

Robuust openbaar vervoer vanuit een reizigersperspectief

Ir. Menno Yap
TU Delft
M.D.Yap@TUDelft.nl

Dr.ir. Niels van Oort
Goudappel Coffeng / TU Delft
NvOort@Goudappel.nl

Dr.ir. Rob van Nes
TU Delft
R.vanNes@TUDelft.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
20 en 21 november 2014, Eindhoven**

Samenvatting

Robuust openbaar vervoer vanuit een reizigersperspectief

De klachten van reizigers tijdens de sneeuwproblematiek in het openbaar vervoer de afgelopen jaren, Kamervragen over het hoge uitvalpercentage van de Intercity Direct en discussies over spooronderhoud in de Schipholtunnel maken één ding duidelijk: het belang van robuust openbaar vervoer. Desondanks richten discussies over robuustheid zich alleen op de kosten van robuustheidsmaatregelen. Tot op heden wordt nauwelijks gefocust op de waarde van robuustheid: wat zijn de robuustheidsbaten van de maatregelen en wat is die robuustheid waard?

In deze paper hebben we een methodologie ontwikkeld die ons in staat stelt om de maatschappelijke waarde van robuust openbaar vervoer te bepalen, in aanvulling op reeds vastgestelde tijd- en betrouwbaarheidswaarderingen. Robuustheidsbaten van maatregelen kunnen hiermee worden gemonetariseerd, en afgewogen worden tegen de benodigde kosten. Hiermee ondersteunt deze methodologie besluitvorming aangaande de implementatie van robuustheidsmaatregelen.

In deze paper wordt robuustheid vanuit een reizigersperspectief benaderd. Op dit moment wordt robuustheid door wetenschap en praktijk vooral vanuit een mono-level perspectief benaderd: voor elk netwerkniveau en elke modaliteit apart. In dit onderzoek richten we ons echter op robuustheid van het totale multi-level openbaar vervoer netwerk, waarbij alle openbaar vervoer netwerkniveaus en alle modaliteiten (trein, metro, lightrail, tram, bus) van verschillende vervoerders integraal worden geanalyseerd. Hierdoor kan inzichtelijk worden gemaakt in welke mate netwerkniveaus een verstoring op een ander netwerkniveau kunnen opvangen, en wordt op realistische wijze inzicht verkregen in de effecten van verstoringen op reizigers.

In dit onderzoek is eerst een nieuwe methodologie ontwikkeld om de meest kwetsbare plaatsen in het multi-level netwerk te identificeren. Door zowel verstoringkansen, verstoringduur als verstoringimpact expliciet in beschouwing te nemen, kan vervolgens de mate van onrobuustheid van deze kwetsbare netwerkdelen worden gekwantificeerd. De ontwikkelde methodologie is succesvol toegepast op de Randstad Zuidvleugel als casestudy. De resultaten illustreren dat vanuit een reizigersperspectief ruimte is om robuustheid van openbaar vervoer netwerken te verbeteren. Met name tijdelijke lijnvoeringmaatregelen (zoals een tijdelijke frequentieverhoging op een route parallel aan een kwetsbaar netwerkdeel) en kleine infrastructurele maatregelen hebben maatschappelijk gezien potentie om robuustheid verder te verbeteren. In de casestudy wegen robuustheidsbaten van grotere infrastructurele maatregelen (zoals de aanleg van extra wissels) tijdens verstoringen niet op tegen de kosten voor reizigers en vervoerders tijdens de onverstoordde situatie.

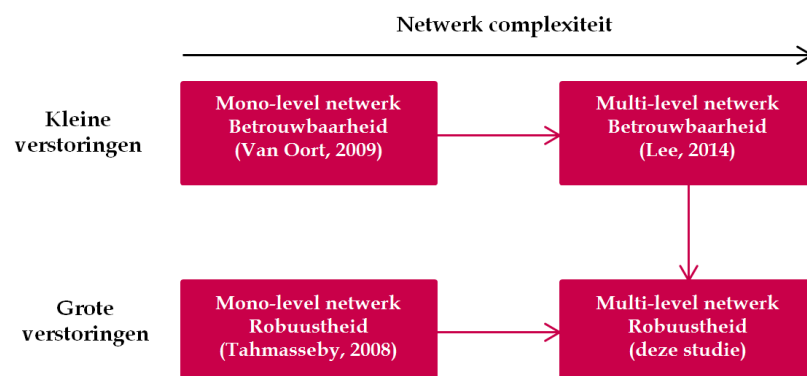
Uit de casestudy blijkt dat het niet eenvoudig is om vooraf de waarde van verschillende maatregelen te beoordelen. Onze aanpak helpt dit proces te verbeteren en biedt robuustheid daarbij een plek in de besluitvorming.

1. Inleiding

Een verstoringvrije exploitatie van openbaar vervoer (OV) volgens dienstregeling wordt door reizigers als zeer belangrijk ervaren (Van Oort 2011). De klachten van reizigers gedurende de sneeuwproblematiek in het OV de afgelopen jaren illustreren dit des te meer. Desondanks wordt dit onderwerp door wetenschap en praktijk nog niet volledig vanuit een reizigersperspectief benaderd.

Ten eerste richten huidige studies zich voornamelijk op betrouwbaarheid: de mate waarin van de geplande dienstregeling wordt afgeweken als gevolg van kleine, terugkerende verstoringen die geen invloed hebben op infrastructuur beschikbaarheid. Hierbij richten studies zich op betrouwbaarheid van zowel mono-level OV netwerken (Hollander 2006, Vromans 2006, Furth 2009, Van Oort en Van Nes 2009, Corman et al. 2010, Van Oort et al. 2010, Van Oort en Van Nes 2010, Xuan et al. 2011) als multi-level OV netwerken (Lee et al. 2014) (Figuur 1). Bij een mono-level perspectief wordt elk OV netwerk op een bepaald functioneel netwerkniveau apart geanalyseerd. Wanneer het multi-level OV netwerk in beschouwing wordt genomen, worden alle OV netwerken op alle functionele netwerkniveaus, vaak geëxploiteerd door verschillende vervoerders, integraal geanalyseerd. Interacties tussen netwerkniveaus worden expliciet bekeken, zoals de gevolgen van een vertraging op het treinnetwerk voor aansluitingen op busverbindingen op een lager netwerkniveau.

