

**Nietsdoen is geen optie - methodes voor het bepalen van de ro-
buustheid van wegennetwerken**

Maike Snelder
TNO
maaike.snelder@tno.nl

Jeroen Schrijver
TNO
jeroen.schrijver@tno.nl

Ben Immers
TNO
ben.immers@tno.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
19 en 20 november 2009, Antwerpen**

Samenvatting

Nietsdoen is geen optie - methodes voor het bepalen van de robuustheid van wegennetwerken

Verkeersnetwerken in verstedelijkte gebieden zijn kwetsbaar voor onvoorspelbare gebeurtenissen zoals incidenten. Het komt nu bijvoorbeeld al regelmatig voor dat een klein incident tot file op meerdere wegen leidt en dat het uren duurt voordat deze file weer is opgelost. In de nabije toekomst zal naar verwachting de gemiddelde impact van incidenten groter worden, omdat de belasting op de weg groter wordt en daardoor de reservecapaciteit in het netwerk per tijdstap en over de tijd afneemt. Niets doen is dus geen optie.

Verschillende maatregelen kunnen genomen worden om de robuustheid van het wegennetwerk te vergroten. Om het effect van deze maatregelen in te kunnen schatten is het van belang om robuustheid te kunnen kwantificeren. In dit paper is daarom een overzicht gegeven van verschillende in Nederland gebruikte definities, indicatoren en meetmethodes voor robuustheid. Uit het overzicht blijkt dat er nog geen eenduidige beslissing is genomen over welke definities, indicatoren en meetmethodes het best gebruikt kunnen worden. Het is zelfs de vraag of een keuze gemaakt kan worden tussen alle indicatoren, omdat ze immers allemaal een ander aspect van robuustheid laten zien. In praktijk zal echter toch altijd gekozen moeten worden.

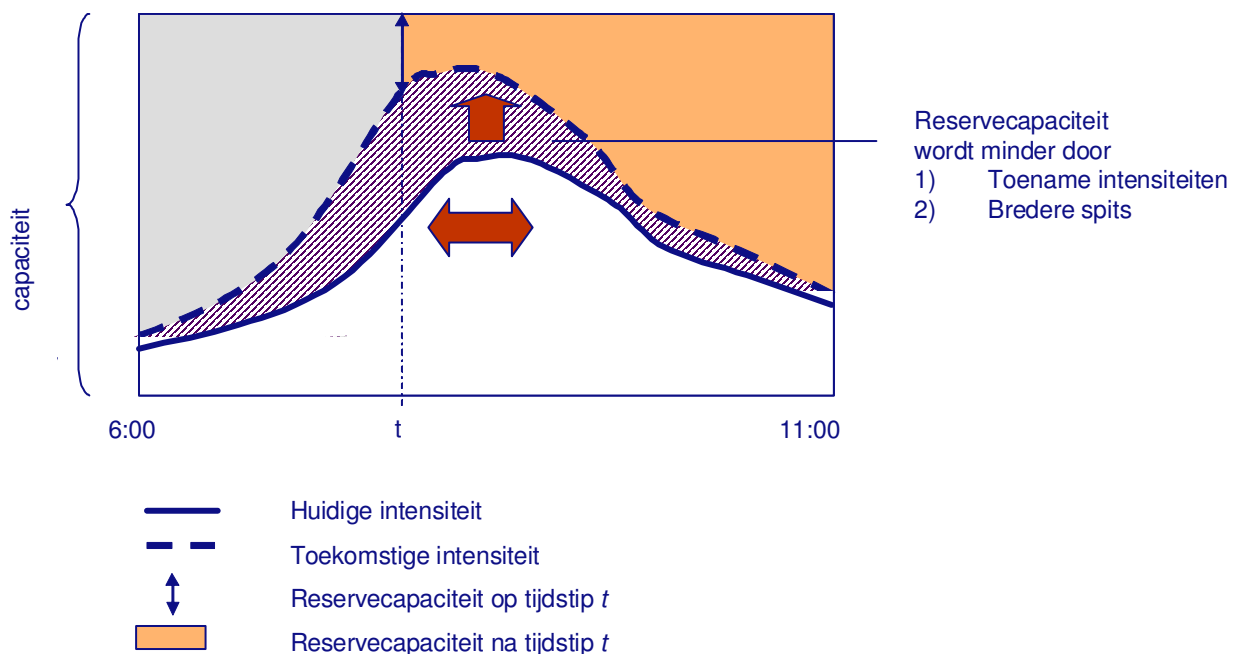
Bij de keuze van indicatoren en methodes is het van belang dat zoveel mogelijk aspecten van robuustheid beschouwd worden. Fileterugslag en alternatieve routes zijn de twee belangrijkste aspecten hiervan. Bij voorkeur moeten de indicatoren en methodes rekening kunnen houden met de ontwikkeling van files over de tijd in de situatie met en zonder verstoring. De mate van file en de locatie van de file zijn hierbij van belang. Dit betekent dat de te gebruiken methode met fileterugslag rekening moet kunnen houden. De aanwezigheid en het gebruik van alternatieve routes zijn het tweede belangrijke aspect. Tot op heden is het echter heel lastig om dit goed te modelleren, omdat weinig bekend is over het gebruik van alternatieve routes bij verstoringen. Het is daarom aan te bevelen om meerdere vormen van routekeuze toe te passen, om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de range waarin de resultaten kunnen liggen.

In de toekomst zullen de methodes voor het kwantificeren van robuustheid verder uitgewerkt moeten worden om goed onderbouwde beslissingen te kunnen nemen over de te nemen maatregelen om de robuustheid van het wegennetwerk te vergroten.

1. Inleiding

Verkeersnetwerken in verstedelijkte gebieden zijn kwetsbaar voor onvoorspelbare gebeurtenissen zoals incidenten. Het komt nu bijvoorbeeld al regelmatig voor dat een klein incident tot file op meerdere wegen leidt en dat het uren duurt voordat deze file weer is opgelost. Een voorbeeld is een ongeluk dat op 11 september 2007 om ongeveer 7.00 uur plaats vond onderaan de afrit Voorburg (A12). Dit ongeluk leidde tot file op een groot deel van de A12 en de A4 en de gehele A13. Deze file was pas om 11.00 uur, vier uur na het ongeluk, weer opgelost en vele automobilisten hadden meer dan een uur vertraging.

