TVW

Tijdschrift Vervoerswetenschap
Jaargang 51, nummer 1
Februari 2015
pagina 82-99
ISSN: 1571-9227
www.vervoerswetenschap.nl.

Robuustheid van multi-level openbaar vervoer netwerken

Een methodologie om (on)robuustheid te kwantificeren vanuit een reizigersperspectief

Menno Yap
Goudappel Coffeng[1]

Niels van Oort
TU Delft / Goudappel Coffeng[2]

Rob van Nes
TU Delft [3]

Bart van Arem
TU Delft[4]

Ondanks het belang van robuuste openbaar vervoer netwerken, wordt dit onderwerp door wetenschap en praktijk nog niet volledig vanuit een reizigersperspectief benaderd. Traditioneel wordt robuustheid vanuit een mono-level perspectief benaderd: voor elk netwerk op een bepaald functioneel niveau apart. Dit onderzoek analyseert het totale multi-level openbaar vervoer netwerk (de netwerken op alle functionele niveaus van alle vervoerders tezamen) wat voor reizigers beschikbaar blijft na het optreden van een verstoring. We hebben een nieuwe methodologie ontwikkeld om de meest kwetsbare links in het multi-level netwerk te identificeren. Zover ons bekend, is dit de eerste methodologie waarbij zowel de mate van blootstelling aan verstoringen als de impact van deze verstoringen systematisch geanalyseerd wordt voor openbaar vervoer netwerken. De case study van de Randstad Zuidvleugel benadrukt het belang om verstoringskansen expliciet mee te nemen in deze methodologie. Het al dan niet in beschouwing nemen van de verstoringskans, naast de verstoringsimpact, beïnvloedt namelijk in sterke mate het resultaat van de methodologie. Ook wordt in dit onderzoek de maatschappelijke waarde van robuustheid voor reizigers gemonetariseerd. Tot op heden zijn alleen de kosten van robuustheidsmaatregelen bekend. Toepassing van onze methodologie geeft daarnaast ook inzicht in de robuustheidsbaten van deze maatregelen. Hiermee ondersteunt en rationaliseert onze methodologie besluitvorming wat betreft de implementatie van robuustheidsmaatregelen.

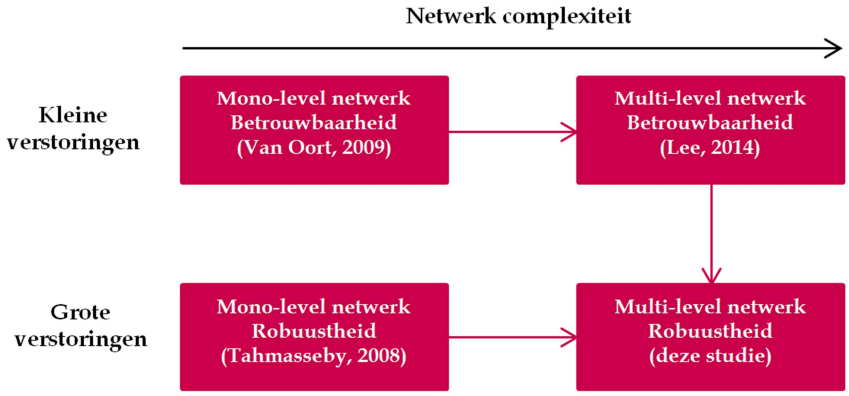
Trefwoorden: kwetsbare links; multi-level openbaar vervoer netwerken; reizigersperspectief; robuustheid; verstoringen; waarde van robuustheid

[1] Goudappel Coffeng, E: *MYap@Goudappel.nl*
[2] TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, / Goudappel Coffeng, E: *N.vanOort@TUDelft.nl*
[3] TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, E: *R.vanNes@TUDelft.nl*
[4] TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, E.: *B.vanArem@TUDelft.nl*

1. Introductie

De exploitatie van openbaar vervoer (OV) zonder verstoringen wordt door reizigers als zeer belangrijk ervaren (Golob et al. 1972, Van Oort 2011). Daarom is het belangrijk om inzicht te verkrijgen in de frequentie waarmee verstoringen in het openbaar vervoer optreden, en de impact hiervan op reizigers. Ondanks het belang dat reizigers hechten aan een punctuele, verstoringsvrije OV exploitatie, formuleren we op basis van literatuurstudie drie conclusies waarom dit onderwerp nog niet volledig vanuit een reizigersperspectief wordt benaderd.

