

## **ROBUUSTHEIDANALYSE VAN OPENBAARVERVOERNETWERKEN**

Pieter de Jong\* en Rob van Nes,  
Transport & Planning, Technische Universiteit Delft

[R.vanNes@CiTG.TUdelft.NL](mailto:R.vanNes@CiTG.TUdelft.NL)

\* per 1-8-2005: Arcadis, Arnhem

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2005,

24 en 25 november 2005, Antwerpen

## **Inhoudsopgave**

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Beperkingen in de beschikbaarheid van openbaarvervoerinfrastructuur .....</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Consequenties voor het vervoeraanbod .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Gevolgen voor het gedrag van reizigers .....</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Opzet van het analysemodel.....</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>Toepassing op een theoretisch netwerk.....</b>	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek .....</b>	<b>11</b>
	<b>Literatuur.....</b>	<b>12</b>

## **Samenvatting**

### *Robuustheidsanalyse van openbaarvervoernetwerken*

Bij de analyse van openbaarvervoernetwerken wordt er vanuit gegaan dat het netwerk altijd functioneert zoals het gepland is. In werkelijkheid is vaak sprake van allerlei verstoringen die de dienstuitvoering beïnvloeden en daarmee ook de kwaliteit voor de reiziger. Deze bijdrage beschrijft een analysemodel dat de effecten voor de exploitant en de reiziger in kaart brengt van verstoringen zoals ongevallen, weersinvloeden en werkzaamheden. Hierbij worden achtereenvolgens de verstoringen zelf, de effecten voor de infrastructuur, de gevolgen voor de vervoerdiensten en de consequenties voor de reiziger bepaald. Toepassing op een theoretisch stedelijk openbaarvervoernetwerk laat zien dat de consequenties voor de reiziger substantieel kunnen zijn en dat rekening houden met robuustheid en betrouwbaarheid tot andere keuzen voor optimale openbaarvervoernetwerken kan leiden.

## **Summary**

### *Robustness analysis of public transport networks*

For the analysis of public transport networks it is assumed that the network performs as planned. In reality, however, there are many disturbances influencing public transport services as well as service quality for the traveller. This paper describes a tool that describes the consequences for operators and travellers of disturbances such as incidents, weather, and road works. The tool describes the disturbances themselves, the consequences for the infrastructure availability, the impact on the public transport services and assesses the outcome for travellers. Application for a theoretical public transport network shows that the consequences for travellers of such disturbances might be quite substantial, and that accounting for robustness and reliability might lead to different optimal network structures.

## **1 Inleiding**

Bij de analyse van openbaarvervoernetwerken worden evaluatiemodellen gebruikt met een Herkomst- en Bestemmingstabel (HB-tabel) en een beschrijving van het openbaarvervoernetwerk. Beide worden als een vast gegeven beschouwd. In werkelijkheid is dat natuurlijk niet zo. De vervoervraag varieert van uur tot uur en van dag tot dag. Het vervoersaanbod zelf varieert ook, hetzij door organisatorische zaken in de dienstuitvoering zelf, dan wel door veranderingen in de beschikbaarheid van de infrastructuur. Kortom, zowel de vervoervraag en het vervoeraanbod zijn in werkelijkheid stochastisch. Vraag is wat de invloed van deze stochastiek is op de beoordeling van vervoernetwerken. Voor wegennetwerken is deze vraag vaker bekeken, bijvoorbeeld in Bell (1999), Yin & Ieda (2002) en Yamada et al. (2004). Voor openbaarvervoernetwerken is hierover minder bekend. In het onderzoeksprogramma van het Transport Research Centre Delft, met als motto Towards Reliable Mobility, is dit dan ook een van de onderzoeksvragen die voor de komende tijd op de agenda staat.

Als eerste stap is nader gekeken naar wat het effect is voor de exploitant en de reiziger als rekening wordt gehouden met feit dat infrastructuur niet altijd beschikbaar is, bijvoorbeeld als gevolg van ongevallen of werkzaamheden (De Jong, 2005). Deze bijdrage gaat in op de eerste resultaten van deze analyse. Achtereenvolgens komen aan de orde: de soorten verstoringen die tot een beperkte beschikbaarheid van de infrastructuur kunnen leiden, de manier waarop die het vervoeraanbod en daarmee ook het reizigergedrag beïnvloeden, de opzet van een analysemodel en de resultaten voor een theoretisch stedelijk netwerk. De bijdrage besluit met voorlopige conclusies en suggesties voor verder onderzoek.

