

De begrippen betrouwbaarheid en robuustheid nader verklaard

**Maike Snelder
Ben Immers
Isabel Wilmink**

TNO Inro
Postbus 6041
2600 JA Delft

m.snelder@inro.tno.nl
b.immers@inro.tno.nl
i.wilmink@inro.tno.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2004,
25 en 26 november 2004, Zeist

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING.....	1
2	BETROUWBAARHEID VAN REISTIJD.....	2
3	BETROUWBAARHEID IN DE LITERATUUR.....	4
4	VERSTORINGEN.....	7
5	ROBUUSTHEID.....	9
6	CONCLUSIES.....	15
7	LITERATUURVERWIJZING.....	16

Samenvatting

De begrippen betrouwbaarheid en robuustheid nader verklaard

Betrouwbaarheid van reistijd wordt steeds belangrijker geacht. Dit blijkt onder andere uit het feit dat vanuit de politiek eisen worden gesteld aan deze betrouwbaarheid. In de literatuur zijn voor betrouwbaarheid meerdere definities en indicatoren te vinden. Deze zijn echter vaak niet eenduidig gedefinieerd en daardoor niet direct toepasbaar. In deze paper geven wij aan op welke punten de definities en indicatoren verbeterd kunnen worden. Daarnaast beschrijft deze paper waar ons inziens de betrouwbaarheid van reistijd door wordt bepaald. De robuustheid van het netwerk is één van de factoren die daarbij van belang is. Dit aspect van betrouwbaarheid is tot nu toe onderbelicht gebleven. We gaan in op de volgende kenmerken van een netwerk die de robuustheid bepalen: redundantie, compartimentering, veerkracht en aanpassingsvermogen. Van deze begrippen wordt toegelicht wat ze inhouden en waarom ze goed zijn voor de robuustheid van een netwerk en daarmee de betrouwbaarheid van reistijd. Een beschrijving alleen is niet voldoende om kwantitatieve uitspraken te kunnen doen, daarom geven we een eerste aanzet voor indicatoren waarmee we de verschillende aspecten van robuustheid zouden kunnen meten.

Summary

A clarification of the terms reliability and robustness

More and more, reliability of travel times becomes an important issue. Policy plans are currently focusing on this issue. Several definitions and indicators for reliability can be found in literature. The problem is that these definitions and indicators are not always as clear as we would like them to be. In this paper we explain on which points the definitions and indicators must be improved in order to make them directly applicable. Further, little is known about the factors on which reliability depends. In particular, not much is known about the relationship between robustness of networks and reliability of travel times. This paper describes our point of view on reliability and all the factors that determine the reliability of travel times. Robustness is one of them. We go into more detail about the following aspects of robustness: redundancy, interdependency, resilience and flexibility. The meaning of these terms as well as their relevance for the robustness of networks is explained. We will also present some indicators which make it possible to measure these aspects of robustness. This is only a first attempt; further research on this subject is needed.

1 INLEIDING

In de meest recente versie van de Nota Mobiliteit (versie 21 juni 2004) kunnen we het volgende lezen:

"Het Rijk heeft voor de betrouwbaarheid van reistijd de ambitie dat in 2020 in de spits 95% van de verplaatsingen op tijd is, dwz dat voor de kortere afstanden (tot 50 minuten reistijd) de werkelijke reistijd niet meer dan 20% afwijkt van de verwachte reistijd. Bij verplaatsingen van 50 minuten en meer is de afwijking tussen realisatie en verwachting niet meer dan 10 minuten."

Uit dit citaat spreekt een duidelijke ambitie, maar er dient nog wel het een en ander uitgewerkt te worden. Wat is de verwachte reistijd? De gemiddelde reistijd, de free flow reistijd, de mediaan? En over welke periode berekend? In de zomervakantie is de verwachte reistijd een andere dan in november. Ook hoe het beleidsbegrip dient te worden geoperationaliseerd is nog niet duidelijk.

Deze CVS-bijdrage probeert meer duidelijkheid te scheppen over het begrip betrouwbaarheid van reistijd, over hoe een robuust transportnetwerk hieraan kan bijdragen, over wat robuustheid dan wel inhoudt en hoe betrouwbaarheid en robuustheid gemeten kunnen worden. Want als er ambities zijn op het vlak van betrouwbaarheid van reistijd, en regio's aan de slag willen om hun netwerken robuuster en veerkrachtiger te maken, dan moet wel duidelijk zijn hoe deze ambities bereikt kunnen worden (een *ontwerp*vraag) en hoe bepaald kan worden of de ambities bereikt zijn of zullen worden (een *evaluatie*vraag).

Lange discussies zijn gevoerd om te komen tot een kader waarin betrouwbaarheid en robuustheid passen (hoofdstuk 2). In de literatuur is gezocht naar definities en indicatoren van betrouwbaarheid en robuustheid. Er zijn er diverse; sommige zeer bruikbaar, andere vooral voer voor verdere discussie. We geven een aantal indicatoren die gebruikt kunnen worden om de betrouwbaarheid van reistijd te kwantificeren (hoofdstuk 3).

Betrouwbaarheid en robuustheid worden op allerlei manieren 'bedreigd' door verstoringen in vraag en aanbod. Naast de directe effecten willen we ook indirecte effecten als 'capacity drop' en 'blocking back' aan de orde laten komen (hoofdstuk 4), omdat deze (vaak moeilijk te bepalen) effecten veel invloed hebben op robuustheid. Tenslotte komt robuustheid zelf aan de orde: wat

zijn ingrediënten voor een robuust netwerk en hoe kan de mate van robuustheid gemeten worden (hoofdstuk 5)? Hierna volgen nog conclusies en literatuurverwijzingen.