Ten eerste richten huidige studies zich met name op betrouwbaarheid: gedefinieerd als de overeenkomst tussen geplande en gerealiseerde OV exploitatie in relatie tot kleine, terugkerende verstoringen die geen invloed hebben op infrastructuur beschikbaarheid. Onder meer door Hollander (2006) en Van Oort en Van Nes (2009) zijn studies verricht naar verbetering van betrouwbaarheid van mono-level OV netwerken (Figuur 1 linksboven). Hierbij wordt betrouwbaarheid alleen bekeken voor een bepaald OV netwerkniveau (alleen het stedelijke of regionale OV netwerk bijvoorbeeld), of alleen voor het OV netwerk geëxploiteerd door één vervoerder. Voorbeelden van maatregelen ter verbetering van betrouwbaarheid van mono-level OV netwerken op strategisch, tactisch en operationeel niveau kunnen gevonden worden in Vromans et al. (2006), Delgado (2009), Furth (2009), Corman et al. (2010), Van Oort et al. (2010), Van Oort en Van Nes (2010) en Xuan et al. (2011). Daarnaast richten studies zich ook op betrouwbaarheid van multi-level OV netwerken, waarbij interacties tussen verschillende netwerkniveaus in beschouwing worden genomen (bijvoorbeeld Rietveld et al. 2001 en Lee et al. 2014) (zie Figuur 1 rechtsboven). Een dergelijke multi-level benadering van betrouwbaarheid maakt het mogelijk om bijvoorbeeld de gevolgen van een vertraging op het treinnetwerk voor aansluitingen op busverbindingen op een lager netwerkniveau inzichtelijk te maken.



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

Ten tweede worden bij studies naar robuustheid van openbaar vervoer, wat gerelateerd is aan afwijkingen van de dienstregeling veroorzaakt door grote verstoringen die infrastructuur beschikbaarheid beïnvloeden, alleen mono-level OV netwerken geanalyseerd (Figuur 1 linksonder). Verschillende definities voor robuustheid worden gehanteerd in wetenschappelijke literatuur (bijvoorbeeld Ziha 2000, Holmgren 2007, Van Nes et al. 2007, Tahmasseby 2009, Korteweg en Rienstra 2010, Savelberg en Bakker 2010, Snelder 2010, Immers et al. 2011, Parbo et al. 2013, Dewilde et al. 2014). Wij hanteren een definitie waarbij robuustheid, in contrast met betrouwbaarheid, alleen gerelateerd is aan grote verstoringen: *'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'*. De functie van een OV netwerk is gedefinieerd als *'het bieden van verbindingen aan*

reizigers binnen de verwachte reistijd, tegen verwachte reiskosten en met het verwachte reiscomfort.' Deze definitie is in lijn met de definitie zoals gehanteerd door Dewilde et al. (2014) voor kleine verstoringen. Grote verstoringen die infrastructuur beschikbaarheid beïnvloeden leiden tot aanpassingen in de OV diensten, die zich vertalen in negatieve effecten voor reizigers. Vanuit een reizigersperspectief is het met name bij grote verstoringen belangrijk om niet alleen reistijdeffecten van verstoringen inzichtelijk te maken, maar ook effecten op reiskosten en comfort. Voorbeelden van studies naar robuustheid van mono-level OV netwerken zijn Goverde (2005), Kroon et al. (2008), Tahmasseby (2008), Cicerone et al. (2009), Fischetti et al. (2009), Schöbel en Kratz (2009) en Corman et al. (2014). Hierbij wordt robuustheid apart geanalyseerd voor elk OV netwerk op een bepaald functioneel netwerkniveau (mono-level perspectief), of voor het OV netwerk geëxploiteerd door één bepaalde vervoerder (mono-vervoerder perspectief). Vaak wordt niet of nauwelijks bekeken in hoeverre een bepaald netwerkniveau, of een OV netwerk geëxploiteerd door vervoerder X_1, als back-up kan fungeren in geval een grote verstoring optreedt op een ander netwerkniveau geëxploiteerd door vervoerder X_2.