## **2 Beperkingen in de beschikbaarheid van openbaarvervoerinfrastructuur**

Het openbaarvervoeraanbod dat bij netwerkevaluaties in beschouwing wordt genomen, is het aanbod conform de geplande dienstregeling. Voor het realiseren van deze geplande dienstregeling is het vereist dat de benodigde infrastructuur beschikbaar is. Openbaar vervoer maakt vaak gebruik van infrastructuur die ook door andere gebruikers wordt gebruikt. Zelfs bij tramsystemen zijn er nog steeds veel kruisingen met ander wegverkeer. Daarnaast vraagt infrastructuur onderhoud en is de infrastructuur onderdeel van een ruimtelijke omgeving waar

werkzaamheden plaatsvinden, bijvoorbeeld riolering, kabels en leidingen, maar ook bouwwerkzaamheden. Weersomstandigheden kunnen de beschikbaarheid van infrastructuur eveneens beïnvloeden: omgewaaide bomen, kapotte bovenleiding, glad wegdek, stroomuitval, enzovoort. Sommige van deze verstoringen zijn onvoorspelbaar terwijl andere planbaar zijn, zoals werkzaamheden. Verder zijn er verstoringen die onderling zijn gecorreleerd: bij slecht weer gebeuren er meer ongelukken. Ook kan nog een onderscheid worden gemaakt naar de vervoertechniek. Bovenleidingen zijn voor bussen (m.u.v. trolleybussen) niet relevant, terwijl metrosystemen in principe geen conflictpunten met andere weggebruikers hebben.

Verstoringen kunnen ingedeeld worden op basis van hun frequentie van voorkomen, de duur van de verstoring, de locatie van de verstoring en seizoensafhankelijkheden. Dit levert de indeling op die te zien is in Tabel 1.

*Tabel 1: Indeling verstoringen*

Type verstoring	Frequentie		Duur			Locatie		Seizoensinvloeden	
	Regelmatig	Zelden	1 á 2 uur	Dagdelen	Dagen of weken	Wegvak of kruispunt	Netwerk deel	Wel	Niet
Ongevallen									
Storm									
IJzel									
Sneeuw									
Onweer									
Werkzaamheden									

In deze indeling valt duidelijk op dat ongevallen, weersinvloeden en werkzaamheden drie verschillende typen verstoringen zijn. Bij weersinvloeden kan verder nog onderscheid worden gemaakt naar seizoensinvloeden.

Ervaring bij de HTM leert dat er per jaar zo'n 2500 ongevallen plaatsvinden waarvan een bus of tram hinder ondervindt. Bij circa 12 % van de ongevallen is sprake van letselongevallen en kan een verstoring relatief langer duren. Als gevolg van vrije banen hebben trams in principe minder last van dergelijke ongevallen. De tweede categorie, weersinvloeden, zijn duidelijk anders van aard. Storm, ijzel, sneeuw en onweer komen regelmatig voor. Echter omstandigheden die de beschikbaarheid van de infrastructuur beïnvloeden zijn minder

frequent, per weertype circa 2 keer per jaar. Uitzondering is een dik pak sneeuw dat minder vaak voorkomt. Bij werkzaamheden is het beeld diffuus. Omdat deze planbaar zijn, kunnen ze vaak zo worden georganiseerd dat de infrastructuur desondanks voor het openbaar vervoer beschikbaar blijft. Aan de andere kant zijn er ook werkzaamheden die erg lang kunnen duren en daarmee veel hinder voor het openbaar vervoer veroorzaken.

### **3 Consequenties voor het vervoeraanbod**

Met het hiervoor geschetste beeld van typen verstoringen die de beschikbaarheid van de infrastructuur bepalen, is het vervolgens de vraag wat de invloed is op het vervoeraanbod. In feite zijn er twee typen effecten:

- De vervoerdienst valt uit. Dit kan zijn een gehele lijn zijn, of een deel van de lijn, afhankelijk van de locatie van de verstoring vallen één of twee delen uit.
- Er wordt omgereden. Bij bussen kan dit een kort straatje om zijn, terwijl bij trams de mogelijkheden om om te rijden sterk worden beperkt door het grovere railinfrastructuurnetwerk.