2 BETROUWBAARHEID VAN REISTIJD

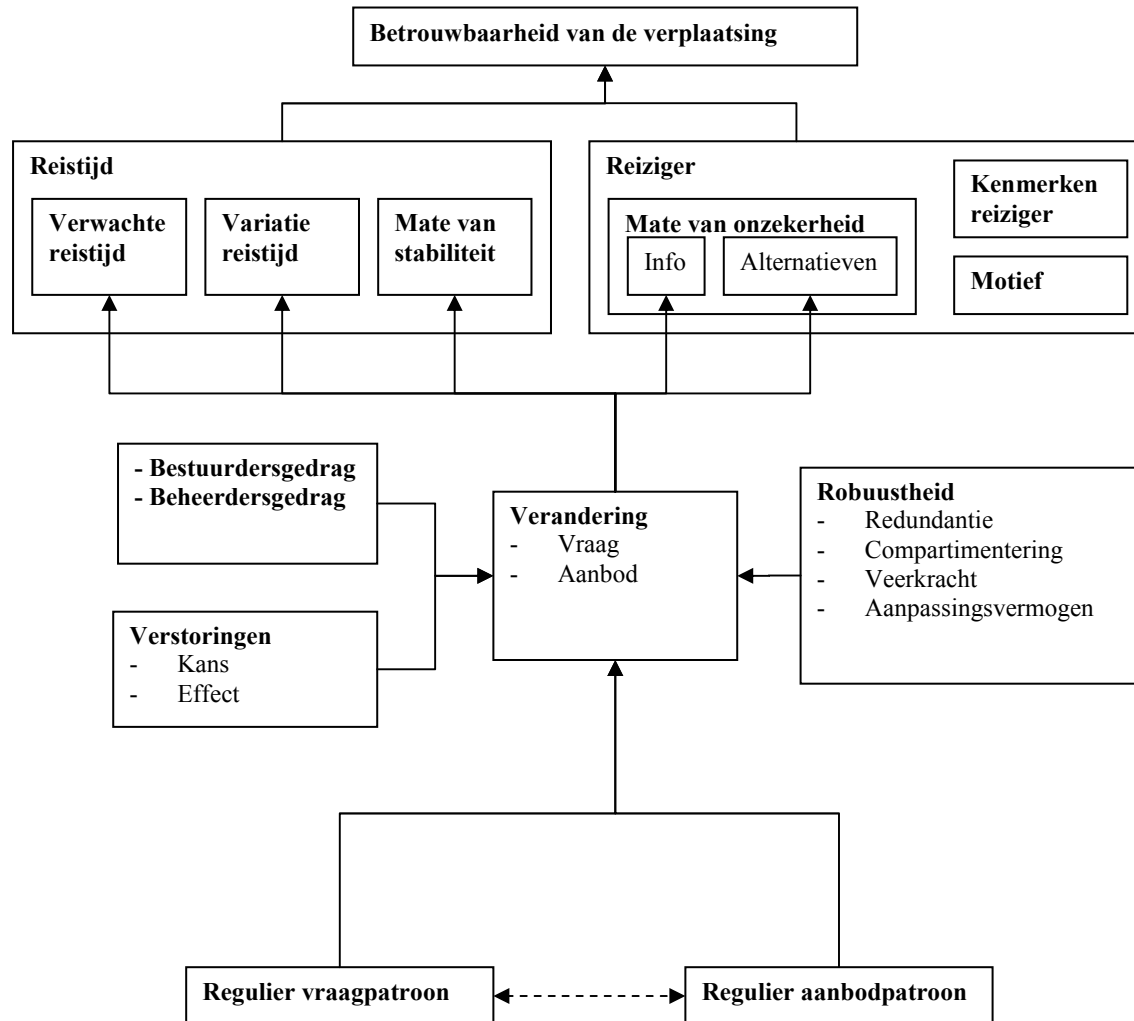
De reiziger is geïnteresseerd in de betrouwbaarheid van de afwikkeling van zijn of haar verplaatsing. In dit hoofdstuk geven we aan wat betrouwbaarheid van reistijd volgens ons betekent en geven we aan van welke factoren deze betrouwbaarheid afhankelijk is.

De betrouwbaarheid van reistijd is de mate waarin een reiziger met een bepaalde zekerheid zijn reistijd kan schatten. Deze wordt mede bepaald door de waarde die de reiziger aan die zekerheid hecht.

De zekerheid wordt bepaald door de verwachte reistijd, de variatie in reistijd, de stabiliteit van de reistijd, de informatie waarover de reiziger beschikt en de alternatieven waar de reiziger gebruik van kan maken. In hoofdstuk 3 zullen we de begrippen verwachte reistijd en variatie van reistijd toelichten. Met stabiliteit bedoelen we 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’ vermijdt men bij voorkeur. 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 geïnformeerd wordt over de omvang van de vertraging en/of er alternatieven beschikbaar zijn om de verplaatsing voort te zetten.

Met de zin “Deze wordt mede bepaald door de waarde die de reiziger aan die zekerheid hecht”, bedoelen we dat niet iedere reiziger een vertraging op dezelfde manier waardeert. De waardering is onder andere afhankelijk van de kenmerken van de reiziger en het reismotief. Dit onderwerp zullen we in deze bijdrage niet verder uitdiepen, omdat hier relatief weinig over bekend is en we de nadruk willen leggen op de andere factoren die betrouwbaarheid beïnvloeden.