In de nabije toekomst zal naar verwachting de gemiddelde impact van incidenten groter worden, omdat het drukker wordt en de reservecapaciteit in het netwerk per tijdstip en over de tijd afneemt. In Figuur 1 is de capaciteit en de ontwikkeling van de intensiteit over de tijd weergegeven. De ruimte boven de intensiteitslijn geeft de reservecapaciteit weer. Als het drukker wordt neemt de reservecapaciteit op ieder tijdstip af. Als op moment t een verstoring plaatsvindt, kan de reservecapaciteit in het netwerk vanaf tijdstip t benut worden om te herstellen. Als de spits drukker en breder wordt neemt de reservecapaciteit in het netwerk af en duurt het langer voordat het netwerk hersteld is van een verstoring.



Figuur 1: Huidige en toekomstige reservecapaciteit in de tijd

Hieronder zijn enkele redenen weergegeven waarom de spits drukker en breder zou kunnen worden:

- Verkeersstromen zullen blijven groeien en de belasting op delen van het wegennet wordt groter, vooral door vrachtverkeer, ondanks de geplande uitbreiding van infrastructuurcapaciteit.
- Rond steden vindt een ruimtelijke concentratie van verkeersstromen plaats, door geconcentreerde ruimtelijke ontwikkeling en agglomeratievorming. Dit betekent dat de toename van het aantal voertuigkilometers niet evenredig over het land verdeeld zal zijn. Vooral in, rond en tussen steden in de Randstad wordt het meer dan gemiddeld

drukker op de weg. Als hier een incident gebeurt, worden veel automobilisten getroffen.

- De spitsperiodes worden langer door beprijzen en doordat automobilisten hun werk-schema's aanpassen aan de congestie.
- De bezettingsgraad van het netwerk wordt hoger door veranderingen in rijgedrag en de introductie van intelligente transportsystemen.

De bovenstaande factoren duiden op een toenemende kwetsbaarheid van het wegennetwerk als geen maatregelen genomen worden. Niets doen is geen optie. Verschillende maatregelen kunnen genomen worden om de robuustheid van het wegennetwerk te vergroten. In (Schrijver et al., 2008) en (Snelder et al., 2008) is een aantal maatregelen uitgewerkt. Van deze maatregelen is bovendien aangetoond dat ze het reistijdverlies als gevolg van incidenten met 30% kunnen verminderen. Het heeft dus zin om deze maatregelen te nemen. Om het effect van deze maatregelen in te kunnen schatten is het van belang om robuustheid te kunnen kwantificeren. In dit paper wordt daarom een overzicht gegeven van bestaande definities, indicatoren en meetmethodes die hierbij gebruikt kunnen worden.

2. Robuustheid nader uitgewerkt

2.1 Definities, componenten en ontwerpprincipes

Robuustheid is te definiëren als: het functiebehoud van het netwerk onder wisselende omstandigheden.

Deze definitie bevat twee facetten, die hier kort toegelicht worden:

- functie: in zijn meest algemene vorm heeft een wegennet de functie om verplaatsingen van A naar B mogelijk te maken. Voor een adequate opbouw en vormgeving van het wegennet, moet echter ook bekend zijn voor welk soort verplaatsingen een weg of knooppunt een functie heeft. Het belangrijkste functionele onderscheid is dat naar verplaatsingsafstand: een netwerk dat langeafstandsverplaatsingen mogelijk moet maken ziet er anders uit dan een netwerk voor lokaal verkeer. Maar ook onderscheid tussen personen- en goederenverkeer kan opportuun zijn, of zelfs onderscheid naar verplaatsingsmotief.
- wisselende omstandigheden: het gaat daarbij om fluctuaties in vraag en aanbod. Dit betreft alle 'normale' fluctuaties in vraag en aanbod: het verschil in vraag tussen spits en dal, of tussen vakantie/weekend en werkdagen, maar ook de invloed van bijvoorbeeld weersomstandigheden op de kwaliteit van het aanbod: een fikse regenbui kan de capaciteit van een weg met tientallen procenten verminderen. Incidenten, calamiteiten, geplande stremmingen (ten behoeve van grote wegwerkzaamheden), evenementen of extreme weersomstandigheden zijn voorbeelden van fluctuaties die door bijzondere omstandigheden veroorzaakt worden.

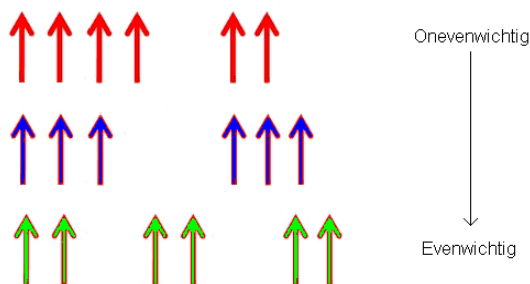
Kwetsbaarheid is het tegenovergestelde van robuustheid. Een netwerk dat kwetsbaar is, is niet robuust en andersom.

Een netwerk is robuust als het de volgende kenmerken bevat:

1. Preventie: het verkeerssysteem blijft het best functioneren als verstoringen worden voorkomen. Met het begrip preventie wordt hier in relatie tot de robuustheid van het

netwerk echter niet het voorkomen van verstoringen bedoeld, maar het voorkomen van het optreden van congestie door verstoringen. Als het wegdek bijvoorbeeld wordt verwarmd, zullen sneeuw en ijsel minder snel tot problemen op te weg leiden.