Een vervoerbedrijf zal er naar streven de vervoerdienst zo goed mogelijk te verzorgen. Dat betekent in het algemeen dat omrijden de voorkeur zal hebben. Indien dat echter niet mogelijk is door het ontbreken van infrastructuur of door de grootte van de verstoring, dan is uitval van de vervoerdienst onvermijdelijk. Dit kan gebeuren bij meerdere verstoringen op één lijn en vooral bij weersinvloeden.

### **4 Gevolgen voor het gedrag van reizigers**

Reizigers die worden geconfronteerd met een gewijzigd vervoeraanbod hebben in het algemeen weinig mogelijkheden hun gedrag te wijzigen. Indien een bus of tram omrijdt zullen de reizigers de extra omrijtijd voor lief moeten nemen. Zelfs als er eventueel alternatieve routes beschikbaar zouden zijn, is het de vraag of reizigers de relevante informatie op tijd hebben om daarop te reageren. Onverwachte extra rijtijden worden door reizigers als nadelig gewaardeerd. Overigens kan door juiste informatie deze nadelige waardering worden beperkt. Bij langdurige omrijroutes is het echter mogelijk dat reizigers de aangeboden route te lang

vinden en besluiten hun verplaatsing gedurende die tijd niet met het openbaar vervoer te maken.

Bij het uitvallen van vervoerdiensten, wordt de reiziger geconfronteerd met het feit dat zijn beoogde verplaatsing niet mogelijk is. Het hangt van de netwerkkarakteristieken af een andere route met het openbaar vervoer mogelijk is, bijvoorbeeld lopen naar een andere parallelle lijn. Anders zal de reiziger zijn verplaatsing op een andere manier moeten vervolgen, bijvoorbeeld met een taxi) of een andere bestemming of activiteit moeten kiezen. Het zal duidelijk zijn dat reizigers dergelijke situaties als zeer ongewenst beschouwen.

Deze analyse van de consequenties voor de reiziger laat zien dat er twee maten zijn om de betrouwbaarheid en de robuustheid mee te bepalen:

- De extra reistijd;
- Het aantal verplaatsingen dat niet met het openbaar vervoer kan worden gemaakt.

## **5 Opzet van het analysemodel**

Om inzicht te krijgen in de effecten van beperkingen in de beschikbaarheid van infrastructuur op de werking van een openbaarvervoersysteem, is een analysemodel ontwikkeld. Dit model simuleert een openbaarvervoersysteem waarbij de beschikbaarheid van de infrastructuur varieert door allerlei verstoringen. Het model berekent de consequenties voor de exploitatie en de reizigers: reistijden, extra reistijden en niet met het openbaar vervoer gemaakte verplaatsingen.

De invoer voor dit analysemodel bestaat uit een gegeven vervoervraag, een geplande dienstregeling en een beschikbaar infrastructuurnetwerk. In de analyse worden vier stappen onderscheiden:

1. Genereren van verstoringen;
2. Bepalen van de effecten op de infrastructuur;
3. Bepalen van de effecten op de dienstuitvoering;
4. Bepalen van de effecten voor de reiziger.

In de eerste stap worden per type verstoringen gegenereerd op basis van empirische waarden voor de opvolgtijd of frequentie van het type en voor de duur van de verstoring. Voor de opvolgtijd is een negatief exponentiële verdeling gebruikt en voor de duur een lognormale verdeling. De verstoringen worden op een tijdas geplaatst zodat op elk moment bekend is of er sprake is van een verstoring en zo ja, van welke. Door in de analyse steeds naar het volgende moment te gaan waar de verstoring begint of eindigt, kan de kwaliteit van het netwerk efficiënt worden doorgerekend. Overigens kunnen op deze manier meer typen verstoringen simultaan plaatsvinden.

In de tweede stap worden de verstoringen toegekend aan specifieke schakels (weg- of baanvakken). Dit gebeurt met een Monte-Carlo-trekking. Gemakshalve is verondersteld dat er geen correlatie is tussen de schakels.

In de derde stap wordt het effect op de geplande dienstuitvoering verwerkt. Hierbij zijn de volgende mogelijkheden opgenomen:

- Omrijden; bij busvervoer is dit een straatje om dat een vaste extra reistijd per lijn oplevert, bij tramvervoer is dit echt een alternatieve route over de aanwezige railinfrastructuur.
- Uitval van een lijnsegment; delen van de lijnen blijven functioneren.
- Uitval van een gehele lijn.

In combinatie met de oorzaak van de verstoringen kunnen de effecten worden gerubriceerd zoals in Tabel 2.