In figuur 1 zijn schematisch de belangrijkste factoren weergegeven die de betrouwbaarheid van de reistijd beïnvloeden.



Figuur 1: betrouwbaarheid van reistijd.

De reistijd (verwachting, variatie en stabiliteit) en de mate van onzekerheid hangen af van de door verstoringen veroorzaakte veranderingen in vraag en aanbod. De robuustheid van het netwerk en het gedrag van bestuurders 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. Het gedrag van bestuurders is eveneens van belang, omdat zij uiteindelijk beslissen hoe ze de verplaatsing afwickelen (bestemming, vertrektijdstip, vervoerswijze, route,...). Stel dat als gevolg van een incident ergens een weg geblokkeerd is en dat er alternatieve routes hiervoor beschikbaar zijn. Het gebruik ervan kan om meerdere redenen beperkt zijn. Als de beheerder de

reiziger niet op de hoogte stelt van de blokkade of de beschikbaarheid van het alternatief, zal de reiziger daar geen gebruik van maken. Maar het kan ook zijn dat het alternatief niet gebruikt wordt omdat de bestuurder niet bereid is om van de gekozen route af te wijken.

Het schema van figuur 1 is niet volledig. Om het overzicht te bewaren zijn enkele terugkoppelingen en ‘blocking back’ effecten en de effecten van een ‘capacity drop’ niet in het schema opgenomen. In hoofdstuk 4 komen we op de betekenis en het effect van deze laatste twee begrippen terug.

3 BETROUWBAARHEID IN DE LITERATUUR

In de afgelopen tien jaar is er steeds meer onderzoek naar de betrouwbaarheid en robuustheid van wegennetwerken verricht. De nadruk lag meestal op betrouwbaarheid. Er zijn in de literatuur veel verschillende definities van betrouwbaarheid te vinden. In diverse onderzoeken zijn ook kwantitatieve maten voor betrouwbaarheid gedefinieerd en zijn methodes en modellen (bijvoorbeeld SMARA, zie (Meeuwissen et al., 2004)) beschreven waarmee deze indicatoren daadwerkelijk bepaald kunnen worden. Het onderzoek naar robuustheid is veel minder uitgebreid. Veelal worden robuustheid en betrouwbaarheid direct aan elkaar gekoppeld en wordt betrouwbaarheid als de belangrijkste indicator voor robuustheid beschouwd. In dit hoofdstuk geven we een overzicht van definities en indicatoren van betrouwbaarheid en beschrijven we de toepasbaarheid van deze indicatoren.

Vooraf in (Berdica, 2002) is een duidelijk overzicht te vinden van het tot dan toe verrichte onderzoek naar de kwetsbaarheid (dit wordt als synoniem van robuustheid gezien) van netwerken. Er worden definities gegeven van kwetsbaarheid en alle daaraan gerelateerde begrippen en er wordt beschreven welk onderzoek nu loopt en wat nog gedaan zou moeten worden. Hier geven we de beschrijvingen die wij het interessantst vinden. Meer definities zijn te vinden in onder andere (Husdal, 2004) en (D’Este et al., 2003).

In (Berdica, 2002) en (Chen et al., 2002) wordt het begrip betrouwbaarheid uitgesplitst naar betrouwbaar van connectiviteit, betrouwbaarheid van de capaciteit en betrouwbaarheid van reistijd. De eerste term is onafhankelijk van de capaciteit en de intensiteit en geeft alleen aan of een bestemming wel of niet bereikt kan worden. De tweede term gaat uit van een vaste vraag en geeft aan of de capaciteit onder wisselende omstandigheden voldoende is om de vraag ‘soepel’ te kunnen verwerken. Bij de laatste term is de reistijd van doorslaggevend belang. Hierbij gaat het er om dat een bestemming binnen een bepaalde tijd bereikt kan worden bij zowel variatie in vraag als variatie in aanbod. Hieronder geven we de definities zoals deze in (Chen et al., 2002) zijn vermeld. We benadrukken dat ook in andere papers deze begrippen allemaal of afzonderlijk (in iets andere vorm) vermeld zijn.

Definities (Chen et al., 2002)

- *Connectivity reliability* is concerned with the probability that the network nodes remain connected.
- *Capacity reliability* is defined as the probability that the maximum network capacity is greater than or equal to a required demand level when arc capacity is subject to random variations.
- *Travel time reliability* is concerned with the probability that a trip between a given OD pair can be made successful within a specified interval of time.

Maar het sec bepalen van een kans dat een verplaatsing gemaakt kan worden wordt vaak niet voldoende gevonden. In (Hilbers et al., 2004) wordt een onderscheid gemaakt naar objectieve en subjectieve betrouwbaarheid. Hier worden de begrippen ervaringsbetrouwbaarheid en imagobetrouwbaarheid genoemd en wordt benadrukt dat verschillende reizigers reistijd en variatie in reistijd anders kunnen ervaren. In (Nicholson et al., 2003) is toegelicht dat de mate van kennis bij reizigers over het transportsysteem mede bepalend is voor het effect van verstoringen.

