleiner dan -1.96. Voor de restdag zijn geen significante waarden voor β en C gevonden en daarom zijn deze gelijk aan nul gesteld.



Figuur 4: Reguliere onbetrouwbaarheid als functie van de reistijdvertraging op snelwegen

4.2 *Overige wegen*

Voor de onbetrouwbaarheid op overige wegen (= niet-autosnelwegen) hebben we ook een relatie kunnen bepalen. Echter, aangezien er meer verschil zit in het type wegen buiten het autosnelwegennetwerk en we maar naar 40 trajecten hebben gekeken, is de spreiding van de waargenomen onbetrouwbaarheid groot en is de gevonden relatie minder nauwkeurig dan voor autosnelwegen Daarom hebben we alleen een significante correlatie kunnen vinden met een lineaire reistijdvertragingsterm en niet met andere termen. De beste functie (op basis van de adjusted R^2) wordt dan:

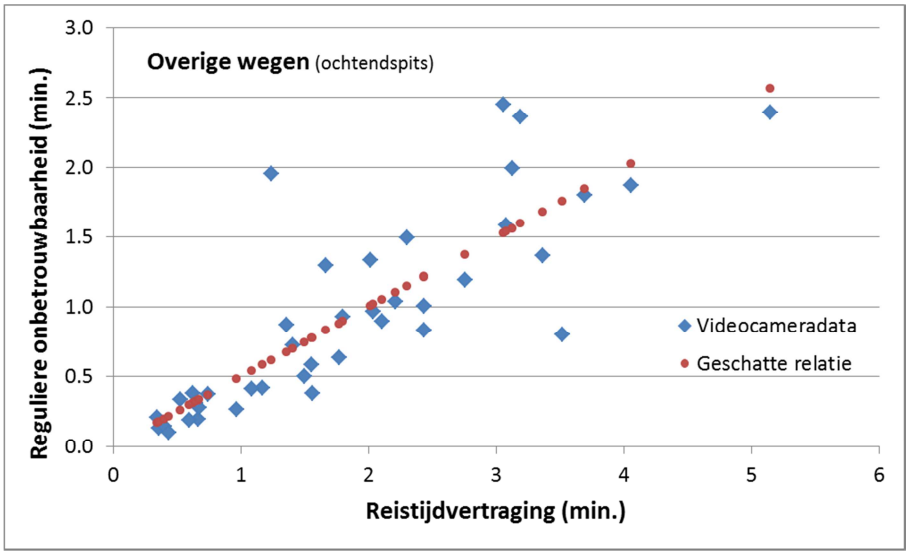
$$\sigma = \alpha \cdot RTV + C \tag{2}$$

waarbij σ de onbetrouwbaarheidsindicator is (i.e. de standaardafwijking) en RTV de reistijdvertraging is. De fitparameters α en C verschillen per periode van de dag, zie Tabel 2.

Tabel 2: Coëfficiënten voor de onbetrouwbaarheidsfunctie voor overige wegen per periode van de dag

	Ochtendspits			**Restdag**			**Avondspits**			*Eenheid coëff.*
Coëff.	**Coëfficiënt**		**(t-ratio)**	**Coëfficiënt**		**(t-ratio)**	**Coëfficiënt**		**(t-ratio)**	
α	0.499	± 0.052	(9.3)	0.626	± 0.042	(15.5)	0.346	± 0.030	(11.7)	
C							-0.153	± 0.076	(-2.0)	*min.*
Adj. R^2	0.688			0.859			0.777			

Figuur 5 toont de reguliere onbetrouwbaarheid en de reistijdvertraging op overige wegen voor de ochtendspits. De blauwe punten zijn de waarnemingen op basis van de videocameradata met nummerbordherkenning, de rode punten zijn de berekende waardes met behulp van de geschatte relatie. De rode punten zijn een goede benadering van de blauwe punten, maar gezien het beperkte aantal punten is deze functie minder precies dan die voor autosnelwegen. Dit is ook te zien aan de Adjusted R^2 in Tabel 2, die lager zijn dan in Tabel 1.