Vanuit een reizigersperspectief is het echter van belang om in geval van grote verstoringen op het OV netwerk het multi-level OV netwerk in beschouwing te nemen wat beschikbaar blijft voor reizigers (Figuur 1 rechtsonder). Dit betekent dat alle OV netwerken op alle functionele netwerkniveaus, geëxploiteerd door verschillende vervoerders, integraal worden geanalyseerd. Reizigers gebruiken namelijk in hun deur-tot-deur reis veelal ook OV diensten op verschillende netwerkniveaus, vaak geëxploiteerd door verschillende vervoerders. In de periode 2006-2009 werd bijvoorbeeld 89.8% van alle reizen met trein als hoofdvervoerwijze in Nederland als multimodaal (reizen met andere OV-diensten dan de trein of niet-OV diensten) geclassificeerd (Van Nes et al. 2014). Indien elke vervoerder bij een verstoring alleen het netwerkdeel wat zijzelf exploiteert beschouwt, leidt dit vanuit een reizigersperspectief tot suboptimale bijsturing. Dit betekent dat potentiële voor reizigers beschikbare back-up netwerkniveaus niet in beschouwing worden genomen. Potentieel effectieve maatregelen op netwerkniveau X_1, welke robuustheid voor passagiers kunnen verbeteren als gevolg van verstoringen op netwerkniveau X_2, worden niet in ogenschouw genomen. Ook leidt dit tot een onvolledige en onjuiste evaluatie van reizigerseffecten van verstoringen, aangezien reizigers bij verstoringen ook het gehele beschikbare multi-level OV netwerk in ogenschouw (kunnen) nemen. Dit betekent dat wat betreft OV robuustheid momenteel nog geen volledig reizigersperspectief wordt gehanteerd.

Ten derde zijn in discussies rondom robuustheid veelal alleen de kosten van robuustheidsmaatregelen (zoals de kosten van wisselverwarming of extra wissels) bekend. De maatschappelijke kosten van verstoringen, en de baten van diezelfde robuustheidsmaatregelen, zijn tot op heden onbekend. Voor volledige informatie bij besluitvorming over het al dan niet implementeren van bepaalde maatregelen ter verbetering van robuustheid is het noodzakelijk om inzicht te hebben in zowel de maatschappelijke kosten en baten van deze maatregelen.

Onze studie vult deze kennishiaten in (Figuur 1). We hebben een methodologie ontwikkeld om de meest kwetsbare links in het multi-level OV netwerk te identificeren. Op basis hiervan kwantificeren we de maatschappelijke kosten van de onrobuustheid van deze kwetsbare links, gegeven het totaal beschikbare multi-level netwerk. Deze methodologie is toegepast op de Randstad Zuidvleugel als case study. Hier vergelijken we de robuustheid van verschillende netwerkniveaus. We gebruiken het integrale multi-level OV netwerk om maatregelen ter verbetering van de robuustheid van de meest kwetsbare links te ontwerpen en om de robuustheidsbaten ervan te kwantificeren. Toepassing van deze methodologie ondersteunt daarmee besluitvorming aangaande de implementatie van robuustheidsmaatregelen.

De structuur van dit paper is als volgt. Hoofdstuk 2 bespreekt de ontwikkelde methodologie om kwetsbare links te identificeren en (on)robuustheid van deze links te kwantificeren. Hoofdstuk 3 toont de resultaten van toepassing van deze methodologie op een case study. We besluiten het paper met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 4.

2. Methodologie

2.1 Robuustheid en kwetsbaarheid

Robuustheid en kwetsbaarheid zijn omgekeerd evenredig aan elkaar: een netwerk met 0% kwetsbaarheid is 100% robuust (Tahmasseby 2009, Snelder 2010). Hoe kwetsbaarder een netwerk – hoe gevoeliger OV diensten zijn voor grote verstoringen – hoe minder een OV netwerk in staat is om reizigers bij grote verstoringen verbindingen te bieden binnen de verwachte reistijd, tegen verwachte reiskosten en met verwacht reiscomfort. Veronderstel een multi-level OV netwerk weergeven 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 bezien hangt de kwetsbaarheid van een link $e_n \in E_n$ af van de mate waarin deze link blootgesteld wordt aan grote verstoringen en de consequenties van deze verstoringen voor reizigers gegeven het totaal beschikbare OV netwerk N. De kwetsbaarheid c_{e_n} van link e_n kan daarom worden uitgedrukt volgens vergelijking (1).