*Tabel 2: Overzicht verwerking invloed op vervoeraanbod*

Type verstoring	Omrijden	Lijnsegment valt uit	Lijn valt uit
Ongevallen	Bus en tram	Tram	
Storm	Bus en tram	Tram	Bus en tram
IJzel	Bus en tram	Tram	
Sneeuw			Bus en tram
Onweer	Tram	Tram	
Werkzaamheden	Bus en tram	Tram	

In het geval dat wordt omgereden is ook sprake van extra exploitatiekosten. Uitval van vervoerdiensten leidt echter niet tot lagere exploitatiekosten.



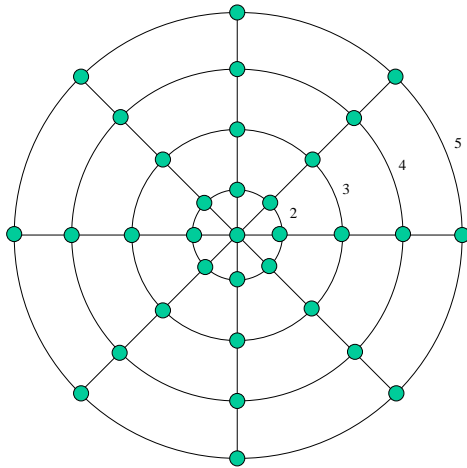
In het vierde en laatste blok wordt nagegaan wat de consequenties zijn voor de reizigers:

- Welke reizigers kunnen hun verplaatsing normaal maken?
- Welke reizigers krijgen een extra reistijd?
- Voor welke reizigers is de nieuwe reistijd te lang ten opzichte van de normale situatie?
- Welke reizigers kunnen hun reis niet met het openbaar vervoer maken?

De resultaten worden omgerekend naar kosten met een tijdswaardering. De extra reistijd wordt gewogen met een hogere tijdswaardering. Indien een verplaatsing niet met het openbaar vervoer wordt gemaakt wordt hiervoor een aparte penalty in rekening gebracht.

## 6 Toepassing op een theoretisch netwerk

Met het hiervoor beschreven analysemodel is een theoretisch stedelijk openbaarvervoernetwerk doorgerekend. Hierbij is uitgegaan van een tramnetwerk. Het netwerk heeft een ringradiale netwerkstructuur met het centrum in het midden. In Figuur 1 is het gebruikte infrastructuurnetwerk weergegeven. De straal van deze stad is circa 10 kilometer.



*Figuur 1: Infrastructuurnetwerk*

Met dit infrastructuurnetwerk zijn 5 dienstennetwerken bekeken:

1. Radiale lijnen zonder ringlijn
2. Radiale lijnen met alleen een centrumring (2)
3. Radiale lijnen met een kleine ring (3)
4. Radiale lijnen met een grote ring (4)
5. Radiale lijnen met een buitenring (5)

Indien een ringlijn in gebruik is, zijn die lijnsegmenten ook toegankelijk voor alternatieve routes bij blokkades. Verwacht mag worden dat variant 1 erg gevoelig zal zijn voor verstoringen, terwijl de andere netwerkvarianten robuuster zullen zijn.

Het exploitatiebudget is voor elke variant gelijk. Dit betekent dat de frequenties in variant 1 het hoogst zullen zijn en bij variant 5 het laagst. De vervoervraag is bij elke variant gelijk. Ongeveer de helft van de verplaatsingen gaat naar of komt vanuit het centrum. De andere helft zijn transversale en tangentiële verplaatsingen.

Voor elk van deze varianten zijn 10 analyses voor een jaar uitgevoerd conform de hiervoor beschreven opzet. Hierbij is de extra reistijd met een twee keer zo hoge tijdswaardering (€20) gewogen dan de gewone reistijd (€10). Voor verplaatsingen die niet met het openbaar vervoer kunnen worden gemaakt is een penalty van €20 gehanteerd.

In de beschrijving van de resultaten komen achtereenvolgens aan bod

1. De verstoringen zelf
2. De effecten op de infrastructuur
3. De effecten op de exploitatie
4. De effecten voor de reiziger
5. De effecten voor de totaalwaardering van de netwerken

Tabel 3 geeft een globaal overzicht van de verstoringen die per jaar zijn gegenereerd. De kleine ongevallen hebben een beperkte variatie, terwijl de verstoringen als gevolg van het weer sterk fluctueren.