Figuur 5: Reguliere onbetrouwbaarheid als functie van de reistijdvertraging op overige wegen

5. Het nieuwe rekeninstrument: LMS-BT2

Er is een nieuwe rekenmodule gebouwd die gebruikt kan worden na een standaard LMS of NRM run. De module berekent de betrouwbaarheid voor een scenario dat met LMS of NRM is doorgerekend. Dit gebeurt door op elke herkomst-bestemmingsrelatie (HB), voor elke route die in een van de iteraties wordt gekozen, de onbetrouwbaarheidsindicator voor dat traject te berekenen. Het LMS/NRM berekent reeds de lengte van het traject (i.e. de gekozen route) en de reistijdvertraging middels een speed-flow curve (waarbij het verkeersvolume (= flow) op elke link bepaald wordt door optelling van het verkeer over alle HB-relaties dat gebruik maakt van de betreffende link). Met behulp van formule (1) en (2) wordt vervolgens de onbetrouwbaarheid berekend. Wanneer trajecten zowel over autosnelwegen als over niet-autosnelwegen gaan, wordt de onbetrouwbaarheidsindicator voor beide wegtypes apart berekend en vervolgens kwadratisch bij elkaar opgeteld. Impliciet zit hier de gedachte achter dat reistijdvertragingen op autosnelwegen en overige wegen niet gecorreleerd zijn. Een beperkte analyse heeft laten zien dat deze correlatie in ieder geval niet groot is, dus daarmee is dit een redelijke aanname.

Vervolgens wordt de totale onbetrouwbaarheid berekend door de indicatoren voor alle trajecten afzonderlijk bij elkaar op te tellen, gewogen met het verkeersvolume op de betreffende HB-relatie. De indicatoren worden berekend voor elk dagdeel, en kunnen worden opgeteld tot een etmaaltotaal.

We hebben LMS-BT2 gedraaid na een standaard LMS-run voor het basisjaar 2004. Voor dit basisjaar geldt dat er in één uur ochtendspits ongeveer 48.400 uur onbetrouwbaarheid ontstaat. Dit bestaat voor 60% uit onbetrouwbaarheid op snelwegen en voor 40% uit onbetrouwbaarheid op overige wegen. Dezelfde LMS-run berekent dat er in één uur ochtendspits ca. 77.000 uur reistijdvertraging ontstaat, dus is de verhouding tussen de onbetrouwbaarheid en de vertraging 63%.

Deze omvang kan niet direct vergeleken worden met de omvang van onbetrouwbaarheid uit de KiM Mobiliteitsbalans (KiM 2012), aangezien die berekening wordt uitgevoerd inclusief extreme reistijden. Een aparte berekening heeft laten zien dat wanneer wij deze extreme reistijden ook meenemen in de onbetrouwbaarheid, de totale onbetrouwbaarheid op snelwegen in het LMS-basisjaar is van vergelijkbare orde grootte als de onbetrouwbaarheid die berekend wordt in de Mobiliteitsbalans.

Als volgende test hebben we de betrouwbaarheidseffecten van een tweetal (versimpelde) projecten doorgerekend: de verbreding van de snelweg A2 tussen Utrecht en Abcoude (zonder aanpassing van de parallelstructuur en zonder verandering van de maximumsnelheid) en het doortrekken van de A4 tussen Delft en Schiedam. De resultaten voor een etmaal staan in Tabel 3. Deze tabel bevat ook de monetaire waardering van zowel de reistijdeffecten als de betrouwbaarheidseffecten. Deze cijfers zijn gebaseerd op de kentallen voor de waardering van reistijd en onbetrouwbaarheid zoals bepaald in het recentelijk uitgevoerde waarderingsonderzoek in opdracht van het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM 2013, Kouwenhoven et al. 2014). Voor de auto is de waardering van een reistijdverandering € 9,00 per persoon per uur (prijspeil 2010, gewogen gemiddeld over alle reismotieven voor personenvervoer) en de waardering van onbetrouwbaarheid (dus van de standaardafwijking) € 5,75 per uur.