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

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 voorkomen op die link en de duur τ_{e,δ_n} van elke verstoring. Zowel de frequentie waarmee verstoringen voorkomen als de duur van elke verstoring zijn probabilistisch, wat leidt tot vermenigvuldiging van het verwachte aantal verstoringen $E\left(f_{e,\delta_n}\right)$ per tijdsinterval en de verwachte duur van elke verstoring $E\left(\tau_{e,\delta_n}\right)$ – waarbij zowel f_{e,δ_n} als τ_{e,δ_n} random variabelen zijn. $\Delta W_{e,\delta_n,\tau}$ geeft het verschil weer in totale gemonitariseerde maatschappelijke kosten tussen het specifieke verstoringsscenario en de onverstoorde situatie voor alle reizigers die reizen over alle HB-paren die beïnvloed worden door een specifieke verstoring δ_n.

Traditioneel wordt bij OV netwerken link kwetsbaarheid c_{e_n} alleen beoordeeld op basis van de impact van een verstoring. Een verklaring hiervoor is de beperkte beschikbaarheid van historische data over de frequentie f_{e,δ_n} en duur τ_{e,δ_n} van verschillende verstoringstypen δ_n op elk netwerkniveau n. Dit betekent dat blootstelling aan verstoringen niet expliciet wordt meegenomen wanneer de kwetsbaarheid van een link wordt vastgesteld. In plaats daarvan wordt een conditionele kwetsbaarheid berekend, zie vergelijking (2). Dit impliceert dat links waarbij verstoringen de meest negatieve impact hebben op reistijd, -kosten en –comfort van reizigers als meest kwetsbaar worden geïdentificeerd, zelfs als de frequentie waarmee deze verstoringen voorkomen zeer laag zou zijn. Vergelijking (1) daarentegen neemt blootstelling aan verstoringen expliciet in beschouwing: links waarbij de combinatie van blootstelling aan verstoringen en impact van deze verstoringen erg groot is, worden als meest kwetsbaar beschouwd.

$$c_{e_n} = \Delta W_{e,\delta_n,\tau} | \delta_n \quad (2)$$

In dit onderzoek is een dataset geanalyseerd met realisatiedata over 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. Dit maakt het mogelijk om blootstelling aan verstoringen voor elk netwerkniveau expliciet in beschouwing te nemen in de analyse naar netwerk robuustheid. Voor zowel de frequentie als de duur van elke verstoring δ_n is statistisch getoetst in hoeverre de empirische data een theoretische kansverdeling fitten. Voor elke verstoring δ_n zijn parameterwaarden f_{δ_n} en τ_{δ_n} geschat voor de kansverdelingsfuncties. Omdat met name de frequentie waarmee sommige verstoringen voorkomen beïnvloed kan worden door weersomstandigheden, zijn seizoen-specifieke

frequentieparameters geschat indien statistische significante verschillen tussen seizoenen werden gevonden (zie Yap (2014) voor een gedetailleerde toelichting op deze analyse).

Alle verstoringen δ_n zijn geclassificeerd op basis van de impact op infrastructuur beschikbaarheid en de impact op reizigersvraag. Sommige verstoringen leiden normaliter tot het gedeeltelijk niet beschikbaar zijn van een link (zoals een defecte tram), terwijl andere verstoringen de gehele link blokkeren (zoals een aanrijding op een spoorwegovergang tussen trein en auto). Verstoringen met een lage voorspelbaarheid (een ongeplande verstoring) zullen veelal de vervoersvraag op beïnvloede HB-paren niet of nauwelijks reduceren, aangezien reizigers in het algemeen niet van tevoren wisten dat deze verstoring zou optreden. Geplande verstoringen met een hoge mate van voorspelbaarheid (zoals aangekondigde onderhoudswerkzaamheden) kunnen de vervoersvraag echter wel *a priori* reduceren. Sommige reizigers op deze HB-paren kunnen namelijk besluiten hun vervoerswijze- of bestemmingskeuze te wijzigen, of de reis geheel te annuleren. Omdat $\Delta W_{e,\delta_n,\tau}$ anders zal zijn in het geval OV aanbod op een link gedeeltelijk of geheel uitgevallen is, of indien de vervoersvraag *a priori* beïnvloed is of niet, is het noodzakelijk om verschillende verstoringsscenario's S te onderscheiden op basis van deze twee dimensies waarvoor de link kwetsbaarheid c_{S,e_n} kan worden berekend.