*Tabel 3: Karakteristieken gegenereerde verstoringen*

	<b>Gemiddeld</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
Ongevallen	411	370	453
Weer	8,3	1	18
Werkzaamheden	4,7	2	7

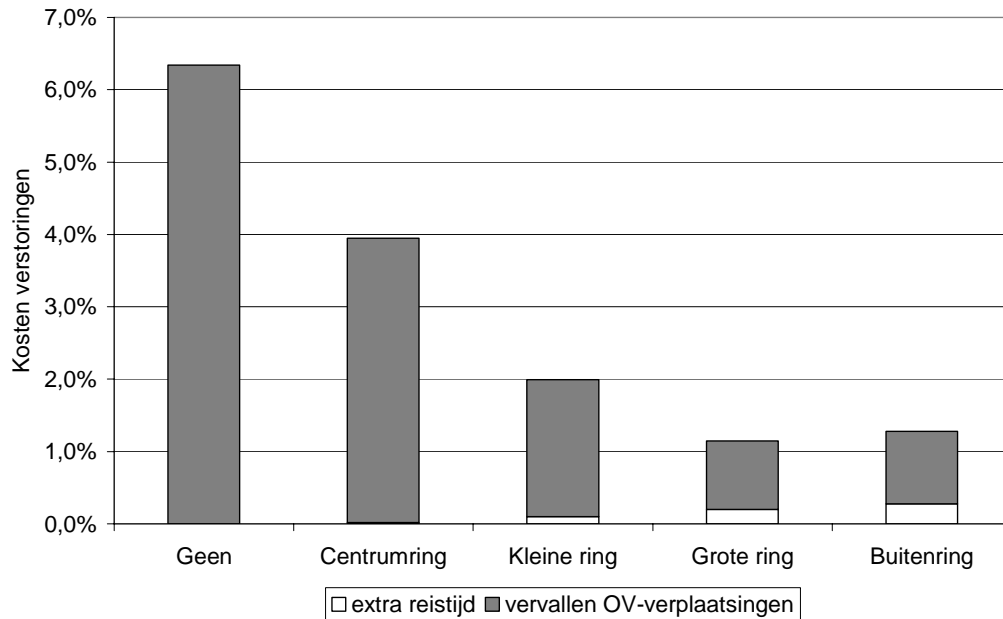
Als gevolg van deze verstoringen zijn er ongeveer 7 verstoringen per jaar per schakel. Hierdoor is een schakel per jaar gemiddeld 1,7 dag buiten gebruik. Tussen de simulaties varieert dit tussen 1 en 2,3 dagen.

Bij een beperkt aantal verstoringen is het mogelijk een omrijroute aan te bieden. Bij de andere verstoringen is met het beschikbare infrastructuurnetwerk geen alternatief mogelijk. Voor de radiaallijnen komt alleen omrijroutes voor in de varianten 4 en 5 (grote en buitenring). Bij de ringlijnen komt dit voor de varianten 3 tot en met 5. De extra exploitatiekosten zijn echter verwaarloosbaar: 0,01%, 0,02% en 0,06% voor respectievelijk de varianten 3 tot en met 5.