Indicatoren

De definities die er te vinden zijn, inclusief degene die in deze bijdrage genoemd worden, laten nog veel ruimte voor interpretatie. Om een oordeel uit te kunnen spreken over de

betrouwbaarheid van reistijd dienen bij de definities indicatoren vastgesteld te worden, waarmee kwantitatief en/of kwalitatief aangeven kan worden hoe goed een netwerk ‘scoort’. In enkele studies is betrouwbaarheid al geoperationaliseerd. Als voorbeeld noemen we (Hilbers et al., 2004). Hierin is een overzicht te vinden van meerdere interessante betrouwbaarheidsmaten. Deze maten zijn ingedeeld in 3 groepen:

- Maten gebaseerd op een spreiding in reistijd.
- Maten gebaseerd op verschillen tussen de reistijden met vertraging en verwachte reistijd
- Maten gebaseerd op de kans om ‘op tijd’ te komen. Dit wordt meestal uitgewerkt als de kans om aan te komen binnen een reistijd die kleiner is dan de verwachte reistijd plus een bepaalde, maximaal aanvaardbaar geachte vertraging.

Als voorbeelden van indicatoren worden de spreiding van de reistijden (uitgedrukt m.b.v. standaarddeviatie en de variatiecoëfficiënt), de ellende-index en de buffertijdindex genoemd. De ellende-index (‘misery index’) is gedefinieerd als: (gemiddelde reistijd langste 20% ritten - gemiddelde reistijd alle ritten) / (gemiddelde reistijd alle ritten). De buffertijdindex berekent hoeveel extra tijd nodig is om in 95 procent van de verplaatsingen op tijd te komen.

Benadrukt wordt dat het nodig is om precies te specificeren wat de verwachte reistijd is. Dit kan bijvoorbeeld het gemiddelde, de mediaan, de modus of de free-flow reistijd zijn. De keuze voor een te hanteren indicator hangt af van het doel waarvoor deze gebruikt wordt. Op afzonderlijke links zijn de standaarddeviatie en variatiecoëfficiënt meer geschikt. Bovendien zijn deze maten meer geschikt voor wegbeheerders dan voor gebruikers. De ellende-index en buffertijdindex zijn meer geschikt voor de reiziger, omdat ze direct bruikbare informatie over de reistijd (of vertrekmoment) bieden. Bovendien is het met deze maten makkelijker om iets over een route te zeggen. De mate van stabiliteit zegt daarentegen meer over de kwaliteit van het totale netwerk. De toename van de totale reistijd in het netwerk afgezet tegen de toename van het aantal verplaatsingen kan hiervoor als indicator gebruikt worden.

Gebruik van indicatoren in de praktijk

Van belang is dat een indicator helder is, dat de indicator de juiste informatie geeft over het doel waarvoor hij gebruikt wordt en dat de indicator ook daadwerkelijk toepasbaar is. Dit is nog lang

niet altijd het geval. Vooral het aspect van helderheid over een indicator ontbreekt vaak in de in de literatuur genoemde indicatoren. De verwachte reistijd wordt bijvoorbeeld vaak genoemd zonder te specificeren wat dit precies inhoudt. In (Nicholson et al., 2003) is beschreven dat men de indicator *variantie* vaak verkeerd interpreteert en dus dient deze niet altijd het doel waarvoor hij gebruikt wordt. Het is daarom van belang om afhankelijk van het doel waarvoor de indicator gebruikt wordt een welafgewogen keuze te maken.

4 VERSTORINGEN

Verstoringen zorgen ervoor dat vraag en aanbod af kunnen wijken van het reguliere vraag en aanbodpatroon. Dit roept direct de vraag op wat het reguliere vraag- en aanbodpatroon is. Net als bij de verwachte reistijd is dit een kwestie van definitie.

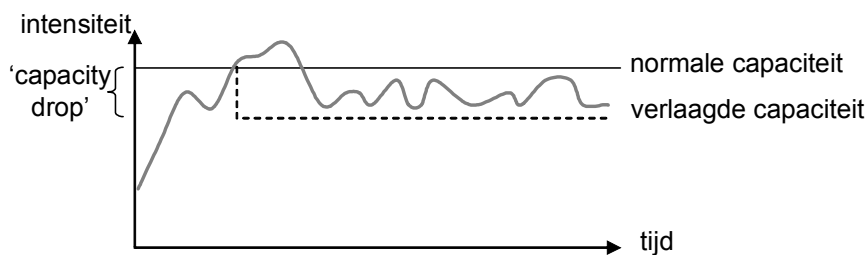
Bij het ontwerpen van wegen of bij de evaluatie van de kwaliteit van bestaande wegennetwerken moet rekening worden gehouden met verstoringen. Het kan zijn dat de capaciteit onder reguliere omstandigheden het vraagpatroon (de knooppunt- en schakelbelastingen) ruimschoots overschrijdt, maar dat er bij verstoringen grote problemen ontstaan. Zowel de kans op verstoringen als het effect van de verstoringen is van belang. Verstoringen die een heel groot effect hebben, maar zelden voorkomen (zoals aardbevingen in Nederland) hebben bijvoorbeeld een veel kleiner effect op de betrouwbaarheid dan verstoringen die veel vaker voorkomen en een redelijk groot effect hebben (bijvoorbeeld regenval). In (Wilmink et al., 2003) is beschreven wat voor soort verstoringen zoal optreden en hoe deze zijn in te delen naar hun aard: zijn ze regulier of niet, en zijn ze voorspelbaar of niet. Deze indeling kan gebruikt worden om vast te stellen welke afwikkelingskwaliteit (bijvoorbeeld uitgedrukt in betrouwbaarheid van reistijd) gewenst is onder welke omstandigheden (uiteindelijk een kwestie van kosten en baten).