2. Redundantie: de robuustheid van een systeem kan worden vergroot door een zekere reservecapaciteit in het systeem aan te brengen (bijvoorbeeld in de vorm van terugvalopties). Deze reservecapaciteit wordt veelal aangeduid met de term redundantie. Bij verstoringen kan deze reservecapaciteit worden aangewend waardoor het systeem beter blijft functioneren.
3. Compartimentering: de mate waarin file beperkt blijft tot de betreffende weg of een klein deel van het netwerk. In een goed gecompartmenteerd netwerk verspreidt file zich niet als een olievlek over het hele netwerk.
4. Veerkracht: het vermogen van het transportsysteem om zich, telkens weer en bij voorkeur zo snel mogelijk, te herstellen van een tijdelijke overbelasting.
5. Flexibiliteit: de robuustheid van het systeem kan mede afgemeten worden aan de mate waarin het systeem in staat is meer en andere functies te vervullen dan de functies waarvoor het systeem oorspronkelijk ontworpen werd. Of, anders gezegd, aanpassingsvermogen is de eigenschap die het systeem in staat stelt mee te groeien met nieuwe eisen die aan het systeem worden gesteld.
6. Evenwichtigheid: als de verkeerstromen evenwichtig over het netwerk zijn verdeeld en de capaciteit dus ook evenwichtig over het netwerk wordt verdeeld, is het makkelijker om verstoringen op te vangen. De ene route kan dan als terugvaloptie voor de andere dienen. In Figuur 2 is een voorbeeld weergegeven van een onevenwichtige en een evenwichtige verdeling van rijstroken over alternatieve routes. In de bovenste situatie (rode pijlen) zijn er twee routes om van het zuiden naar noorden te rijden. De ene route heeft vier rijstroken en de andere route heeft twee rijstroken. Als op de route met vier rijstroken iets gebeurt zijn op de andere route slechts twee rijstroken (minus de al benutte capaciteit) beschikbaar om het verkeer van de andere route op te vangen. In de middelste situatie (blauwe pijlen) is een evenwichtiger verdeling over beide routes weergegeven. Beide routes hebben nu drie rijstroken waardoor ze makkelijker als terugvaloptie voor elkaar kunnen dienen. De onderste situatie (groene pijlen) is nog evenwichtiger. Hier is een derde route gecreëerd waarbij alle drie de routes twee rijstroken hebben. Als op één van de routes nu een incident plaatsvindt zijn altijd vier rijstroken (minus de al benutte capaciteit) op de andere twee routes beschikbaar om het verkeer van de 'getroffen' route op te vangen. Het is hierbij van belang dat de routes onderling goed verknoopt zijn.



Figuur 2: Evenwichtige verdeling rijstroken over routes.

Om deze zes kenmerken in het netwerkontwerp mee te kunnen nemen moeten ze verder worden uitgewerkt. Hiertoe zijn vier algemene ontwerpprincipes te onderscheiden voor robuuste netwerken (Schrijver et al., 2008):

1. gezond evenwicht tussen vraag en aanbod,
2. keuzemogelijkheden en flexibiliteit inbouwen,
3. ontwerpen op stromen én op bufferen,
4. vorm volgt functie.

Deze vier ontwerpprincipes worden hieronder toegelicht. Bij de principes is aangegeven welke kenmerken van robuustheid ze ondersteunen.

Ad 1 Gezond evenwicht tussen vraag en aanbod

In een robuust wegennet bestaat in de reguliere situatie een 'gezond' evenwicht tussen vraag en aanbod. Het accepteren van een zekere mate van (plaatselijke en tijdelijke) congestie is daarbij acceptabel en zelfs wenselijk: door het accepteren van een beperkte hoeveelheid congestie worden de grootste pieken in de verkeersvraag 'uitgesmeerd' over een iets langere periode, waardoor de dure infrastructuur niet hoeft te worden gedimensioneerd op deze 'piek in de piek'. Volgens Bovy (2001) is het acceptabel en wenselijk dat ongeveer 2% van al het dagelijkse verkeer op het hoofdwegennet te maken heeft met congestie. Op deze wijze blijft het netwerk naar behoren functioneren en wordt toch een zekere schaarste aan verkeersruimte gecreëerd die het mobiliteitsgenererende effect van infrastructuur binnen de perken houdt. In feite is dit niet anders dan de rij voor de kassa in de supermarkt: als het heel druk is in de winkel zijn (korte) wachtrijen algemeen geaccepteerd, maar als ook wachtrijen ontstaan op rustiger momenten is dat een teken dat er structureel te weinig kassa's (open) zijn.

Zoals de bedrijfsleiding van de supermarkt een afweging maakt tussen de kwaliteit voor de klant (waaronder zijn keuzevrijheid om op het drukste moment te komen winkelen) en de kosten van meer kassa's, is de afweging tussen kwaliteit van de bereikbaarheid en de kosten van aanleg en exploitatie van infrastructuur een beleidsmatige afweging voor de aanbieder van de infrastructuur, die echter wel gebaseerd kan worden op degelijk kosten-batenonderzoek. Daarin kunnen de directe en indirecte kosten van meer infrastructuur worden afgezet tegen de directe en indirecte kosten van het achterwege blijven van deze infrastructuur voor consumenten en producenten. Het gaat in die afweging niet alleen om een optimalisatie van de bereikbaarheid, maar ook om de consequenties voor leefbaarheid, ruimtegebruik en economische ontwikkeling.

Voor het vergroten van de robuustheid van het netwerk betekent 'een gezond evenwicht' het volgende: de directe en indirecte kosten van het toevoegen van (reserve)capaciteit aan het netwerk om de redundantie te vergroten, moeten in evenwicht zijn met de directe en indirecte baten van minder reistijdverlies bij incidenten. De robuustheid wordt alleen vergroot als de (reserve)capaciteit niet tot een mobiliteitsgenererend effect leidt. Om dit te voorkomen moet de ontwerpsnelheid van de infrastructuur zorgvuldig worden gekozen. Als de gemiddelde snelheid om van A naar B te reizen onder reguliere omstandigheden niet omhoog gaat wordt geen extra mobiliteit gegenereerd.

Ad 2 Keuzemogelijkheden en flexibiliteit inbouwen

Een robuust wegennet biedt meerdere mogelijkheden om van A naar B te komen. Alternatieve routes kunnen lopen over hetzelfde netwerk, over het onder- of eventueel boven-

liggende netwerk, maar ook via andere modaliteiten (openbaar vervoer en fiets voor personenvervoer, respectievelijk binnenvaart en spoor voor goederenvervoer). Vanuit het gezichtspunt van de wegbeheerder is het bieden van keuzemogelijkheden gewenst. Het leidt tot een afvlakking van pieken (evenwichtigheid), omdat weggebruikers bij een slechte doorstroming op een bepaalde route ook kunnen kiezen voor een andere route, zij het wellicht met een wat lagere kwaliteit (rijcomfort), of met een zekere omweg. Naast keuzevrijheid bieden deze alternatieve routes ook terugvalopties (redundantie) voor het geval dat een wegvak of knooppunt, voorzien of onvoorzien, geheel of gedeeltelijk uitvalt. In zulke gevallen is informatievoorziening aan de weggebruiker zeer belangrijk, dit in combinatie met de inzet van dynamisch verkeersmanagementmaatregelen, die ervoor moeten zorgen dat de verkeersstroom over de alternatieve route, die groter is dan gebruikelijk, goed wordt afgewikkeld. Om tussen de routealternatieven te kunnen wisselen is flexibiliteit in het netwerk nodig. Transferia kunnen bijvoorbeeld de keuzemogelijkheden in het netwerk vergroten, omdat ze een flexibele overstap van de weg naar het spoor mogelijk maken.