Tabel 3: Resultaten van de twee projecten die zijn doorgerekend voor een gemiddelde werkdag

	Effect verbreding A2	**Effect doortrekken A4**
	Snelweg *Overige wegen* **Totaal**	*Snelweg* *Overige wegen* **Totaal**
Omvang reistijdvertraging (uur)	*-9428* *+1871* -7559	*-2862* *-8840* -11.702
Onbetrouwbaarheid (uur)	*-6632* *+677* -5958	*-1710* *-4035* -5745
Ratio omvang onbetrouwbaarheid / vertraging.	*70%* *36%* 79%	*60%* *46%* 49%
Waardering reistijdverandering[6]	*€ -820.062* *€ 47.945* € -346.117	*€ -42.820* *€ -1.445.867* € -1.488.687
Waardering verandering onbetrouwbaarheid[6]	*€ -115.700* *€ 23.290* € -92.411	*€ 197,243* *€ -363,461* € -560.704
Ratio waardering onbetr. / reistijdverandering	27%	38%

Voor beide projecten geldt dat de door het LMS/NRM berekende omvang (in uren) van de verandering van de onbetrouwbaarheid een vergelijkbare verhouding tot de verandering van de reistijdvertraging heeft (respectievelijk 79% en 49%) als gevonden is in de referentie run voor de totale omvang van onbetrouwbaarheid en reistijdvertraging (63%). Ook de verhouding tussen de baten van de betrouwbaarheid en de baten van de reistijdverbetering zijn plausibel (respectievelijk 27% en 38%).

Deze percentages voor de ratio tussen betrouwbaarheids- en reistijdbaten zijn iets hoger dan het tot nu toe gehanteerde kental van 25% van het CPB. Hierbij moeten de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- In principe hoeft het geen verwondering te wekken dat het hier gevonden percentage anders is dan de 25% die als vuistregel is opgesteld door het CPB. Deze regel is gebaseerd op ruwe aannames. De kracht van het nieuwe rekeninstrument is dat maatregel-specifieke berekeningen kunnen worden uitgevoerd. Een belangrijk aspect hierbij is de uitwisseling van verkeer tussen het hoofdwegennet en het onderliggende wegennet. Deze uitwisseling zal per project anders zijn. Omdat beide wegtypes andere betrouwbaarheidskenmerken hebben, zal dit zeker leiden tot een andere omvang van de betrouwbaarheidsbaten van het gehele project.
- In dit onderzoek is geen rekening gehouden met andere reistijdbaten (bijv. afname free-flow reistijd). Als dit wel gedaan zou worden, dan zal deze ratio iets afnemen (vooral in het geval van het doortrekken van de A4)

[6] Negatief getal betekent hier vermindering reistijdvertraging en/of onbetrouwbaarheid en dus positieve baten; positief getal betekent toename reistijdvertraging en/of onbetrouwbaarheid en dus negatieve baten.

- In dit onderzoek hebben we alleen gekeken naar de (reguliere) onbetrouwbaarheid waarbij de extreme reistijden zijn uitgesloten. Er zijn ook baten bij het verbeteren van de robuustheid van het systeem, oftewel bij beleid dat het aantal en de omvang van de extremiteiten verminderd. Als dit wel gedaan zou worden, dan zal deze ratio toenemen. Echter, het is lastig gebleken om met de methodiek die in dit onderzoek is gehanteerd de omvang van de robuustheid te relateren aan trajectkenmerken die in het LMS/NRM beschikbaar zijn zoals reistijdvertraging, lengte, aantal rijstroken etc. Bovendien is er geen empirisch onderzoek beschikbaar waaruit de monetaire waardering van een verbetering van de robuustheid kan worden afgeleid.

De twee bovengenoemde projecten zijn versimpelde doorrekeningen van zeer complexe projecten. Om een goede vergelijking tussen de resultaten van het nieuwe instrument en de oude vuistregel te kunnen maken, zal een aantal (volledige) projecten moeten worden doorgerekend.

Conclusie

Dit project heeft belangrijke stappen gezet in het totale onderzoek naar betrouwbaarheid van reistijden in Nederland. Er is een accurate beschrijvende functie afgeleid voor de betrouwbaarheid op snelwegen, en voor het eerst is er een bruikbare functie afgeleid voor overige wegen. Deze beide functies zijn ingebouwd in een nieuw post-processing rekenmodule voor het LMS/NRM. Dit instrument is getest en geeft plausibele uitkomsten, zowel voor de omvang van de onbetrouwbaarheid als voor de betrouwbaarheidsbaten bij projecten. Een doorrekening van een tweetal (versimpelde) projecten gaf een verhouding tussen de betrouwbaarheids- en reistijdbaten die iets hoger ligt dan de vuistregel van 25% die nu vaak gehanteerd wordt. Het voordeel van deze methodiek boven het gebruik van een vuistregel is dat nu project-specifieke doorrekeningen gemaakt kunnen worden waarbij rekening gehouden wordt met de uitwisseling tussen het hoofdwegennet en het onderliggende wegennet. Deze uitwisseling zal per project verschillend zijn en daardoor kan een vuistregel niet volstaan. Een precieze vergelijking tussen de nieuwe methode en de oude vuistregel moet volgen uit een uitgebreidere test met een doorrekening van een aantal (volledige) projecten.