Het effect van de verstoring op vraag en aanbod hangt af van de eigenschappen van de verstoringen zelf (zoals duur en locatie), maar ook van twee andere fenomenen die het effect kunnen vergroten – ‘blocking back’ en ‘capacity drop’ (zie ook Immers, 2004a):

- *Blocking back (spill-back)*: Congestie op een wegvak heeft tot gevolg dat stroomopwaarts voertuigen tot stilstand worden gedwongen. De staart van de file kan in een dergelijk geval ook andere routes blokkeren die niet overbelast zijn. In de nabijheid van verkeersknooppunten treedt dit verschijnsel veelvuldig op. Het ‘blocking back’ effect kan leiden tot plotselinge en omvangrijke veranderingen in de reistijd op bepaalde relaties en, uiteindelijk, tot stilstand van het verkeer op allerlei andere delen van het netwerk.
- *Capacity drop*: Bij overschrijding van de kritische dichtheid kan een significante terugval in de maximaal haalbare capaciteit van het wegvak optreden. Dit verschijnsel wordt "capacity drop" genoemd. Op een rijstrook van een autosnelweg kan de maximaal haalbare capaciteit dalen van 2200 à 2400 pae/uur naar 1800 pae/uur. Deze gereduceerde capaciteit blijft voortbestaan zolang als de congestie aanhoudt. Een gevolg van de capacity drop is dat de file minder snel oplost.

Deze twee fenomenen zijn wel te kwantificeren met behulp van modellen, maar dit is niet eenvoudig. Toch komen er, mede omdat er steeds meer belang aan het verkrijgen van inzicht in dit soort effecten gehecht wordt, steeds meer modellen beschikbaar waarmee het mogelijk is blocking back effecten mee te nemen. Filmpjes van de verspreiding van congestie over het netwerk kunnen dan heel mooi duidelijk maken waar het netwerk minder robuust is.

Het modelleren van capacity drops is nog niet gangbaar. Maar de effecten ervan kunnen groot zijn, zoals figuur 2 illustreert. Als de intensiteit boven de capaciteit komt en file ontstaat, en daarbij ook de capaciteit terugvalt, kan het lang duren voor de file oplost – daarvoor moet de verkeersvraag dalen tot onder de verlaagde capaciteit! In het getoonde voorbeeld neemt de congestie feitelijk alleen maar toe, omdat de intensiteit boven de verlaagde capaciteit blijft.



Figuur 2: Capacity drop.

5 ROBUUSTHEID

De robuustheid bepaalt, samen met verstoringen van het reguliere vraag- en aanbodpatroon en het gedrag van bestuurders en beheerders, de gerealiseerde vraag en het gerealiseerde aanbod. Dit bepaalt uiteindelijk de betrouwbaarheid van reistijd. Het is daarom van belang om bij het bepalen van de betrouwbaarheid rekening te houden met de robuustheid.

Definitie

Onder robuustheid verstaan we het vermogen om de functie waarvoor het netwerk ontworpen is te blijven vervullen, ook in situaties die sterk afwijken van de reguliere gebruikersomstandigheden.

Organische, biologische systemen kenmerken zich door een hoge graad van robuustheid. Zij realiseren die robuustheid voornamelijk door de aanwezigheid van een hoge mate van redundantie en spreiding van functies. Daarnaast blijken organische systemen bestand te zijn tegen ongunstige omgevingscondities omdat zij beschikken over het vermogen zich snel te herstellen van een tijdelijke overbelasting en omdat zij in staat zijn zich geleidelijk aan te passen aan veranderende omstandigheden over de langere termijn. Het is interessant deze noties toe te passen op het transportsysteem omdat het transportsysteem zelf kenmerken vertoont van een levend, zelforganiserend systeem.

De robuustheid van een transportsysteem kan door het nemen van een aantal maatregelen worden beïnvloed. Die maatregelen behelzen het aanbrengen van een zekere *redundantie* of reservecapaciteit in het systeem en het aanbrengen van een mate van *compartimentering* in het systeem om te verhinderen dat een lokale verstoring zich over het gehele systeem verspreidt. Tot slot is ook in een transportsysteem *veerkracht en aanpassingsvermogen* van belang. In het vervolg van dit hoofdstuk zullen we beschrijven wat deze drie aspecten inhouden, waarom ze goed zijn voor de robuustheid van een netwerk (en daarmee voor de betrouwbaarheid van reistijd) en met welke indicatoren ze gemeten kunnen worden.

5.1 Redundantie

De robuustheid van een systeem kan worden vergroot door een zekere reservecapaciteit in het systeem aan te brengen. Deze reservecapaciteit wordt veelal aangeduid met de term redundantie.

De reservecapaciteit kan op verschillende niveaus en op verschillende manieren in het systeem worden ingebouwd. De volgende niveaus kunnen worden onderscheiden:

- Op strategisch niveau: afstemming tussen activiteitenpatroon en netwerkstructuur. Op dit niveau is het voor de robuustheid van het transportsysteem van belang dat vermeden wordt dat men (gedurende een kortere periode) met sterk geconcentreerde verkeersstromen wordt geconfronteerd. Dit fenomeen wordt veelal veroorzaakt door de inplanting van omvangrijke mono-functionele activiteiten. Een voorbeeld is de strakke scheiding van woon- en werkgebieden waardoor omvangrijke pendelstromen worden opgeroepen.
- Op tactisch niveau: multimodale verknoping van netwerken en de inrichting van multimodale vervoerdiensten waardoor netwerkonderdelen en vervoerwijzen als terugvaloptie van elkaar kunnen fungeren
- Op operationeel niveau: afstemming vraag en aanbod op het verkeersnetwerk; reservecapaciteit in het netwerk, flexibilisering van de beschikbare capaciteit middels ITS en DVM-maatregelen, zelflerende eigenschappen, zelforganisatie.