Ten tweede richten de beperkte studies naar robuustheid van openbaar vervoer, dat gerelateerd is aan grote verstoringen die infrastructuur beschikbaarheid op het OV netwerk reduceren, zich alleen op mono-level OV netwerken (Tahmasseby et al. 2008, Corman et al. 2014) (Figuur 1). Ook wat betreft robuustheid van OV netwerken is het vanuit een reizigersperspectief echter belangrijk om het gehele multi-level OV netwerk in beschouwing te nemen wat beschikbaar blijft voor reizigers in geval van verstoringen. Bij het analyseren van robuustheid vanuit een mono-level netwerk perspectief wordt de mate waarin een bepaald netwerkniveau in staat is een verstoring op een ander netwerkniveau op te vangen niet in beschouwing genomen. Dit leidt tot een onvolledige en onjuiste evaluatie van reizigerseffecten van verstoringen. Daarnaast worden potentieel effectieve maatregelen op netwerkniveau X_1 , welke robuustheid kunnen verbeteren als gevolg van verstoringen op netwerkniveau X_2 , niet geanalyseerd. Ten derde zijn in het algemeen de waarde van robuustheid en de maatschappelijke kosten als gevolg van onrobuuste OV netwerken tot op heden niet gemonetariseerd. Hierdoor is geen inzicht in de gemonetariseerde effecten van verstoringen op reizigers.



Figuur 1. Relevantie van onderzoek gericht op robuustheid van multi-level OV netwerken

Deze paper vult dit kennishiaat in door robuustheid van multi-level OV netwerken te analyseren (Figuur 1). Het doel van deze studie is het ontwikkelen van een methodologie om de meest kwetsbare links in het multi-level OV netwerk te identificeren. Vervolgens is een methodologie ontwikkeld om de mate van (on)robuustheid van als meest kwetsbaar geïdentificeerde links te kwantificeren, gegeven het totaal beschikbare multi-level netwerk. We hebben onze methodologie succesvol toegepast op de Randstad Zuidvleugel als casestudy, waarbij ook maatregelen ter verbetering van robuustheid zijn geëvalueerd.

2. Definities

Aangezien deze paper zich alleen richt op robuustheid, en daarmee op grote verstoringen die infrastructuur beschikbaarheid op links van het multi-level OV netwerk beïnvloeden, wordt de volgende definitie van robuustheid gehanteerd: *'Robuustheid is de mate waarin een multi-level OV netwerk in staat is de functie te vervullen waarvoor het ontworpen is in het geval van grote verstoringen'* (op basis van Korteweg en Rienstra 2010, Savelberg en Bakker 2010, Snelder 2010). De functie van een OV netwerk is in deze paper gedefinieerd als *'het bieden van verbindingen tussen netwerk knopen binnen de verwachte reistijd, tegen verwachte reiskosten en met het verwachte reiscomfort.'* Vanuit een reizigersperspectief is het belangrijk om, naast reistijdefecten van verstoringen, ook de effecten op connectiviteit, reiskosten en comfort van reizigers in beschouwing te nemen.

Netwerk kwetsbaarheid, de gevoeligheid van OV diensten voor grote verstoringen, is omgekeerd evenredig met robuustheid: een netwerk met 0% kwetsbaarheid is 100% robuust (Tahmasseby 2009, Snelder 2010). Veronderstel een multi-level OV netwerk weergegeven als gerichte graaf $G(V_n, E_n)$ met knopen $v_n \in V_n$ en links $e_n \in E_n$ op OV netwerkniveau n . Vanuit een reizigersperspectief gezien hangt de kwetsbaarheid van een link $e_n \in E_n$ af van de mate waarin deze link blootgesteld wordt aan verstoringen en de impact van deze verstoringen op reizigers, gegeven het totaal beschikbare multi-level OV netwerk N . De kwetsbaarheid c_{e_n} van link e_n kan daarom worden weergegeven met vergelijking (1).

$$c_{e_n} = \sum_{\delta_n} E(f_{e,\delta_n}) * E(\tau_{e,\delta_n}) * \Delta W_{e,\delta_n,\tau} \quad (1)$$

De blootstelling van een link e_n aan grote verstoringen is het product van de frequentie f_{e,δ_n} waarmee verschillende typen verstoringen δ_n OV diensten op die link beïnvloeden en de duur τ_{e,δ_n} van elke verstoring. Aangezien zowel de frequentie waarmee verstoringen voorkomen als de verstoringensduur probabilistisch zijn, wordt het verwachte aantal verstoringen $E(f_{e,\delta_n})$ per tijdinterval vermenigvuldigd met de verwachte duur van elke storing $E(\tau_{e,\delta_n})$. De verstoringimpact $\Delta W_{e,\delta_n,\tau}$ weergeeft het verschil in totale gemonetariseerde maatschappelijke kosten tussen een specifiek verstoringsscenario en de onverstoorte situatie voor alle door verstoring δ_n getroffen reizigers. Tot op heden wordt link kwetsbaarheid c_{e_n} bij OV netwerken slechts beoordeeld op basis van de verstoringimpact en worden verstoringkans en verstoringensduur niet expliciet meegenomen. Dit impliceert dat links met de grootste verstoringimpact op reistijd, -

kosten en –comfort van reizigers als meest kwetsbaar worden geclassificeerd, zelfs als de frequentie waarmee deze verstoringen voorkomen zeer laag zou zijn. Een verklaring hiervoor is de beperkte beschikbaarheid van historische data over verstoringfrequentie en –duur. In deze paper is echter gebruik gemaakt van een dataset met realisatiedata betreffende de frequentie en duur van verschillende typen verstoringen δ_n op verschillende OV netwerkniveaus n (nationaal, interregionaal, regionaal, agglomeratie en stedelijk niveau), met verschillende modaliteiten (trein, metro, lightrail, tram en bus), geëxploiteerd door verschillende vervoerders in Nederland (zie Yap (2014) voor een uitgebreide toelichting). Dit maakt het mogelijk om de mate van blootstelling aan verstoringen expliciet mee te nemen bij het vaststellen van link kwetsbaarheid.

3. Identificatie van kwetsbare links in multi-level OV netwerken

Om robuustheid van OV netwerken te verbeteren is het belangrijk om te identificeren welke links het meest kwetsbaar zijn. Complexe, reële multi-level OV netwerken worden echter veelal gemodelleerd met een groot aantal links. Dit maakt het zeer tijdrovend om verstoringen op elke link $e \in E$ apart te simuleren om de link kwetsbaarheid te evalueren ten opzichte van andere links. Daarom is het noodzakelijk om criteria te specificeren, waarmee een eerste selectie van kwetsbare links wordt gemaakt. Vervolgens worden verstoringen alleen op deze selectie van links gesimuleerd om de mate van onrobuustheid te evalueren.