Ad 3 Ontwerpen op stromen én op bufferen

Omdat in een robuust wegennet rekening wordt gehouden met een zekere mate van congestie, moeten bij het ontwerp van wegen, knooppunten en aansluitingen naast de stroomfunctie ook de bufferfunctie van wegvakken integraal mee worden genomen. Elk wegvak heeft een 'natuurlijke' buffercapaciteit. Waar deze natuurlijke buffercapaciteit onvoldoende is, kunnen extra buffers voorkomen dat files terugslaan op andere routes; ook doseren zij het verkeer, zodanig dat bepaalde wegen zo veel mogelijk filevrij blijven, zoals doorgaande routes of het stedelijke wegennet. Buffers leiden dus tot een goed compartimenteerd netwerk. Dankzij buffers kan een netwerk zich bovendien sneller herstellen van incidenten. Buffers maken het netwerk dus ook veerkrachtiger.

Ad 4 Vorm volgt functie

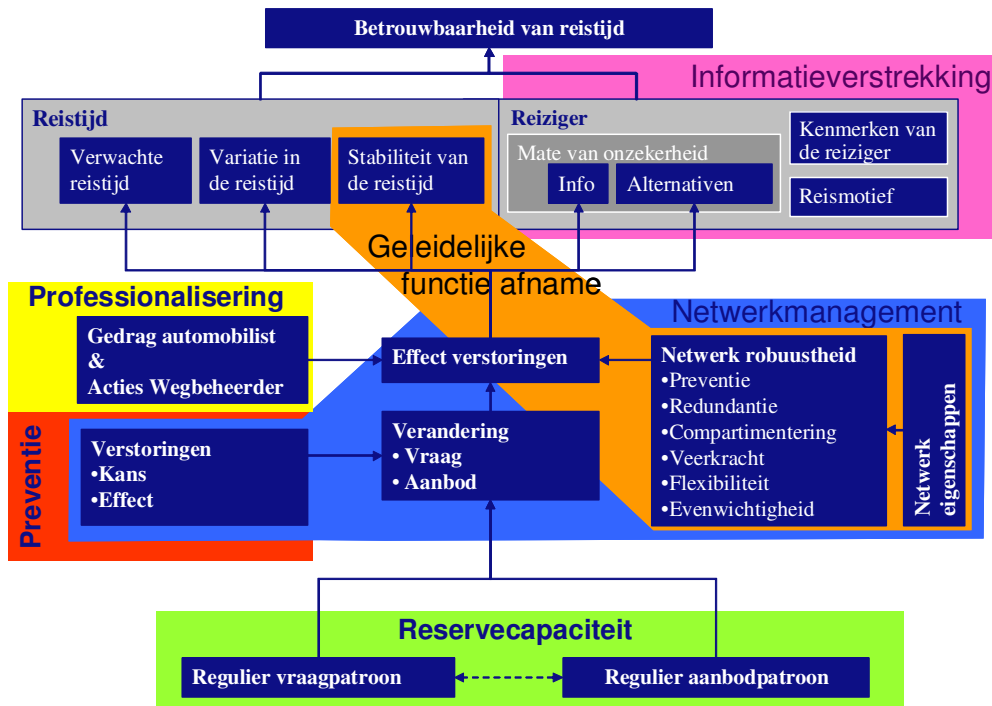
Het autosnelwegennet is oorspronkelijk ontworpen voor verkeer over lange afstanden. In praktijk blijkt dat de autosnelwegen voor een aanzienlijk deel worden gebruikt voor korte ritten, omdat vaak geen andere route beschikbaar is. De vorm is dus niet goed afgestemd op de functie, wat leidt tot een inefficiënt gebruik van de verkeersruimte. In een robuust wegennet volgt de vorm de functie en wordt waar nodig fysiek onderscheid gemaakt tussen wegennetten voor de lange en voor de korte afstand. Dit maakt het totale netwerk, vooral in stedelijke gebieden met veel verkeer, efficiënter (bv. in termen van ruimtegebruik), en de verschillende functies zitten elkaar niet in de weg (compartimentering). Files op het netwerk voor het doorgaande verkeer leiden niet direct tot files op netwerk voor het korteaafstandsverkeer en andersom. Door verschillende zelfstandig functionerende netwerken te creëren wordt bovendien de redundantie en de veerkracht van het hele wegennet vergroot doordat beide netwerken als terugvaloptie voor elkaar kunnen dienen. Het wegennet herstelt hierdoor sneller van verstoringen. Flexibiliteit in het netwerk kan nodig zijn om van het netwerk voor de lange afstand naar het netwerk van de korte afstand uit te wijken en andersom. Het netwerk voor het langeafstandsverkeer heeft minder op- en afritten nodig dan het netwerk voor het korteaafstandsverkeer. Hierdoor kan het voorkomen dat een deel van het langeafstandsverkeer bij incidenten niet meer kan uitwijken naar het netwerk voor het korteaafstandsverkeer. Een flexibele doorsteek kan hierbij uitkomst bieden. Als zich op het netwerk voor het korteaafstandsverkeer een incident voordoet zijn flexibele doorsteken naar het netwerk voor het lange-

afstandsverkeer ook wenselijk, omdat het netwerk voor het langeafstandsverkeer anders geen goede terugvaloptie biedt voor het kortefstandsverkeer. Tot slot leidt het principe vorm volgt functie ook tot meer evenwichtigheid, omdat niet 'al' het lange- en kortefstandsverkeer gecombineerd wordt op één snelweg.

2.2 Relatie robuustheid met reistijd en betrouwbaarheid

Naast een korte reistijd is de reiziger geïnteresseerd in de betrouwbaarheid van de afwikkeling van zijn of haar verplaatsing. De betrouwbaarheid van de reistijd wordt soms nog belangrijker gevonden dan de duur van de reis zelf. De betrouwbaarheid van reistijd is de mate waarin een reiziger met een bepaalde zekerheid zijn reistijd kan schatten. De zekerheid wordt bepaald door de verwachte reistijd, de variatie (spreiding) in reistijd, de stabiliteit van de reistijd, de informatie waarover de reiziger beschikt en de alternatieven waar de reiziger gebruik van kan maken. Stabiliteit is de mate waarin de reistijd verandert als de intensiteit stijgt en/of de capaciteit daalt. Idealiter blijft de verandering beperkt; immers, het plotseling 'instorten van reistijden' moet bij voorkeur worden vermeden. Bij een hoge instabiliteit is het bijzonder lastig de reistijd te voorspellen. Voor informatie en alternatieven geldt dat een reiziger een vertraging doorgaans minder erg zal vinden als hij wordt geïnformeerd over de omvang van de vertraging en/of alternatieven beschikbaar zijn om de verplaatsing voort te zetten. In Figuur 3 zijn schematisch de belangrijkste factoren weergegeven die de betrouwbaarheid van de reistijd beïnvloeden.