Gebrek aan redundantie in een systeem kan catastrofale gevolgen hebben. De afgelopen jaren hebben wij dit o.a. kunnen waarnemen bij de distributie van elektriciteit (New York, Engeland, Italië). In Nederland heeft het gebrek aan redundantie ertoe geleid dat de betrouwbaarheid van de dienstverlening op het spoorwegnet fors aan kwaliteit heeft ingeboet.

Ook op het wegennet kan een gebrek aan redundantie grote gevolgen hebben voor de kwaliteit van de verkeersafwikkeling. Deze gevolgen zullen omvangrijk zijn indien we worden geconfronteerd met ernstige crisissituaties waarbij een snelle evacuatie van de bevolking gewenst is. Op kleinere schaal speelt het probleem echter ook bij incidenten met als gevolg omvangrijke congestie op het wegennet maar ook slechte bereikbaarheid van de incidentlocatie voor de hulpdiensten. Incidenteel voorkomende situaties als wegwerkzaamheden, extreme

weersomstandigheden en grootschalige evenementen vragen ook om een zekere redundantie in capaciteit. Tot slot kan een gebrek aan redundantie oorzaak zijn van het sneller optreden van blocking back effecten en een capacity drop.

De drie niveaus van redundantie zijn niet allemaal even eenvoudig te meten. Redundantie op strategisch niveau wordt voornamelijk bepaald door de verplaatsingsproductie en attractie van locaties, de koppeling tussen beide en de afstemming van de netwerkstructuur hierop. Deze vier aspecten moeten dan ook terugkomen in één of meerdere indicatoren. De ritproductie en attractie zijn afhankelijk van een aantal factoren zoals inwonersaantallen, onderwijs- en arbeidsplaatsen en autobezit. Voor het bepalen van de ritproductie en attractie bestaan een aantal standaardmethoden. Deze zijn bijvoorbeeld omschreven in (Immers et al., 2004b) en (Ortúzar et al., 2001). De balans tussen beide is een nog iets meer zeggende indicator. Hierbij moeten de vertrekken en aankomsten uitgesplitst worden naar bijvoorbeeld motief. Als we een stap verder gaan kunnen we met een vervoermodel een inschatting maken van het aantal mensen dat naar een bepaalde locatie toekomt of daarvandaan vertrekt. Het verschil tussen deze aantallen en de totale capaciteit van de toe- en afvoerwegen is ook een indicator voor de mate waarin redundantie op strategisch niveau aanwezig is.

Op tactisch niveau kan als indicator genoemd worden het aantal knooppunten waar men van vervoerswijze kan verwisselen. Hoe meer van deze knooppunten en hoe beter de kwaliteit/voorzieningen op deze knooppunten, hoe beter het is voor de redundantie op tactisch niveau. Dit is met geavanceerde modellen (hypernetwerken, zie bijvoorbeeld (Carlier et al., 2003)) te bepalen.

Op operationeel niveau is de korte termijn afstemming tussen vraag en aanbod van belang. Het gaat hierbij niet alleen om de afstemming tussen vraag en aanbod onder reguliere omstandigheden, maar ook om de afstemming tussen vraag en aanbod bij verstoringen. We noemen de volgende indicatoren:

- I/C-verhouding onder reguliere omstandigheden. Wat reguliere omstandigheden zijn, moet precies gedefinieerd worden. Hiervoor geldt wederom dat dit afhankelijk is van het doel

waarvoor de indicatoren gebruikt worden. De indicator 1-I/C-verhouding is een goede maat voor de reservecapaciteit. Hoe groter dit verschil (geldt alleen voor positieve verschillen), hoe beter het netwerk om kan gaan met schommelingen in vraag en aanbod en hoe minder snel een ‘capacity drop’ zal optreden.

- De rijstrooklengte per oppervlakte-eenheid is ook een indicator voor de mate van redundantie. Voor deze indicator in het bijzonder, maar ook voor alle andere genoemde indicatoren geldt dat gespecificeerd moet worden op welk niveau ze bekeken worden (schakelniveau, relatie- of netwerkniveau).
- De flexibiliteit van het aanbod kan bepaald worden door het aantal mogelijkheden tot aanpassing (bijv. door middel van DVM) daartoe te tellen en de doeltreffendheid daarvan te meten. Hier hebben we nog geen duidelijke indicatoren voor. Wel is het mogelijk om met modellen de effecten van de maatregelen op reistijd te meten.

5.2 *Compartimentering*

De zwakste schakel bepaalt de sterkte van de keten. Deze wetmatigheid geldt in zekere zin ook voor de robuustheid van een netwerk: de schakel of het knooppunt met de geringste reservecapaciteit zal veelal het eerst problemen veroorzaken. Hier moeten wel enige kanttekeningen bij worden geplaatst:

- de ligging van de schakel of het knooppunt speelt een grote rol, en ook
- de omvang van de schommelingen in vraag en aanbod.

De ligging van een schakel of knooppunt heeft invloed in de zin dat in bepaalde gevallen de congestie en de onbetrouwbaarheid die daar een gevolg van zijn, beperkt blijven tot de betreffende schakel of een klein deel van het netwerk. In andere gevallen kan congestie op een centraal gelegen, unieke schakel of een knooppunt middels olievlekwerking tot gevolg hebben dat de verkeersafwikkeling op grote delen van het netwerk verstoord wordt. De olievlekwerking wordt ook bevorderd door de aanwezigheid van allerlei interacties tussen systeemonderdelen. Bij de spoorwegen, waar momenteel allerlei diensten zoals ritten van treinen en treinonderdelen, met elkaar verknoopt zijn is dit een groot probleem. Ook op de weg speelt dit steeds meer.