3.1 Lessen uit studies naar robuustheid van wegnetwerken

Er is zeer weinig wetenschappelijke literatuur waarin zulke preselectie criteria gespecificeerd zijn voor openbaar vervoer netwerken. Wel bestaan diverse criteria om een dergelijke voorselectie te maken voor wegnetwerken. Daarom wordt in deze paper een methodologie ontwikkeld om de meest kwetsbare links in multi-level OV netwerken te identificeren, gebaseerd op bestaande methodologieën ontwikkeld om kwetsbare links in wegnetwerken te vinden (Jenelius et al. 2006, Li 2008, Tampère et al. 2008, Immers et al. 2011, Knoop et al. 2012). Deze methodologieën zijn aangepast op basis van karakteristieken van OV netwerken. Vier conclusies kunnen worden geformuleerd wanneer geanalyseerd wordt in hoeverre voor wegnetwerken gebruikte preselectie criteria geschikt zijn om kwetsbare links in multi-level OV netwerken te identificeren.

Ten eerste is het voor OV netwerken zinvoller om bij criteria die de verstoringkans in beschouwing nemen deze verstoringkans per *linksegment* te berekenen, in plaats van per link zoals bij wegnetwerken. Een linksegment es is een set aangrenzende links e waartussen geen bijsturingsmogelijkheden, zoals wissels of keerlussen, aanwezig zijn. Bij een bepaalde verstoring δ_n op een willekeurige link $e \in es$ worden daarom altijd de vervoersdiensten op dezelfde wijze aangepast. Verstoringkansen zijn voor alle links $e \in es$ gelijk aan elkaar, waardoor bij OV netwerken linksegmenten een betere eenheid van analyse zijn bij het berekenen van de verstoringkans dan links.

Ten tweede is het voor multi-level OV netwerken van belang om preselectie criteria te gebruiken die zowel de verstoringkans als verstoringimpact op elk netwerkniveau n expliciet in beschouwing nemen. Bij wegnetwerken richten sommige criteria zich alleen

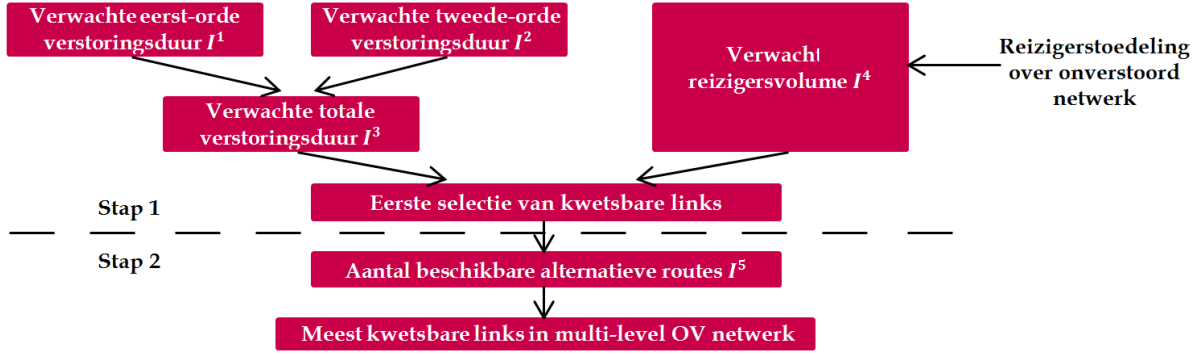
op de verstoringssimpact, waarbij impliciet een gelijke verstoringkans voor elke link $e \in E$ wordt verondersteld. Bij criteria die verstoringkansen wel in beschouwing nemen, wordt veelal één generieke predictor (zoals link lengte) gebruikt om verstoringkansen voor verschillende links te onderscheiden. Op basis van Yap (2014) kan echter worden geconcludeerd dat bij OV netwerken verschillende predictoren (zoals linksegment lengte, voertuig-kilometers per linksegment) gebruikt moeten worden om verstoringkansen voor verschillende typen verstoringen δ_n op verschillende linksegmenten te berekenen. Ook wordt aangetoond dat de verstoringkans op een bepaalde verstoring δ kan verschillen voor verschillende OV netwerkniveaus, als gevolg van verschillende netwerkkarakteristieken. Dit betekent dat het niet volstaat om een gelijke verstoringkans te veronderstellen voor alle links in het multi-level OV netwerk. Behalve de verstoringssimpact zouden preselectie criteria de verstoringkans, met verschillende predictoren voor verschillende verstoringen δ en verschillende parameterwaarden f_{δ_n} voor verschillende netwerkniveaus n , expliciet moeten duiden.

Ten derde is voor multi-level OV netwerken het reizigersvolume op de door een verstoring getroffen link een betere proxy voor de verstoringssimpact dan een ratio tussen verkeersvolume en capaciteit zoals gehanteerd voor wegnetwerken (bijv. de Incident Impact Factor of V/C ratio). Aangezien de werkelijke verstoringssimpact alleen na simulatie kan worden bepaald, is het noodzakelijk een proxy hiervoor te gebruiken. Bij OV netwerken is de relatie tussen volume en capaciteit minder relevant als benadering voor de consequenties van een verstoring: zelfs in geval van verstoringen treedt nauwelijks congestie tussen OV voertuigen op, vergeleken met congestie tussen wegvoertuigen. De verstoringssimpact is meer gerelateerd aan het door de verstoring getroffen reizigersvolume, dan aan de V/C ratio van OV voertuigen op een link.

Ten vierde is het voor OV netwerken ook van belang om tweede-orde terugslageffecten in beschouwing te nemen bij de berekening van de verwachte verstoringssduur. Bij wegnetwerken zijn diverse criteria gespecificeerd om de grootte van terugslageffecten van een verstoring op link e op aangrenzende links j of gridlock effecten mee te nemen bij het opstellen van een eerste selectie kwetsbare links. Bij wegnetwerken is duidelijk dat verstoringen terugslageffecten op andere links kunnen hebben. Bij OV netwerken zijn deze terugslageffecten echter niet vergelijkbaar. Als gevolg van de beperkte congestie tussen OV voertuigen, is in geval van een verstoring geen of slechts een beperkt direct terugslageffect op OV voertuigen op aangrenzende linksegmenten. Echter, OV diensten op linksegmenten $js \neq es$ kunnen zeker worden beïnvloed door een verstoring op linksegment es . In geval van verstoringen gelden bijsturingsmaatregelen waarbij OV lijnen worden gesplitst, ingekort, omgeleid of geheel opgeheven. Bijvoorbeeld, wanneer OV lijn L wordt opgeheven als gevolg van een verstoring op linksegment es , ondervinden passagiers die over andere linksegmenten $js \in L$ reizen ook hinder. Dit illustreert dat OV diensten op een bepaald linksegment es kunnen worden verstoord door een eerste-orde effect – een verstoring die op het betreffende linksegment es zelf plaats vindt – en door een tweede-orde effect: een verstoring op een ander linksegment js wat leidt tot aanpassing van OV diensten op linksegment es . Behalve tijdens de transitiefase tussen onverstoord exploitatie en een specifiek verstoringsscenario, is dit terugslageffect bij OV netwerken meer statisch dan het dynamische terugslageffect bij wegnetwerken. Gridlock effecten zijn voor OV netwerken nauwelijks relevant.