De reistijd (verwachting, variatie en stabiliteit), de mate van onzekerheid en dus ook de betrouwbaarheid van de reistijd hangen af van de door verstoringen veroorzaakte veranderingen in vraag en aanbod. De robuustheid van het netwerk en het gedrag van automobilisten en beheerders bepalen uiteindelijk in hoeverre deze veranderingen doorwerken op de reistijd en welke mate van onzekerheid de reiziger ervaart. Het gedrag van (netwerk)beheerders is van belang, omdat zij de afwikkeling van het verkeer kunnen beïnvloeden via verkeersmanagementmaatregelen. Het gedrag van automobilisten is eveneens van belang, omdat zij uiteindelijk beslissen hoe ze de verplaatsing afwikkelen (bestemming, vertrektijdstip, vervoerswijze, route). Stel dat als gevolg van een incident ergens een weg geblokkeerd is en dat alternatieve routes hiervoor beschikbaar zijn. Het gebruik van deze routes kan om meerdere redenen beperkt zijn. De automobilist zal bijvoorbeeld geen gebruik maken van deze route als hij niet op de hoogte is van de blokkade, als hij niet af wil afwijken van zijn route of als hij deze alternatieve route en/of de kwaliteit van de route niet kent en de beheerder of zijn navigatiesysteem hem daar ook niet op wijst.



Figuur 3: Relatie tussen betrouwbaarheid en robuustheid.

Uit de bovenstaande tekst is af te leiden dat robuustheid een eigenschap is van het systeem. De betrouwbaarheid van de reistijd is daarentegen iets dat de reiziger ervaart.

Naast dit onderscheid kunnen we nog drie onderscheiden maken:

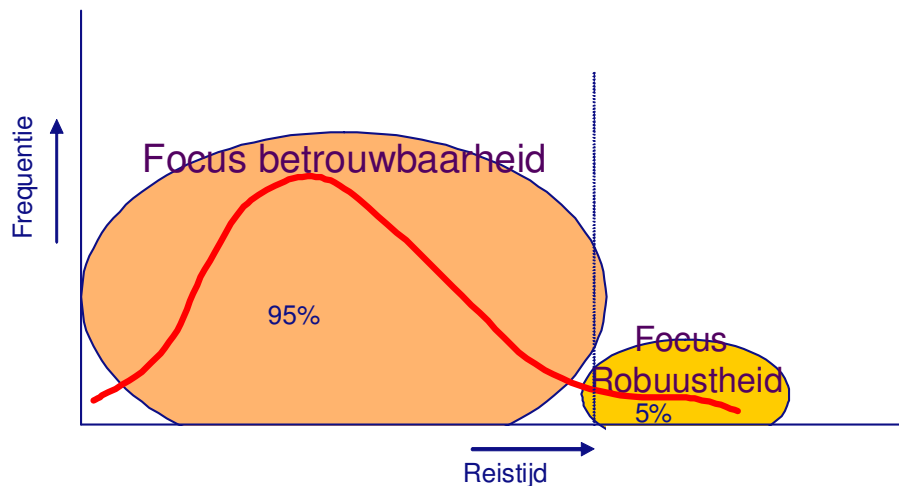
- Bij betrouwbaarheid ligt de nadruk op verstoringen die regelmatig voorkomen en bij robuustheid ligt de nadruk op verstoringen die onverwacht optreden en een groot effect hebben. In Figuur 4 is een reistijdverdeling weergegeven. Hierin is aangegeven op welk gebied de betrouwbaarheid zich focust en op welk gebied robuustheid zich focust. De grens van 95% is min of meer willekeurig gekozen. Dit kan bijvoorbeeld ook 85% of 90% zijn. Een analyse van het type verstoringen, de frequentie van de verstoringen en het effect van de verstoringen kan deze grens nader definiëren.
- Betrouwbaarheid richt zich op een gemiddelde spreiding in de reistijd en moet dus over een langere periode (van enkele dagen tot een jaar) worden bepaald. Bij robuustheid ligt de nadruk op de periode waarin het effect van een bepaalde verstoring merkbaar is.
- Bij betrouwbaarheid ligt de nadruk op de kans dat een bepaalde verstoring zich voordoet en bij robuustheid ligt de nadruk op het effect. Dit onderscheid hangt uiteraard met de vorige twee punten samen. Uit de definitie van robuustheid volgt dat de kans op een verstoring niet belangrijk is. De vraag is in hoeverre een netwerk nog blijft functioneren als zich een verstoring voordoet. Dit betekent uiteraard niet dat de kans op verstoring onbelangrijk is. Voor het functioneren van het hele systeem is de kans van groot belang. Als de kans dat verstoringen zich voordoen kleiner gemaakt kan worden heeft dit grote invloed op de gemiddelde reistijd en de betrouwbaarheid van de reistijd. De robuustheid van het systeem is dan van minder belang.

Deze verschillen geven aan dat het van belang is om de hele reistijdverdeling te beschouwen en te waarderen. Als alleen naar betrouwbaarheid gekeken wordt, wordt de

impact van de 5% verstoringen met het grootste effect onderschat. De betrouwbaarheid van de reistijd wordt meestal uitgedrukt met één van de volgende indicatoren:

- *Variatiecoëfficiënt*: De variatiecoëfficiënt geeft aan hoe groot de variatie, in procenten, is ten opzichte van de (rekenkundig) gemiddelde reistijd (standaarddeviatie/gemiddelde).
- *Buffertijdindex (Buffer Time Index)*: Deze maat berekent hoeveel extra tijd nodig is om in 95procent van de gevallen op tijd te komen.
- *Ellende-index*: De Ellende-index richt zich voor de slechtste situaties op de lengte van de vertragingen. Deze vertraging wordt berekend door de gemiddelde reistijd af te trekken van de traagste 10, 15 óf 20 procent van de reistijden.

Als betrouwbaarheid in kosten-batenanalyses gewaardeerd wordt gebeurt dit meestal op basis van een spreiding in reistijd. De 5% verstoringen met het grootste effect hebben hier slechts een kleine invloed op. Als automobilist houdt je nauwelijks tot geen rekening met het feit dat je door een grote verstoring in één keer meer dan een uur vertraging op kan lopen. Dit uur vertraging wordt echter wel als zeer vervelend ervaren en moet daarom apart gewaardeerd worden.