Voor compartimentering is het goed om:

- de capaciteit van zowel knooppunten als schakels uit te breiden.
- meerdere stelsels (bijvoorbeeld hoofdwegenet en onderliggend wegennet) operationeel te houden/maken en deze stelsel goed te verknopen.
- een capaciteitsdaling te voorkomen en de daling van de capaciteit snel te verhelpen als deze toch optreedt.
- de vraag te beïnvloeden. Dat wil zeggen dat er mogelijkheden daartoe in het netwerk ingebouwd moeten worden, zoals buffers en doseersystemen.

Mogelijke indicatoren om de mate van compartimentering te bepalen zijn:

- De knoopafstand: hoe meer knooppunten en op- en afritten er zijn (hoe kleiner de knooppuntafstand), hoe beter de verschillende stelsels met elkaar verknoot zijn. Dit betekent dat meer (alternatieve) routes voor de afwikkeling van een verplaatsing beschikbaar zijn. Tegelijkertijd zullen er sneller ‘blocking back’ effecten optreden als de knopen dicht bij elkaar liggen. Wat de optimale afstand tussen knooppunten en op- en afritten is, hangt af van aard en omvang van de verkeersvraag.
- Samenhang van verschillende stelsels (bijv. HWN en OWN). Als stelsels onafhankelijk van elkaar moeten kunnen functioneren, moeten ze wel samenhang vertonen. Er zijn verschillende connectiviteitsmaten waarmee de mate van samenhang in een netwerk van een stelsel bepaald kan worden. In (Sanders, 1998) worden bijvoorbeeld de lijnstuk-gewogen, knooppunt-gewogen en dubbel-gewogen connectiviteit genoemd. In (Hilbers et al, 1997) worden ook het percentage snelweg met parallelweg en percentage hoofdwegen parallel aan autosnelwegen genoemd. Hierin worden ook nog enkele andere indicatoren genoemd (zoals de netdichtheid), die relevant kunnen zijn.
- De kwetsbaarheid van knooppunten. Bijvoorbeeld het aantal armen per knooppunt en de capaciteit per richting, en de afstand tot andere knooppunten.

5.3 *Veerkracht en aanpassingsvermogen*

Veerkracht is het vermogen van het transportsysteem om zich, telkens weer en bij voorkeur zo snel mogelijk, te herstellen van een tijdelijke overbelasting. De veerkracht van het transportsysteem is ten zeerste gebaat bij:

- de beschikbaarheid van terugvalopties. Onder terugvalopties verstaan we alternatieve routes en alternatieve vervoerwijzen.
- de professionaliteit van de respons (goed op elkaar ingespeelde hulpverlenende instanties; samenwerking, coördinatie en communicatie).
- snelheid van de respons (snelle en adequate maatregelen).

De volgende indicatoren maken het mogelijk om uitspraken te doen over de veerkracht van een netwerk:

- benodigde tijd om een rijbaan (of rijstrook) vrij te maken na een incident. Dit zegt wat over de professionaliteit van de respons en de snelheid daarvan.
- alternatieve routes: met behulp van een kaart is het mogelijk om alternatieve routes aan te geven. Dit vormt een eerste indicatie voor de beschikbaarheid en de kwaliteit van alternatieve routes. Het is geen kwantitatieve maat, maar maakt wel meteen veel duidelijk.
- de kans dat een link gebruikt wordt. Dit zegt iets over alternatieve routes en de kwaliteit hiervan. In (D'Este, 2003) is deze indicator uitgebreid beschreven.
- alternatieve vervoerwijzen: voor indicatoren voor terugvalopties in de vorm van andere vervoerswijzen, verwijzen we naar § 5.1.

In (Immers et al., 2004c,d) wordt het verband tussen gewenste reservecapaciteit en verstoringen (omvang, ernst) en de veerkracht van het systeem verder uitgewerkt.

Aanpassingsvermogen. De robuustheid van het transportsysteem 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 de nieuwe eisen die aan het systeem gesteld worden (Een voorbeeld is het gebruik van het bestaande autosnelwegennet voor

road trains of double-stack containers). Aanpassingsvermogen kan op 3 termijnen gedefinieerd worden:

- Korte termijn: flexibele inrichting netwerk (dynamische rijstrook markering), dynamische beïnvloeding vraag (informatie).
- Middellange termijn: structuur en inrichting netwerk (terugvalopties); vraagbeïnvloeding door bijv. prijsmechanisme.
- Lange termijn: betere (flexibele) afstemming infrastructuur en RO.

Het aanpassingsvermogen op de korte termijn is nodig om redundantie te kunnen creëren. Zoals eerder is aangegeven hebben we, anders dan het tellen van het aantal mogelijkheden, nog geen duidelijke indicatoren waarmee de mate van flexibiliteit in vraag en aanbod gemeten kan worden.

Het aanpassingsvermogen op de middellange termijn is van belang om onder andere veerkracht te kunnen creëren. Aanpassingsvermogen op de lange termijn kan bereikt worden door ruimte te reserveren voor verbreding of uitbreiding van het bestaande netwerk. Een indicator hiervoor is het aantal vierkante meter beschikbare grond en in het bijzonder het aantal niet bebouwde meters grond naast wegen.