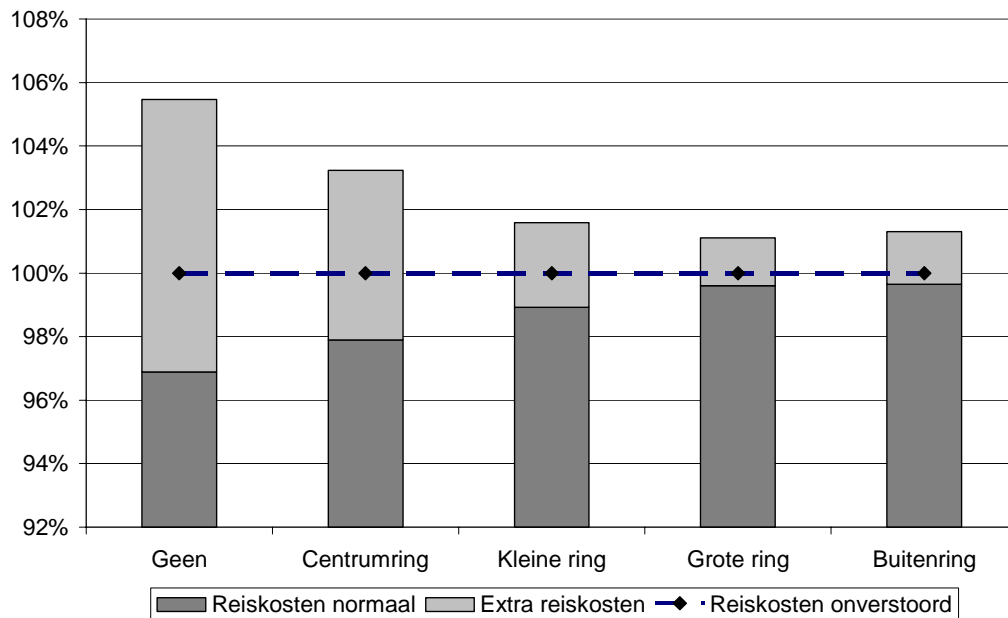
De consequenties voor de reiziger zijn echter substantiëler. In variant 1 zijn gemiddeld bijna 3% van de verplaatsingen niet mogelijk. Het maximum bedraagt zelfs 5,2%. Deze percentages nemen af bij de opeenvolgende varianten en bedragen bij variant 5 0% respectievelijk 0,1%. Netwerkvormen beïnvloeden dus duidelijk de robuustheid van het dienstennetwerk.

De extra reistijden laten echter een omgekeerd beeld zien. In de varianten 1 en 3 is er geen sprake van extra reistijden. Bij de andere varianten loopt die op tot 0,15% bij variant 5, met een maximum van 0,3%.

Figuur 2 laat het beeld zien als beide componenten in kosten worden uitgedrukt: Bij variant 1 (geen ringlijn) is het effect duidelijk het grootst: meer dan 6% van de reiskosten. Bij één simulatie bedroeg dit percentage zelfs meer dan 12%. De consequenties van de verstoringen nemen vervolgens af per variant. Bij variant 5 (buitenring) is echter weer sprake van een toename. Dit wordt veroorzaakt door de relatief lange omrijtijden in deze variant.



*Figuur 2: Kosten voor de reiziger als gevolg van verstoringen als percentage van de totale reiskosten indien er geen verstoringen zouden zijn.*



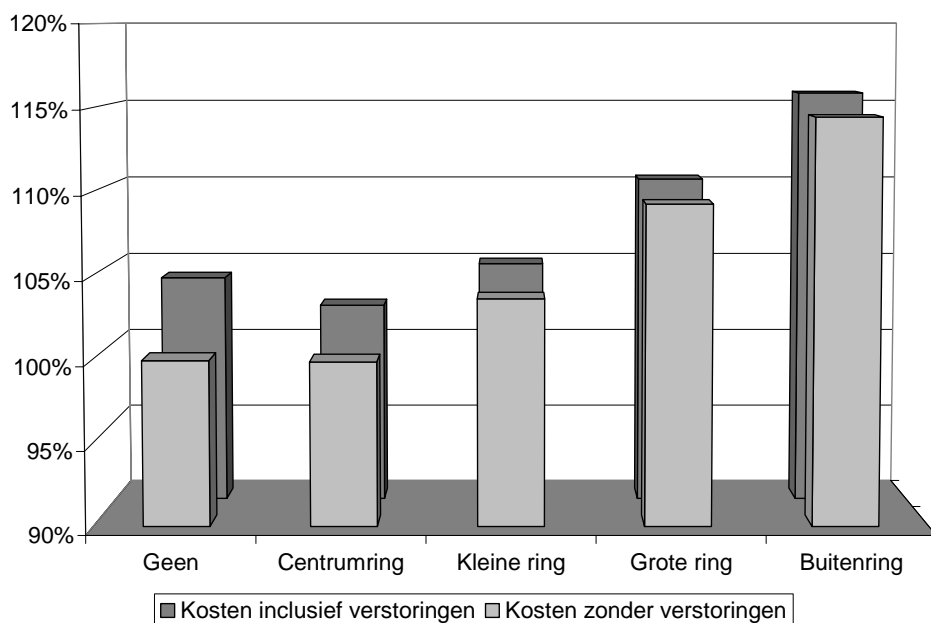
*Figuur 3: Extra reiskosten (omrijden en niet met openbaar vervoer gemaakte verplaatsingen) als percentage van de situatie waarin geen verstoringen optreden*

Een vergelijking met de totale reiskosten in de situatie zonder verstoringen is niet eenduidig.