Figuur 4: Focus betrouwbaarheid en robuustheid.

2.3 Indicatoren robuustheid

Voor robuustheid bestaat nog geen algemeen geaccepteerde indicator. Hieronder staat een lijst met indicatoren die gebruikt kunnen worden om de robuustheid van een netwerk te bepalen. Dit zijn statische (onafhankelijk van de verkeersafwikkeling) indicatoren die direct naar de eigenschappen van een netwerk en daarmee naar de robuustheid van het netwerk verwijzen. Daarnaast staan er enkele dynamische (afhankelijk van de verkeersafwikkeling) indicatoren bij die eveneens direct naar de robuustheid van een netwerk verwijzen. Tot slot staan in de lijst indirecte indicatoren die naar de reistijd en de stabiliteit van de reistijd verwijzen. Als het netwerk robuuster wordt neemt het reistijdverlies bij incidenten af en blijft de reistijd stabiel. Tussen haakjes zijn de componenten van robuustheid waar de indicatoren betrekking op hebben vermeld.

Statische indicatoren

1. De beschikbaarheid en kwaliteit van alternatieve routes (redundantie, evenwichtigheid). Als bij deze indicator rekening wordt gehouden met de drukte op de alternatieve routes, wordt dit een dynamische indicator.

2. De connectiviteit/samenhang in een netwerk. Dit is het aantal schakels dat moet worden verwijderd of geblokkeerd voordat verschillende delen van een netwerk niet meer met elkaar zijn verbonden (redundantie, evenwichtigheid).
3. De afstand tussen op- en afritten (compartimentering, flexibiliteit).
4. De graad van knooppunten. Het aantal wegen dat in een knooppunt samenkomt. Als in een knooppunt bijvoorbeeld vijf wegen samenkomen, verspreidt een file zich snel over het knooppunt naar de andere wegen (compartimentering). Daar staat tegenover dat via ditzelfde knooppunt wel veel alternatieve routes kunnen worden gekozen als de file het knooppunt nog niet heeft bereikt (flexibiliteit).

Directe dynamische indicatoren

5. Reservecapaciteit. Dit is de capaciteit van een netwerk die niet benut wordt onder normale omstandigheden (redundantie).
6. De totale lengte van de wegen waarop de gevolgen van een verstoring merkbaar zijn (compartimentering, redundantie).
7. De gemiddelde afhandeldingsduur van een incident (veerkracht).
8. Het totaal aantal voertuigen op de wegen waarop de gevolgen van een incident merkbaar zijn (compartimentering, redundantie).
9. De totale afgelegde afstand van alle voertuigen over een hele periode in de situatie met een incident vergeleken bij de situatie zonder incident (redundantie).
10. Totaal aantal aankomsten in een bepaalde periode in de situatie met een incident vergeleken bij de situatie zonder incident (alle componenten).
11. Het aantal voertuigen op het netwerk in een periode in de situatie met een incident vergeleken bij de situatie zonder incident (alle componenten).

Indirecte dynamische indicatoren

12. Totale reistijd van alle voertuigen per tijdstap in de situatie met een incident vergeleken bij de situatie zonder incident (reistijd, stabiliteit).
13. De door een incident veroorzaakte extra reistijd (reistijd).
14. De gemiddelde snelheid per tijdstap in de situatie met een incident vergeleken bij de situatie zonder incident (reistijd, veerkracht, stabiliteit).

De meeste van deze indicatoren kunnen op wegvakniveau, routeniveau en netwerkniveau worden bepaald. Indicatoren op netwerkniveau zeggen iets over het functioneren van het hele netwerk. Indicatoren op netwerkniveau zijn vooral voor de netwerkbeheerder van belang. Bij indicatoren die op netwerkniveau worden berekend, moet in gedachte worden gehouden dat een kleine verandering in bijvoorbeeld de totale reistijd van alle reizigers die in bepaalde periode gebruik maken van een netwerk voor individuele reizigers toch een grote impact kan hebben. Een lokaal incident zal de totale netwerkprestatie bijvoorbeeld slechts met een klein percentage (bijvoorbeeld 0,5%) verlagen. Dit komt doordat het incident op een groot deel van het netwerk geen effect heeft en doordat het incident slechts gedurende een deel van de tijd files veroorzaakt. De individuele reiziger die precies in de file van het incident terecht komt kan echter eenvoudig vertragingen van bijvoorbeeld 50% oplopen. Door de indicatoren op routeniveau uit te rekenen kan worden bepaald welk verkeer last heeft van een incident (of andere verstoring). Door alle routes te selecteren die langs die incidentlocatie lopen worden de reistijdverliezen van de door het incident 'getroffen' reizigers inzichtelijk gemaakt. Hierbij wordt dus ingezoomd op een deel van de reizigers en een deel van de reistijd. Het effect van een ver-

storing wordt dus uitvergroet. Door op wegvakniveau te kijken kan worden bepaald op welke wegvakken het effect van incidenten merkbaar is. Hierbij worden de effecten van een verstoring nog verder uitvergroet.

Naast het onderscheid naar wegvakken, routes en netwerken kan onderscheid worden gemaakt naar periodes. Het is mogelijk om sommige indicatoren voor hele dagen, dagdelen of tijdstappen (uren of zelfs minuten) te bepalen. Dit laatste maakt het bijvoorbeeld ook mogelijk om te bepalen hoe snel het netwerk na een verstoring 'instort' en weer hersteld. Tot slot kan bij de indicatoren waarbij de verkeersafwikkeling een rol speelt, onderscheid worden gemaakt naar personen- en goederenvervoer.

Zoals hierboven is aangegeven bestaat er nog geen algemeen toegepaste of alles omvattende indicator. De verschillende indicatoren belichten allemaal een net iets ander aspect van robuustheid. De indicatoren 1 t/m 11 verwijzen direct naar robuustheid en zijn daarom van belang in de ontwerpfase. De indicatoren 12 t/m 14 zijn gerelateerd aan reistijd en zijn daarom makkelijker te gebruiken in KBA's omdat voor reistijd waarderingen bestaan. Uiteraard is het uiteindelijk van belang hoe maatregelen die in de ontwerpfase bedacht worden om de robuustheid te verbeteren doorwerken op de reistijd, betrouwbaarheid en het reistijdverlies bij verstoringen. Het volgende hoofdstuk gaat hier verder op in.