3.2 Methodologie om kwetsbare links in multi-level OV netwerken te identificeren

Op basis van de geleerde lessen van de robuustheidsaanpak bij wegnetwerken is een nieuwe methodologie ontwikkeld om de meest kwetsbare links in multi-level OV netwerken te identificeren (Figuur 2). Hiervoor zijn preselectie criteria I^1 tot I^5 gespecificeerd.



Figuur 2. Methodologie om kwetsbare links te identificeren in multi-level OV netwerken

Stap 1: bereken I^1 , I^2 , I^3 en I^4 en maak een eerste selectie van kwetsbare links

$$I_{es}^1 = \sum_{pr} \sum_{\delta, pr} \sum_w f_{\delta, pr, w}^* \cdot \frac{x_{pr, es}}{x_{pr, n}} \cdot \tau_{\delta, n, w}^* \quad \forall es \in E \quad (2)$$

I_{es}^1 geeft de verwachte verstoringsduur weer van een bepaald linksegment binnen een zeker tijdinterval als gevolg van het eerste-orde effect. Deze verstoringsduur is het product van de gemiddelde frequentie $f_{\delta, pr, w}^*$ waarmee elke verstoring δ_n per tijdinterval voorkomt op netwerkniveau n in seizoen w en de gemiddelde duur $\tau_{\delta, n, w}^*$ hiervan. Voor elke verstoring is een predictor pr bepaald om de gemiddelde verstoringsfrequentie op het gehele netwerkniveau (zoals verkregen uit historische data) te transformeren naar een gemiddelde verstoringsfrequentie per linksegment op basis van de ratio tussen de waarden x_{pr} van deze predictor op het linksegment en op n als geheel.

$$I_{es}^2 = \sum_{js} \sum_{pr} \sum_{\delta, pr} \sum_w f_{\delta, pr, w}^* \cdot \frac{x_{pr, es}}{x_{pr, n}} \cdot \tau_{\delta, n, w}^* \quad \forall es \in E \quad (3)$$

I_{es}^2 geeft de verwachte verstoringsduur weer van een bepaald linksegment in een bepaald tijdinterval als gevolg van het beschreven tweede-orde effect. Op basis van in werkelijkheid door vervoerders genomen bijstuuringsmaatregelen kan worden vastgesteld welke andere linksegmenten $js \neq es$ bijdragen aan de tweede-orde verstoringsduur op linksegment es .

$$I_{es}^3 = I_{es}^1 + I_{es}^2 \quad \forall es \in E \quad (4)$$

I_{es}^3 , de som van de eerste-orde en tweede-orde effecten, weergeeft de verwachte totale verstoringsduur op linksegment es per tijdinterval als gevolg van grote verstoringen.

$$I_e^4 = q_e \quad \forall e \in E \quad (5)$$

I_e^4 geeft het verwachte reizigersvolume op link e weer, als benadering van de impact van een verstoring. I_e^4 kan worden bepaald door het toedelen van reizigers over het onverstoord netwerk. I_e^4 wordt voor elke link e apart berekend, aangezien het reizigersvolume kan verschillen voor verschillende links $e \in es$. Wanneer voor alle links I^3 (de verwachte totale verstoringduur) en I^4 (proxy van de verwachte verstoringimpact) tegen elkaar worden uitgezet, wordt een Pareto front gevormd door links met de hoogste waarde op $I^3|I_x^4$ of andersom. Links op of vlakbij het Pareto front vormen vervolgens de eerste selectie van kwetsbare links in het multi-level OV netwerk. Aangrenzende links die op het Pareto front verschijnen kunnen als één linksegment samen genomen worden.

Stap 2: beoordeel I^5 en maak een definitieve selectie van kwetsbare links

$$I_e^5 = \text{aantal beschikbare alternatieve routes}$$

Op basis van I^5 wordt de selectie van kwetsbare links verder aangescherpt. Links waarvoor nauwelijks alternatieve routes in het gehele multi-level OV netwerk beschikbaar zijn, worden als meest kwetsbaar geclassificeerd. Dit leidt tot een definitieve selectie van kwetsbare links. Net als bij wegnetwerken wordt I^5 veelal kwalitatief beoordeeld met behulp van expert judgement, aangezien I^5 verschilt voor elk HB-paar.

4. Waardering van robuustheid

Voor de als meest kwetsbaar geïdentificeerde links in het multi-level OV netwerk kan de mate van (on)robuustheid worden geëvalueerd en gemonetariseerd. Hierin wordt zowel de blootstelling aan verstoringen als de verstoringimpact expliciet meegenomen.

Voor elk type verstoring δ_n op elk netwerkniveau n is voor zowel de verstoringfrequentie als verstoringduur de empirische kansverdelingsfunctie (afgeleid op basis van de verkregen dataset met verstoringen) statistisch gefit op een theoretische kansverdeling. De geschatte parameterwaarden f_{δ_n} en τ_{δ_n} van de kansverdelingsfuncties zijn gebruikt als input voor Monte Carlo simulatie. Hiermee zijn voor een gespecificeerde tijdhorizon verstoringen gegenereerd met een bepaalde frequentie en duur.

Alle typen verstoringen zijn geclassificeerd op basis van twee dimensies: de impact op infrastructuur beschikbaarheid en de impact op reizigersvraag.

Sommige verstoringstypen leiden ertoe dat de infrastructuur op een link gedeeltelijk niet beschikbaar is, zoals een defect voertuig. Andere typen verstoringen hebben een blokkade van de gehele link tot gevolg, bijvoorbeeld een aanrijding tussen trein en auto op een spoorwegovergang. De bijsturingmaatregelen van vervoerders verschillen veelal in het geval een link deels of geheel geblokkeerd is, waarmee ook de impact van een verstoring op reizigers verschilt in deze twee situaties.

Verstoringen met een lage mate van voorspelbaarheid (ongeplande verstoringen) zullen in het algemeen de reizigersvraag op gehinderde HB-paren niet of nauwelijks reduceren, aangezien reizigers niet van tevoren wisten dat deze verstoring zou optreden.

Verstoringen met een hoge mate van voorspelbaarheid (zoals aangekondigde werkzaamheden) kunnen OV vervoersvraag echter wel a priori reduceren, aangezien reizigers dan van tevoren kunnen besluiten de vervoerswijze- of bestemmingskeuze te

wijzigen of de reis in het geheel te annuleren. Het is van belang om dit onderscheid tussen voorspelbare en onvoorspelbare verstoringen te maken, aangezien de totale verstoringssimpact op reizigers zal verschillen in beide gevallen. De impact van een voorspelbare verstoring op de OV vraaguitval is empirisch gekwantificeerd op basis van OV-Chipkaart data van RET en HTM (zie Yap (2014) voor uitgebreide toelichting).