6 CONCLUSIES

Deze bijdrage tracht meer duidelijkheid te scheppen in de begrippen en mogelijke indicatoren met betrekking tot betrouwbaarheid van reistijd en robuustheid. Duidelijk is dat er grote behoefte is aan maten waarmee betrouwbaarheid en robuustheid gemeten kunnen worden. In de literatuur zijn voor betrouwbaarheid (van reistijd) meerdere definities en mogelijke indicatoren te vinden. De momenteel gehanteerde indicatoren geven echter een incompleet en niet altijd even helder beeld, aangezien de gebruikte grootheden vaak niet eenduidig gedefinieerd zijn (wat is verwachte reistijd? Dienen de beleidsmakers hierover te beslissen?) en iedere publicatie zijn eigen, net iets andere definities en indicatoren hanteert.

Met betrekking tot robuustheid is veel minder in de literatuur te vinden. Deze bijdrage geeft dan ook meer onze visie weer dan hoe hierover in brede kring gedacht wordt. Een aantal kenmerken

van robuuste netwerken (redundantie, compartimentering, veerkracht en aanpassingsvermogen) en manieren om (aspecten van) robuustheid te meten worden gegeven, maar deze dienen op korte termijn verder uitgewerkt te worden. Met verkeers- en vervoersmodellen zijn veel aspecten van robuustheid te onderzoeken, maar daarvoor dienen de modellen vaak wel verbeterd of uitgebreid te worden (routekeuze, blocking back, capacity drop, etc.).

Een aantal voor betrouwbaarheid van reistijd interessante aspecten is onderbelicht gebleven. Het is zeer de moeite waard om de waardering van onzekerheid in reistijd door reizigers te onderzoeken, evenals de effecten van bestuurders- én netwerkbeheerdersgedrag op de effecten van verstoringen. Tenslotte dient ook de rol van de beleidsmaker/bestuurder verder uitgewerkt te worden: voor een groot deel van de besproken indicatoren zijn grenswaarden nodig (bijvoorbeeld: welke reistijd is acceptabel?) die afhangen van de beleidscontext.

7 LITERATUURVERWIJZING

Berdica, K. (2002), *“An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done”*, Transport Policy, 2002, 9, pag. 117-127

Carrier, K., S. Fiorenzo-Catalano, C. Lindveld, P. Bovy (2003), *“A supernetwork approach towards multimodal travel modeling”*, in: Proceedings of the 82nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, January 12-16, 2003.

Chen, A., H. Yang, H.K. Lo, W.H. Tang (2002), *“Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results”*, Transportation Research Part B, 2002, 36, pag. 225-252.

D’Este, G.M., M.A.P. Taylor (2003), *“Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks”*, in: The Network Reliability of Transport: Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), Oxford, Pergamon, 2003.

Hilbers, H.D., I.R. Wilmink, H.P. Krolis (1997), *“Infrastructuur en Mobiliteit in de Randstad, het Ruhrgebied en de regio Antwerpen-Brussel-Gent”*, Delft, TNO Inro, Inro/VVG 1997-12, december 1997.

Hilbers, H.D., J. Ritsema van Eck, D. Snellen (2004), *“Behalve de dagelijkse files, over de betrouwbaarheid van reistijd”*, Den Haag, Ruimtelijk Planbureau, 2004.

Husdal, J. (2004), *“Reliability and Vulnerability versus Cost and Benefits”*, Molde University College, Proceedings of the second International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), 2004.

Immers, L.H., P. van Koningsbruggen (2004a), *“Het hybride karakter van verkeersmanagement”*, Position paper geschreven in opdracht van Verkeerscentrum Nederland, TNO Inro, mei 2004.

Immers, L.H., J.E. Stada (2004b), *“Verkeersmodellen”*, KU Leuven, Afdeling Verkeer en Infrastructuur, maart 2004, <http://www.kuleuven.ac.be/traffic/dwn/h111de11.pdf>

Immers, L.H., I. Yperman, J.E. Stada, A. Bleukx (2004c), *“Reliability and robustness of transportation networks; problem survey and examples”*, Paper presented at NECTAR Cluster Meeting on Reliability of Networks, Amsterdam, March 19 – 20, 2004.

Immers, L.H., J.E. Stada, I. Yperman (2004d), *“Robustness and Resilience of Transportation Networks”*, Paper presented at the Mobilita Conference, Bratislava, May, 2004.

Meeuwissen, A.H.M., M. Snelder, J.M. Schrijver (2004), *“Statistische analyse variabiliteit reistijden voor SMARA”*, Delft, TNO Inro, juli 2004, rapportnummer Inro V&V/2004-31.

Nicholson, A., J. Schmöker, M.G.H. Bell (2003), *“Assessing Transport Reliability: Malevolence and User Knowledge”*, in: The Network Reliability of Transport: Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), Oxford, Pergamon, 2003.

Nota Mobiliteit, versie 21 juni 2004.

Ortúzar, J., L.G. Willumsen (2001), *“Modelling transport”*, Chichester, John Wiley & Sons, Third Edition, 2001.

Sanders, F.M. (1998), *“Ruimtelijke inrichting”*, Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Infrastructuurplanning, oktober 1998.

Wilmink, I., A. van den Broeke, L. Berghout (2003), *“De taakverdeling tussen netwerkstructuur en verkeersmanagement”*, in: Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2003: No pay, no queue? Oplossingen voor bereikbaarheidsproblemen, Delft, CVS, november 2003.