3. Methodes voor het bepalen van robuustheid

Momenteel worden verschillende methodes gebruikt om de indicatoren die in het vorige hoofdstuk zijn genoemd te bepalen. Deze methodes kunnen onderscheiden worden naar de volgende kenmerken:

- Wel of geen gebruik van een verkeersmodel: voor het bepalen van de statische indicatoren is geen verkeersmodel nodig, omdat ze kunnen worden afgeleid uit de opbouw van het netwerk.
- Type model: Micro-, meso- of macroscopisch; statisch of dynamisch. Het onderscheid tussen micro-, meso- of macroscopische modellen is van belang voor het detailniveau waarop naar robuustheid wordt gekeken. Omdat robuustheid een netwerk-eigenschap is, ligt het minder voor de hand om hier microscopische modellen voor te gebruiken. Met deze modellen kan slechts naar een relatief klein deel van het netwerk worden gekeken. Meso- en macroscopische modellen kunnen beiden ingezet worden. Het onderscheid naar statische en dynamische modellen is voor robuustheid belangrijk, omdat de snelheid waarmee een netwerk 'instort' en de snelheid waarmee een netwerk weer 'herstelt' mede bepalend is voor de robuustheid van een netwerk. De ontwikkeling over de tijd is dus belangrijk. Met dynamische modellen kan de verkeersafwikkeling over de tijd worden gemodelleerd. Met statische modellen kan dit echter niet. Bovendien hebben dynamische modellen vaak een betere filemodellering, waardoor zij beter gebruikt kunnen worden om de terugslag van files naar andere links te bepalen. Dit laatste is van groot belang omdat de mate van fileterugslag (compartimentering) een belangrijke bepalende factor is voor de robuustheid van een netwerk.
- Type routekeuze: het is bekend dat bij verstoringen zoals incidenten een deel van het verkeer van route wijzigt. Om welk deel het gaat is niet bekend. Algemeen wordt aangenomen dat tussen 5% en 15% van het verkeer van route wijzigt. Kraaijeveld (2008) laat in een casestudie zien dat bij een ongeval op de A12 richting Den Haag ongeveer 7% van de weggebruikers omrijdt via de N11 of A20. In de praktijk zal dit

percentage waarschijnlijk afhangen van de geboden informatie, de routealternatieven, de ernst en duur van het incident. In de literatuur zijn drie manieren van het simuleren van incidenten gevonden:

- Het verkeer houdt de oorspronkelijke route vast. Dit is dus de route die gekozen zou worden als zich geen verstoring voor zou doen. Bij deze vorm van filemodellering blijft een deel van het aspect robuustheid onderbelicht omdat de reservecapaciteit op alternatieve routes niet benut kan worden.
- Op basis van een evenwichtstoedeling. Al het verkeer kan van route wijzigen. Dit doet men zodanig dat een nieuw evenwicht ontstaat en de reistijd op alle gebruikte routes gelijk is. Deze situatie is net als de vaste routekeuze niet realistisch omdat in praktijk slechts een deel van het verkeer van route wijzigt. Bovendien veronderstelt deze aanpak dat men volledige informatie heeft over de verstoring (zelfs voordat deze plaatsvindt).
- En-route routekeuze. Bij deze vorm van routekeuzemodellering kan het verkeer tijdens de verplaatsing van route wijzigen. Deze vorm van modellering lijkt het meest op het keuzegedrag dat in de praktijk plaatsvindt. Het nadeel hiervan is echter dat aannames moeten worden gedaan over de hoeveelheid informatie die beschikbaar is en de reactie daarop van reizigers. Zoals eerder is aangegeven is hier nog heel weinig over bekend.

De vaste routekeuze en het nieuwe evenwicht kunnen worden gezien als een benadering van de twee uitersten die zich kunnen voordoen. Wat betreft de reistijd in het systeem hoeven dit echter niet de twee uiterste situaties weer te geven. Het kan bijvoorbeeld voorkomen dat als een klein deel van het verkeer van route wijzigt, de totale reistijd in het netwerk/systeem omhoog gaat, omdat het verkeer dat omrijdt ook ander verkeer hindert. Omdat nu nog onvoldoende bekend is over het omrijgedrag van automobilisten bij verschillende soorten verstoringen hoeft de ene vorm van routekeuzegedrag niet beter of slechter te zijn dan de andere. Het toepassen van meer dan één vorm van routekeuzemodellering geeft meer inzicht in de bandbreedte waarin de resultaten liggen.

- Filemodellering: hierbij veronderstellen we een verticale wachtrij of een horizontale wachtrij. De manier van filemodellering is van belang voor het bepalen van de robuustheid van een netwerk. Bij de verticale wachtrijmodellering ontstaat op de plek van het knelpunt in wegennetwerk een verticale wachtrij. Met een verticale wachtrij wordt de wachttijd van het verkeer dat het knelpunt wil passeren berekend, maar blokkeert de wachtrij geen andere stromen. Deze verticale wachtrij staat in het knelpunt, en niet ervoor, zoals in de praktijk. Het feit dat files terug kunnen slaan naar andere wegen is één van de belangrijkste redenen waarom een netwerk kwetsbaar kan zijn. Dit principe kan alleen in kaart worden gebracht als de files horizontaal op de weg worden geprojecteerd en dus met capaciteitsbeperkingen rekening wordt gehouden. Binnen de groep van modellen met horizontale wachtrijmodellering bestaan verschillende categorieën. De categorieën zijn gerelateerd aan de vorm van het fundamenteel diagram dat in het model is opgenomen. Het fundamenteel diagram bepaalt hoe snel een file op- en afbouwt en wat de filedichtheid is. In de meeste macroscopische dynamische modellen wordt een fundamenteel diagram met een constante filedichtheid gehanteerd. Hierbij blijft de kop van de file altijd op dezelfde plek staan, ook als de bottleneck al verdwenen is. De file lijkt dus aan de staart op te lossen. In het dynamische model Indy is een linktransmissiemodel opgenomen dat volgens de eerste orde golfstroomtheorie van Newell (1993) werkt. Hierin is een drie-

hoekig fundamenteel diagram opgenomen. De filedichtheid is hierbij, net als in praktijk, afhankelijk van de capaciteitsreductie of de maximale uitstroom. Als de bottleneck verdwenen is verplaatst de kop van de file naar achteren omdat de auto's aan de voorkant van de file weggrijden. Aan de achterkant van de file sluiten nog steeds auto's in de rij aan, waardoor de file zich stroomopwaarts verplaatst. Voor zover bekend is Indy het enige macroscopische model met deze gedetailleerde vorm van filemodellering. In microscopische modellen wordt deze vorm (en zelfs meer gedetailleerde vormen) van filemodellering vaker gebruikt.