In totaal kunnen derhalve bij de waardering van robuustheid van elke link verschillende verstoringsscenario's S worden onderscheiden op basis van deze twee dimensies, waarbij verschillende bijsturingmaatregelen van vervoerders en verschillende HB-matrices als input gehanteerd worden. Voor elk scenario S kan vervolgens de verstoringssimpact $\Delta W_{e,\delta_n,\tau,S}$ worden berekend.

Naast reistijdeffecten is het met name bij multi-level OV netwerken van belang om de reiskosteneffecten van een verstoring mee te nemen in $\Delta W_{e,\delta_n,\tau,S}$, aangezien reizigers veelal via een alternatieve, langere route moeten reizen waarbij soms gebruik moet worden gemaakt van OV diensten van een andere vervoerder. Ook is het van belang om de maatschappelijke kosten als gevolg van een gereduceerd reiscomfort te kwantificeren in $\Delta W_{e,\delta_n,\tau,S}$, omdat met name tijdens grote verstoringen de bezettingsgraad op alternatieve routes substantieel kan stijgen. Daarnaast kunnen met behulp van de rule of half bij voorspelbare verstoringen ook de annuleringskosten worden gemonetariseerd in $\Delta W_{e,\delta_n,\tau,S}$ voor het percentage reizigers dat besluit de OV-reis a priori te annuleren. Gegeven de verschillende verstoringsscenario's S , kan vergelijking (1) aangepast worden om de maatschappelijke kosten van onrobuustheid van link e binnen een bepaalde tijdhorizon te berekenen, zie vergelijking (6).

$$c_{e_n} = \sum_S \sum_{\delta_n} E(f_{e,\delta_n,S}) * E(\tau_{e,\delta_n,S}) * \Delta W_{e,\delta_n,\tau,S} \quad (6)$$

5. Casestudy Randstad Zuidvleugel

De voorgestelde methodologie om kwetsbare links in multi-level OV netwerken te identificeren en om de mate van (on)robuustheid te monetariseren is succesvol toegepast op de Randstad Zuidvleugel als casestudy. Door de hoge netwerkdichtheid van verschillende OV netwerkniveaus is dit gebied geschikt om netwerkinteracties in geval van grote verstoringen inzichtelijk te maken. Met de transport planning software OmniTRANS is het OV netwerk van deze casestudy als supernetwerk gemodelleerd op een hoog detailniveau met 5.791 zones, 106.000 knopen $v \in V_n$ en 116.000 links $e \in E_n$. Voor belangrijke OV lijnen L zijn zitplaatscapaciteit en totale capaciteit gespecificeerd.

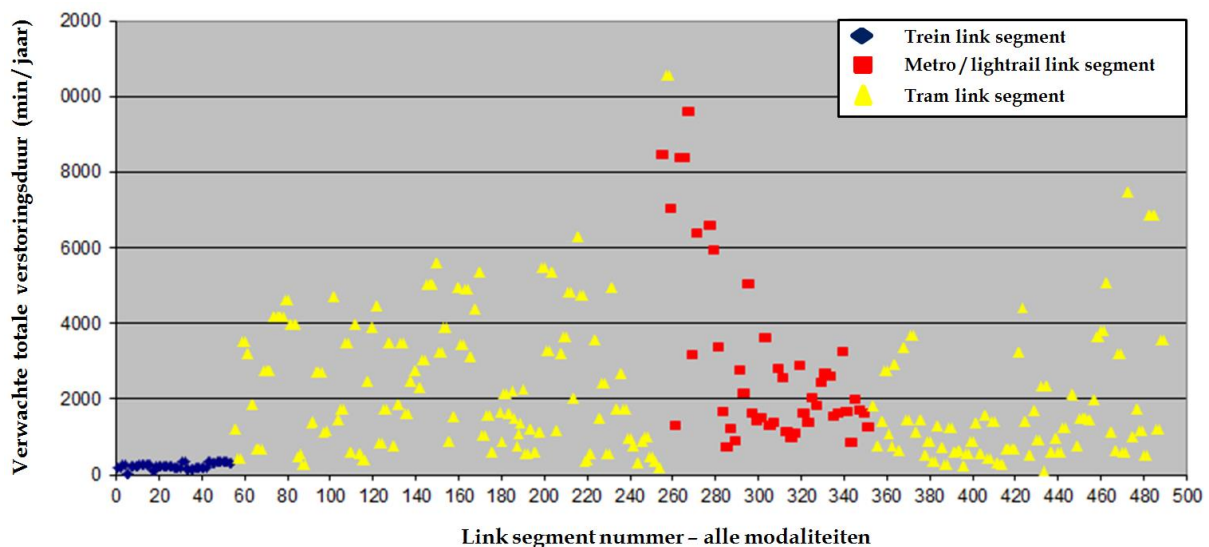
5.1 Identificatie van kwetsbare links in de Randstad Zuidvleugel

In Figuur 3 is voor elk linksegment op verschillende functionele netwerkniveaus de verwachte totale verstoringssduur per jaar, als som van de eerste-orde en tweede-orde verstoringseffecten, weergegeven. Op basis van Yap (2014) en deze figuur kunnen drie conclusies worden geformuleerd.

1. Ten eerste laat Figuur 3 zien dat de verwachte totale verstoringssduur op linksegmenten van het treinnetwerk relatief laag is, vergeleken met linksegmenten op

het metro / lightrail en tramnetwerk. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn de volledig eigen baan voor treinen, de aanwezigheid van seinbeveiliging ter preventie van onderlinge aanrijdingen en de gemiddeld genomen lage voertuigintensiteit op links op treinnetwerken ten opzichte van links op metro, lightrail of tramnetwerken.

2. Ten tweede is voor lightrail linksegmenten rondom Den Haag, Zoetermeer en Pijnacker (de rode punten in Figuur 3 tot nr. 283) de verwachte verstoringsduur structureel groter dan voor linksegmenten van het Rotterdamse metronetwerk (rode punten in Figuur 3 vanaf nr. 283). Dit verschil geldt ook voor linksegmenten op het Haagse tramnetwerk (gele punten links in Figuur 3), vergeleken met linksegmenten op het tramnetwerk van Rotterdam (gele punten rechts in Figuur 3). Verklaringen hiervoor zijn het grotere aantal wissels per kilometer op het Rotterdamse metronetwerk, vergeleken met het lightrail netwerk rondom Den Haag en Zoetermeer, en de aanwezigheid van meer parallelle (soms niet meer gebruikte) tramsporen en verbindingen in Rotterdam. Hierdoor blijven storingen meer lokaal en spreiden deze zich minder uit over het gehele netwerk: de tweede-orde verstoringsduur blijft daardoor substantieel lager.
3. Ten derde is het van belang om tweede-orde effecten van verstoringen mee te nemen in de berekening van de verwachte totale verstoringsduur op linksegmenten. De resultaten in Yap (2014) illustreren duidelijk dat voor veel linksegmenten de verwachte totale verstoringsduur in belangrijke mate het gevolg is van verstoringen die optreden op andere linksegmenten $j_{S_n} \neq e_{S_n}$. Niet meenemen van deze tweede-orde effecten leidt daarom tot substantiële onderschatting van de kwetsbaarheid van deze linksegmenten.