Het verdient aanbeveling om in de toekomst meer onderzoek te doen naar de betrouwbaarheid op niet-snelwegen, naar robuustheid (zowel op snelwegen als op niet-snelwegen), naar de precieze verwachting die automobilisten hebben van hun reistijd en naar de betrouwbaarheidseffecten van specifieke maatregelen. Daarnaast is ook onderzoek naar de betrouwbaarheidseffecten van verplaatsingen per openbaar vervoer gewenst.

Dankwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd door Significance in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu. De gebruikte videocameradata met nummerbordherkenning zijn geleverd door ARS Traffic & Transport Technology. De auteurs zijn Nick Bel en Jasper Willigers dankbaar voor hun bijdrage aan de analyse, Gerard de Jong en Carel van der Lippe voor hun bijdrage aan de discussies en Han van der Loop en Frank Hofman voor hun bijdrage in het begeleidingsteam.

Referenties

Centraal Plan Bureau (2004) *Economische toets op de Nota Mobiliteit*, document nr. 65, Den Haag

Hamer, R., G.C. de Jong, E.P Kroes. (2005) *The value of reliability in Transport – Provisional values for the Netherlands based on expert opinion*, RAND Technical Report Series, TR-240-AVV, Netherlands.

HEATCO (2006) *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment,* Deliverable 5, Proposal for harmonized guidelines. IER, University of Stuttgart.

Hellinga, B. (2011*) Defining, Measuring, and Modelling Transportation Network Reliability*. Final report, Delft University of Technology, the Netherlands.

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (2012) *Mobiliteitsbalans 2012*. Online document at URL http://www.rijksoverheid.nl/bestanden/documenten-en-publicaties/rapporten/2012/11/16/rapport-Mobiliteitsbalans-2012-van-het-ennisinstituut-voor-mobiliteitsbeleid-kim/lp-i-m-00000002744.pdf

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (2013) *De maatschappelijke waarde van kortere en betrouwbaardere reistijden*. Online document at URL http://kimnet.nl/sites/kimnet.nl/files/de-maatschappelijke-waarde-van-kortere-en-betrouwbaardere-reistijden.pdf

Knoop, V.L, Hoogendoorn, S.P., van Zuylen, H.J. (2007) *Approach to Critical Link Analysis of Robustness for Dynamical Road Networks, in Traffic and Grannular Flow'05*, pp. 393-402, Springer Berlin Heidelberg

Kouwenhoven, M., Schoemakers, A., van Grol, R. *Development of a tool to assess the reliability of Dutch road networks,* European Transport Conference, Strassbourg, 2005

Kouwenhoven, M., de Jong, G.C., Koster, P., van den Berg, V.A.C., Verhoef, E.T., Bates, J., Warffemius, P.M.J. (2014) *New values of time and reliability in passenger transport in the Netherlands*, Research in Transport Economics 47, p.37-49

Ministerie van Verkeer en Waterstaat & Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu Nota Mobiliteit - *Naar een betrouwbare en voorspelbare bereikbaarheid*, Den Haag, 30 september 2004. Online document at URL http://www.rijksoverheid.nl/documenten-en-publicaties/notas/2004/09/30/nota-mobiliteit.html

Peer, S., Koopmans, C. and Verhoef, E.T. (2012) *Prediction of travel time variability for cost-benefit analysis*, Transportation Research Part A pp. 79-90.

RAND Europe (2004) *De Waardering van kwaliteit en betrouwbaarheid in personen- en goederen vervoer AVV/RAND Europe,* Rotterdam.

Sirivadidurage, s., Gordon, A., White, C. and Watling, D. (2009) *Forecasting day to day variability on the UK motorway network*, presented at ETC 2009.

Van Lint, J.W.C, H.J. van Zuylen, H. Tu (2008) *Travel time unreliability on freeways: why measures based on variance tell only half the story* JWC Transportation Research Part A: Policy and Practice 42 (1), 258-277