- Kruispuntmodellering: op kruispunten ontstaat vertraging. Vooral op het onderliggend wegennetwerk is het van belang om dit goed te modelleren. Dit vraagt echter om veel data over alle kruispunten (ook voor de toekomst).

In Figuur 5 zijn verschillende methodes opgenomen die gebruikt worden bij robuustheidsanalyses. Deze methodes zijn vaak een combinatie van een statisch of een dynamisch model met een specifieke module om het effect van verstoringen te bepalen. Naast de genoemde modellen kunnen ook andere bestaande statische en dynamische modellen geschikt worden gemaakt voor het modelleren van robuustheid. De methodes zijn uitgesplitst naar drie van de bovenstaande factoren: wel of geen model, statisch of dynamisch en type routekeuzemodellering. Als alleen naar netwerkeigenschappen wordt gekeken worden bepaalde aspecten van robuustheid buiten beschouwing gelaten. Dit is dus een minder nauwkeurige methode dan methodes die gebruik maken van statische of dynamische modellen. Deze laatste vorm van modellering is het meest nauwkeurig, maar neemt ook de meeste rekentijd in beslag. Uiteraard hebben de verschillende methodes hun specifieke voor- en nadelen. In de categorie dynamische modellen heeft MARPLE-e bijvoorbeeld en-route routekeuze wat een voordeel is als tenminste informatie beschikbaar is over het routekeuzegedrag van reizigers bij incidenten. Indy in combinatie met de marginal incident computation module (MIC) heeft daarentegen bijvoorbeeld weer het voordeel dat nadat eenmalig een volledige modelrun met Indy is uitgevoerd, binnen enkele minuten een paar honderd incidenten kunnen worden doorgerekend. Een uitgebreide toelichting op de genoemde methodes is onder andere te vinden in (Corthout et al., 2009), (Meeuwissen et al., 2004), (Yperman, 2007), (Li, 2008).

	Geen routekeuze	En-route routekeuze	Vaste routekeuze	Nieuw evenwicht
laag	<ul style="list-style-type: none"> • Kentallen • Kwetsbaarheidsindicator 			
Rekentijd	Statisch		<ul style="list-style-type: none"> • SMARA • LMS-BT • Robuustheidscanner 	SMARA
	Dynamisch		MARPLE-e <ul style="list-style-type: none"> • Indy (evenwicht + marginal incident computation) • Indy (evenwicht + 1 iteratie) • Indy (evenwicht + verschuiving routealternatieven + vaste routekeuze) 	Indy (nieuw evenwicht)
hoog				hoog

Figuur 5: Bestaande methodes voor het modelleren van robuustheid.

4. Conclusies

In dit paper is een overzicht gegeven van verschillende in Nederland gebruikte definities, indicatoren en meetmethodes voor robuustheid. Uit het overzicht blijkt dat er nog geen eenduidige beslissing is genomen over welke definities, indicatoren en meetmethodes het best gebruikt kunnen worden. Het is zelfs de vraag of een keuze gemaakt kan worden tussen alle indicatoren, omdat ze allemaal een ander aspect van robuustheid laten zien. In praktijk zal echter toch altijd gekozen moeten worden. Bij de keuze van indicatoren en methodes is het van belang dat zoveel mogelijk aspecten van robuustheid beschouwd worden. Fileterugslag en alternatieve routes zijn de twee belangrijkste aspecten hiervan. Bij voorkeur moeten de indicatoren en methodes rekening kunnen houden met de ontwikkeling van files over de tijd in de situatie met en zonder verstoring. De mate van file en de locatie van de file zijn hierbij van belang. Dit betekent dat de te gebruiken methode met fileterugslag rekening moet kunnen houden. De aanwezigheid en het gebruik van alternatieve routes zijn het tweede belangrijke aspect. Tot op heden is het echter heel lastig om dit goed te modelleren, omdat weinig bekend is over het gebruik van alternatieve routes bij verstoringen. Het is daarom aan te bevelen om meerdere vormen van routekeuze toe te passen, om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de range waarin de resultaten kunnen liggen. In de toekomst moeten de methodes voor het kwantificeren van robuustheid verder uitgewerkt worden om goed onderbouwde beslissingen te kunnen nemen over de te nemen maatregelen om het wegennetwerk robuuster te maken.

Referenties

- Bovy, P.H.L., Traffic flooding the low countries: how the Dutch cope with motorway congestion, *Transport Reviews*, Vol. 21, No. 1, pp 89-116, 2001.
- Corthout, R., C.M.J. Tampère, L.H. Immers, Marginal incident computation: an efficient algorithm to determine congestion spillback due to incidents, TRB 2009 Annual Meeting CD-ROM.
- Kraaijeveld, R., afstudeeronderzoek 'Onderzoek naar de identificatie van kwetsbare wegvakken', 2009.
- Li, M., Robustness Analysis for Road Networks, Trail thesis series, 2008.
- Meeuwissen, A.M.H., Snelder, M., Schrijver, M. (2004), 'Statistische analyse variabiliteit reistijden voor SMARA', TNO Inro 2004-31.
- Newell, G.F. (1993) A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Part I: General theory, Part II: Queuing at freeway bottlenecks, Part III: Multi-destination flows, *Transportation Research* 27B, 281-313.
- Rijkswaterstaat, 'De Robuustheidsscanner, Op zoek naar zwakke schakels in een netwerk' in 'Verkeer & Vervoer, Modellen', 11e jaargang, nummer 34, februari 2006.
- Schoemakers, A., 2005, "LMS-BT: betrouwbaarheid in de toekomst ramen", bijdrage aan brochure Verkeer & Vervoer Modellen van Rijkswaterstaat, februari 2005.
- Schrijver, J., B. Egeter, B. Immers, and M. Snelder, Visie Robuust Wegennet ANWB. TNO-rapport 2008-D-R0661/C, Delft, 2008.
- Snelder, M., J. Schrijver, R. Landman, J. Mak, M. Minderhoud, De kwetsbaarheid van Randstedelijke vervoernetwerken uit verkeerskundig perspectief, TNO-rapport 2008-D-R0882/A, Delft, 2008.
- Yperman I, The Link Transmission Model for Dynamic Network Loading, Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Ingenieurs Wetenschappen, Afdeling Verkeer en Infrastructuur, Leuven, June, 2007.