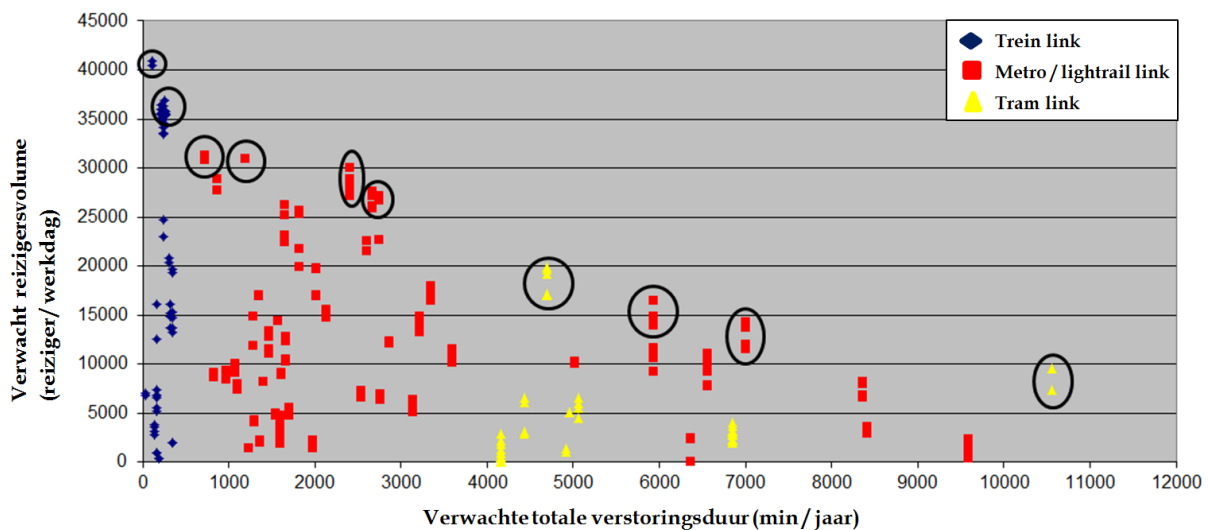


Figuur 3. Verwachte totale verstoringsduur per linksegment van het multi-level casestudy netwerk (geel links: tramnetwerk Den Haag; geel rechts: tramnetwerk Rotterdam)

Figuur 4 toont voor elke link de verwachte verstoringsduur (preselectie criterium I^3) en het verwachte reizigersvolume (criterium I^4) als benadering van de verstoringsimpact. Figuur 4 laat zien dat sommige links op het Pareto front liggen, ondanks de verwachte lage verstoringsimpact (bijv. de meest rechts gelegen gele punten in Figuur 4). Dit toont het belang aan om naast de verstoringsimpact ook expliciet de verstoringskans- en duur mee te nemen in een methodologie om kwetsbare links te identificeren. Indien alleen de verstoringsimpact zou worden gebruikt als criterium om kwetsbare links te vinden,

zouden alleen de drukste links worden geïdentificeerd, ongeacht de soms relatief lage verwachte verstoringsduur. Figuur 4 laat ook zien dat de links op het Pareto front niet van een specifiek netwerkniveau of een specifieke modaliteit afkomstig zijn. Treinnetwerk links zijn met name kwetsbaar door het grote aantal reizigers wat hinder ondervindt als een verstoring optreedt. Links van het metro / lightrail en tramnetwerk zijn vooral kwetsbaar bij een combinatie van een hoge verstoringsduur op een relatief drukke link. Na het beoordelen van het aantal alternatieve routes (preselectie criterium I^5) voor alle linksegmenten op het Pareto front (Yap 2014) blijft de volgende selectie van meest kwetsbare linksegmenten over in deze casestudy:

- Delft – Schiedam (trein)
- Wisselcomplex Gerdesiaweg / Voorschoterlaan – Kralingse Zoom (metro)
- Brouwersgracht – Den Haag Centraal Station (tramtunnel) (tram)
- Rodenrijs – Melanchtonweg (lightrail)
- Laan van NOI – Forepark (lightrail).



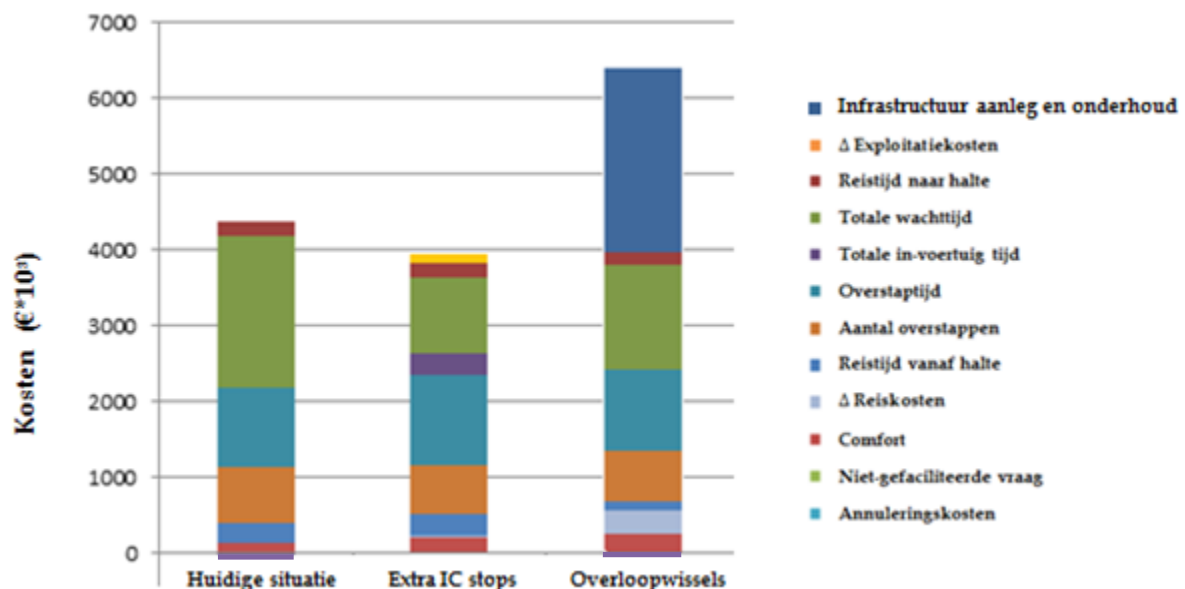
Figuur 4. Verwachte verstoringsduur (I^3) en verwacht reizigersvolume (I^4) voor links in het multi-level casestudy netwerk. Omcirkelde links liggen op of nabij het Pareto front.