Als gevolg van verstoringen worden verplaatsingen niet gemaakt. Deze reiskosten, d.w.z.

reistijden maal tijdswaardering, komen daarmee te vervallen, en worden vervangen door een vaste penalty per verplaatsing (in de analyse €20). De netto meerkosten voor de gebruiker komen hiermee op een gemiddelde van 5,5% voor variant 1 (maximum 10,5%) en neemt af tot en met variant 4 (1,1% gemiddeld) en neemt daarna licht toe (1.3%). Figuur 3 laat dit beeld duidelijk zien:

In het voorgaande zijn afzonderlijke aspecten bekeken. Bij het beoordelen van netwerken gaat het vaak om en totaalbeeld. Een veelgebruikt criterium zijn de totale kosten, d.w.z. reiskosten plus exploitatiekosten (zie bijvoorbeeld Van Nes (2002)). In Figuur 4 zijn de scores van de bekeken varianten voor zowel de situatie met als zonder verstoringen weergegeven.



*Figuur 4: Totale kosten (reis- plus exploitatiekosten) voor de netwerkvarianten voor de situatie met en zonder verstoringen*

Hierin is duidelijk te zien dat in de situatie zonder verstoringen, in feite de situatie zoals gewoonlijk netwerken worden beoordeeld, de varianten 1 en 2 (geen ring c.q. centrumring) nagenoeg gelijk scoren. Wordt echter bij de beoordeling ook rekening gehouden met de mogelijkheid dat er verstoringen zullen optreden die de beschikbaarheid van de benodigde infrastructuur beïnvloeden, dan blijkt variant 2 (centrumring) duidelijk aantrekkelijker te zijn. Het in beschouwing nemen van de betrouwbaarheid en de robuustheid blijkt duidelijk effect

om de netwerkbeoordeling te hebben. Een gevoeligheidsanalyse laat zien dat als de extra kosten als gevolg van verstoringen 4 maal zwaarder wegen, variant 3 (kleine ring) de voorkeur verdient.

## **7 Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek**

Deze bijdrage beschrijft een nieuw ontwikkeld instrument om de effecten van variatie in de beschikbaarheid van infrastructuur op openbaarvervoerdiensten te analyseren.

De belangrijkste conclusies zijn dat de consequenties van beperkingen in de infrastructuurbeschikbaarheid voor de reiziger substantieel kunnen zijn: gemiddeld 6% van de reiskosten. Voor de exploitant lijken de effecten echter gering. Indien netwerken op criteria zoals robuustheid en betrouwbaarheid worden beoordeeld, dan leidt dit tot andere optimale netwerken. Bij een integrale beoordeling waarbij zowel de reiskosten, de exploitatiekosten als de extra kosten als gevolg van variaties in de infrastructuurbeschikbaarheid in beschouwing worden genomen, laat eveneens zien dat de keuze voor een optimaal netwerk wijzigt ten opzichte van analyses waarbij deze verstoringen niet zijn meegenomen.

De studie laat ook zien dat meer onderzoek noodzakelijk is. Het inzicht in de werkelijke karakteristieken van verstoringen vraagt om meer empirische onderbouwing. Correlaties tussen typen verstoringen zijn hierbij een belangrijk aandachtspunt. Daarnaast verdient het aanbeveling om ook andere stochastische fenomenen in de analyse te betrekken: variatie in de vervoervraag en in de dienstuitvoering zelf. Ook hier spelen correlaties tussen fenomenen een rol. Ten slotte is het voor een goed oordeel over de invloed van robuustheid en betrouwbaarheid noodzakelijk deze analyses voor realistische netwerken uit te voeren.

**Literatuur**

Bell, M.G.H. (1999), A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks, *Transportation Research B* 34, pp. 535-545

De Jong, P. (2005), *Op weg naar robuuste OV-netwerken*, MSc-Eindwerk, Transport & Planning, TU Delft, Delft

Van Nes, R. (2002). *Design of multi-modal transport networks: A hierarchical approach*. Trail Thesis Series T2002 / 5, DUP, Delft

Yamada, T., Y. Yoshimura, K. Mori (2004), Road network reliability analysis using vehicle routing and scheduling procedure, in (ed) Taniguchi, E., R.G. Thompson, *Logistic systems for sustainable cities*, Pergamon

Yin, Y., H. Ieda (2002), Optimal improvement scheme for network reliability, *Transportation Research Record* 1783, pp. 1-6