De methodologie om link (on)robuustheid en robuustheidseffecten van maatregelen te waarderen is ter illustratie toegepast op het lightrail segment Laan van NOI – Forepark.

5.2 Waardering van (on)robuustheid van lightrail segment Laan van NOI – Forepark

Na toepassing van Monte Carlo simulatie om verstoringen te genereren blijkt dat het lightrail segment Laan van NOI – Forepark, geëxploiteerd door HTM en RET, gedurende 10 jaar 964 uur versperd is als gevolg van grote verstoringen. Bij een exploitatie van 18 uur per dag komt dit neer op 1.5% van de exploitatietijd. Toepassing van vergelijking (6) om de kosten van onrobuustheid te waarderen leidt tot een bedrag van €4.3 miljoen in 10 jaar. Deze waarde weergeeft de verwachte totale maatschappelijke kosten van grote verstoringen die de exploitatie op dit linksegment beïnvloeden. De gemiddelde maatschappelijke kosten van een verstoring bedragen €5.4 duizend. Figuur 5 (links) laat zien dat met name het extra overstappen met bijbehorende extra wachttijd en overstaptijd bijdraagt aan de kosten van onrobuustheid op dit linksegment.

Twee maatregelen ter verbetering van robuustheid van dit linksegment zijn geëvalueerd. Het OmniTRANS model laat zien dat veel reizigers die door de verstoring gehinderd worden omreizen via de (deels parallelle) Sprinter verbinding tussen Zoetermeer, Ypenburg en Den Haag. Daarom is een tijdelijke frequentieverhoging op deze verbinding voorgesteld door de intercitytreinen Den Haag – Utrecht extra te laten stoppen op Sprinter stations Zoetermeer en Den Haag Ypenburg, *alleen* op de momenten dat het lightrail segment Laan van NOI – Forepark versperd is. Dit verbetert de overstapmogelijkheden tussen de verschillende netwerkniveaus en maakt het treinnetwerk een aantrekkelijkere back-up voor het verstoorde lightrail netwerk. Nadeel is echter dat de reistijd voor doorgaande IC reizigers met ≈ 5 minuten toeneemt. Evaluatie van deze maatregel laat zien dat de maatschappelijke kosten van onrobuustheid na 10 jaar nu €3.9 miljoen bedragen. Vergeleken met de huidige situatie reduceert deze maatregel deze kosten met 8% en heeft daarmee een positieve Netto Contante Waarde. De gemiddelde kosten per verstoring bedragen €5.0 duizend. Figuur 5 (midden) laat zien dat de gemonetariseerde baten als gevolg van een substantiële wachttijdreductie groter zijn dan de gemonetariseerde kosten van extra in-voertuigtijd.



Figuur 5. Maatschappelijke kosten van onrobuustheid van linksegment Laan van NOI – Forepark voor de huidige situatie en de twee voorgestelde maatregelen

Tussen de haltes Laan van NOI en Forepark zijn in het geheel geen wissels aanwezig. Een verstoring ergens op dit linksegment leidt daarom tot een verstoorde exploitatie op het gehele linksegment. De tweede maatregel die geëvalueerd is, is het aanleggen van overloopwissels bij de halte Leidschendam-Voorburg, tussen Laan van NOI en Forepark. Hierdoor blijft bij een verstoring op een bepaalde locatie op dit linksegment de OV exploitatie op een deel van het linksegment (Laan van NOI – Leidschendam-Voorburg, of Leidschendam-Voorburg – Forepark) onverstoord. Hierdoor blijft een verstoring meer lokaal en wordt het tweede-orde terugslageffect van verstoringen gereduceerd. Figuur 5 (rechts) toont dat deze maatregel een positief effect heeft op de diverse reistijdcomponenten voor reizigers. Echter, het wordt duidelijk dat de aanleg- en onderhoudskosten voor de overloopwissels aanzienlijk groter zijn dan deze reistijdbaten. Ook leidt de aanleg van extra wissels tot meer wisselstoringen, hetgeen in de Monte

Carlo simulatie tot uiting komt doordat de linksegment-delen Laan van NOI – Leidschendam-Voorburg en Leidschendam-Voorburg – Forepark samen nu gedurende 1.7% van de exploitatietijd zijn versperd. In totaal stijgen de maatschappelijke kosten van verstoringen bij deze maatregel met 35%, hetgeen een negatieve NCW indiceert.

6. Conclusies

Ondanks het belang van robuuste openbaar vervoer netwerken wordt dit onderwerp door zowel wetenschap als praktijk nog niet volledig vanuit een reizigersperspectief benaderd. In tegenstelling tot mono-level benaderingen wordt in dit onderzoek het integrale, totale multi-level OV netwerk in beschouwing genomen dat na een verstoring voor reizigers beschikbaar blijft. Hiermee wordt op realistische wijze inzicht verkregen in de effecten van verstoringen op reizigers.

Een nieuwe methodologie is ontwikkeld om de meest kwetsbare links in een multi-level OV netwerk te identificeren. Een casestudy in de Randstad Zuidvleugel illustreert het belang om, naast de verstoringssimpact, ook verstoringsskansen en verstoringssduur expliciet in deze methodologie mee te nemen. Ook is het van belang om in deze methodologie tweede-orde terugslag-effecten van verstoringen mee te nemen, aangezien link robuustheid anders substantieel kan worden overschat. Dit onderzoek stelt ons in staat om de maatschappelijke waarde van (on)robuustheid te moneteriseren, in aanvulling op reeds gekwantificeerde tijd- en betrouwbaarheidswaarderingen. Deze methodologie kan daarmee vervoersautoriteiten en vervoerders ondersteunen tijdens besluitvorming aangaande het al dan niet implementeren van robuustheidsmaatregelen.

Op basis van ons onderzoek formuleren we drie aanbevelingen voor de OV sector. Ten eerste adviseren we om bij een robuustheidsanalyse mogelijk beschikbare restcapaciteit op andere netwerkniveaus van andere vervoerders in beschouwing te nemen, voordat geld geïnvesteerd wordt in nieuwe robuustheidsmaatregelen. De casestudy laat zien hoe een bepaald netwerkniveau bij verstoringen als back-up voor een ander netwerkniveau kan fungeren. Ten tweede adviseren we om, indien in een tweede fase alsnog robuustheidsmaatregelen worden toegepast, te richten op kleine maatregelen. Yap (2014) en onze casestudy laten zien dat tijdelijke lijnvoeringmaatregelen (zoals het tijdelijk extra laten stoppen van intercitytreinen op enkele Sprinter stations) en kleine infrastructurele maatregelen vanuit maatschappelijk perspectief potentie hebben om robuustheid verder te verbeteren. Grotere infrastructurele maatregelen (zoals de aanleg van overloopwissels) leiden tot grote financiële en maatschappelijke kosten voor reizigers en vervoerders gedurende de onverstoord situatie, die veelal groter zijn dan de robuustheidsbaten tijdens de momenten dat een verstoring optreedt. Ten derde wordt aanbevolen om de verdeling van financiële en maatschappelijke kosten en baten over stakeholders in beschouwing te nemen bij implementatie van een maatregel. Bij de maatregel 'extra IC stops' in de casestudy draagt de NS de grootste kosten als gevolg van extra dienstregeling-uren van de intercitytreinen, terwijl de verstoring optreedt op door HTM en RET geëxploiteerd netwerk. Voor een succesvolle implementatie lijkt het verstrekken van een (financiële) incentive aan NS door HTM, RET of een vervoersautoriteit noodzakelijk.

Tenslotte kunnen aanbevelingen voor verder onderzoek worden geformuleerd. Ten eerste is bij de reizigerstoedeling in dit onderzoek alleen gebruik gemaakt van pre-trip route keuze, waarbij gedurende de hele reis volledige informatie over een verstoring en route alternatieven is verondersteld. Hiermee kan de potentie van het multi-level netwerk om verstoringen op te vangen worden getoond. Aanbevolen wordt echter om ook de soms beperkte informatie over verstoringen en beschikbare route alternatieven tijdens een reis, in combinatie met en-route route keuze, op te nemen in de reizigerstoedeling. Ten tweede zijn kosten om de oorspronkelijke dienstregeling, voertuig- en personeelsomloop te herstellen niet meegenomen bij de waardering van robuustheid. Aanbevolen wordt om dit ook te kwantificeren. Tenslotte wordt aanbevolen om netwerkwijde effecten van de maatregel 'extra IC stops' te kwantificeren, zoals in hoeverre aansluitingen verderop in de reis gemist worden als gevolg van de tijdelijk langere reistijd van de intercitytreinen.

Acknowledgements

Dit onderzoek is gebaseerd op een MSc afstudeerscriptie aan de TU Delft, begeleid onder leiding van prof.dr.ir. Bart van Arem. De auteurs bedanken Bart van Arem, Goudappel Coffeng, HTM, RET en ProRail voor hun bijdrage aan dit onderzoek.

Referenties

Corman, F., D'Ariano, A. and Hansen, I.A. (2014). Evaluating disturbance robustness of railway schedules. *Journal of Intelligent Transport Systems*, 18(1), 106-120.

Corman, F., D'Ariano, A., Pacciarelli, D. and Pranzo, M. (2010). A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations. *Transportation Research Part B*, 44(1), 175-192.

Furth, P. G. and Muller, T.H.J. (2009). Optimality conditions for public transport schedules with timepoint holding. *Public Transport*, 1, 87-102.

Hollander, Y. (2006). Direct versus indirect models for the effects of unreliability. *Transportation Research Part A*, 40(9), 699-711.

Immers, B., Egeter, B., Snelder, M. and Tampère, C.M.J. (2011). Reliability of travel times and robustness of transport networks. In M. Kutz (Ed.), *Handbook of Transportation Engineering* (pp.3.1-3.30). New York, USA: McGraw-Hill.

Jenelius, E., Petersen, T. and Mattsson, L-G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A*, 40, 537-560.

Knoop, V.L., Snelder, M., Van Zuylen, H.J. and Hoogendoorn, S.P. (2012). Link-level vulnerability indicators for real-world networks. *Transportation Research Part A*, 46, 843-854.

Korteweg, J.A. en Rienstra, S. (2010). *De betekenis van robuustheid. Robuustheid in kosten-batenanalyses van weginfrastructuur*. Den Haag, Nederland: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

- Lee, A., Van Oort, N. and Van Nes, R. (2014). Service reliability in a network context: impact of synchronizing schedules in long headway services. *Transportation Research Record (in press)*.
- Li, M. (2008). *Combining DTA Approaches for Studying Road Network Robustness* (Doctoral dissertation). Delft University of Technology, the Netherlands.
- Savelberg, F. en Bakker, P. (2010). *Betrouwbaarheid en robuustheid op het spoor*. Den Haag, Nederland: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
- Snelder, M. (2010). *Designing Robust Road Networks. A General design method applied to the Netherlands* (Doctoral dissertation). Delft University of Technology, the Netherlands.
- Tahmassby, S. (2009). *Reliability in Urban Public Transport Network Assessment and Design* (Doctoral dissertation). Delft University of Technology, the Netherlands.
- Tahmasseby, S., Van Oort, N. and Van Nes, R. (2008). The role of infrastructures on public transport service reliability. *Proceedings of the First International IEEE Conference on Infrastructure Systems and Services: Building Networks for a Brighter Future*, 1-5.
- Tampère, C.M.J., Stada, J., Immers, B., Peetermans, E. and Organe, K. (2008). Methodology for Identifying Vulnerable Sections in a National Road Network. *Transportation Research Record*, 2012, 1-10.
- Van Oort, N. (2011). *Service Reliability and Urban Public Transport Design*, T2011/2, TRAIL PhD Thesis Series, Delft, the Netherlands.
- Van Oort, N. and Van Nes, R. (2009). Regularity analysis for optimizing urban transit network design. *Public transport*, 1(2), 155-168.
- Van Oort, N. and Van Nes, R. (2010). The impact of rail terminal design on transit service reliability. *Transportation Research Record*, 2146, 109-118.
- Van Oort, N., Wilson, N.H.M. and Van Nes, R. (2010). Reliability improvement in short headway transit services: schedule-based and headway-based holding strategies. *Transportation Research Record*, 2143, 67-76.
- Vromans, M.J.C.M., Dekker, R. and Kroon, L.G. (2006). Reliability and heterogeneity of railway services. *European Journal of Operational Research*, 172(2), 647-655.
- Xuan, Y., Argote, J. and Daganzo, C.F. (2011). Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis. *Transportation Research Part B*, 45, 1831-1845.
- Yap, M.D. (2014). *Robust public transport from a passenger perspective: a study to evaluate and improve the robustness of multi-level public transport networks* (Master thesis). Delft University of Technology, the Netherlands.