2.2 Identificatie van kwetsbare links

Om robuustheid van een OV netwerk te verbeteren is het belangrijk om te identificeren welke links het meest kwetsbaar zijn. In wetenschappelijke literatuur worden twee verschillende methoden toegepast om kwetsbare links in een netwerk te identificeren (Knoop et al. 2012). De eerste methode maakt gebruik van zogenaamde 'full computation methods'. Hierbij worden verstoringen op elke link $e \in E$ van het netwerk apart gesimuleerd om de kwetsbaarheid ervan ten opzichte van andere links te evalueren. Het voordeel van deze methoden is de compleetheid, aangezien de kwetsbaarheid van de volledig set links E kan worden beoordeeld en vergeleken. Het grootste nadeel is dat deze methoden erg tijdrovend kunnen zijn. In de tweede methode worden preselectie criteria gespecificeerd om een voorselectie te maken van een kleiner aantal kwetsbare links in het netwerk. Verstoringen worden vervolgens in een tweede stap alleen op deze geselecteerde links gesimuleerd. Met deze benadering wordt het nadeel van lange rekentijden van 'full computation methods' overkomen. Aangezien selectiecriteria gebruikt worden om een short-list van kwetsbare links op te stellen, is er echter geen garantie dat inderdaad de meest kwetsbare links overblijven na de selectiefase.

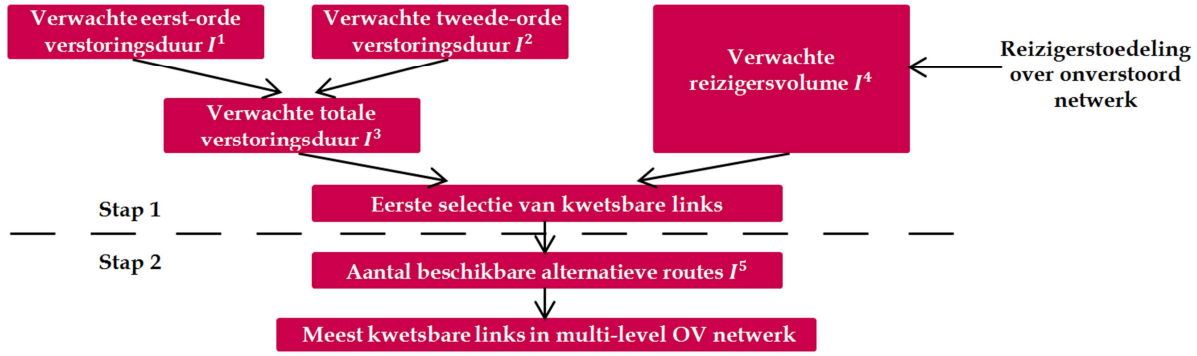
Aangezien complexe, real-world multi-level OV netwerken zoals relevant in dit onderzoek normaliter gemodelleerd worden met een zeer groot aantal links, zou de rekentijd onacceptabel lang worden indien alle relevante verstoringsscenario's gesimuleerd zouden moeten worden voor elke link apart. Daarom is het noodzakelijk om een voorselectie van meest kwetsbare links te maken. In wetenschappelijke literatuur bestaan diverse criteria om een dergelijke voorselectie te maken voor wegnetwerken. Echter, er is zeer weinig literatuur waarin preselectie criteria gespecificeerd worden voor openbaar vervoer netwerken. Alleen recent kan een enkel voorbeeld gevonden worden (Cats en Jenelius 2014). Daarom hebben wij een nieuwe methodologie ontwikkeld om de meest kwetsbare links te identificeren in multi-level OV netwerken. Deze methodologie is 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) en aangepast op basis van karakteristieken van OV netwerken.

We kunnen vier belangrijke conclusies formuleren wanneer de geschiktheid van voor wegnetwerken gebruikte preselectie criteria geanalyseerd wordt om kwetsbare links in multi-level OV netwerken te vinden. Ten eerste, bij criteria die de verstoringskans bij wegnetwerken in beschouwing nemen wordt deze kans berekend per link. Voor OV netwerken is het zinvoller om de verstoringskansen per link *segment* te berekenen. In geval van verstoringen passen

vervoerders veelal een standaard verstoringsscenario toe, waarin voor elke plaats in het netwerk gespecificeerd is hoe OV diensten worden aangepast in geval een tracé gedeeltelijk of geheel niet beschikbaar is. Aangezien bijsturingsmaatregelen voor OV diensten afhankelijk zijn van de beschikbaarheid van wissels, keerlussen, voldoende capaciteit bij stations etc., zullen deze bijsturingsmaatregelen exact hetzelfde zijn voor aangrenzende links waartussen geen wissels of andere bijsturingsmogelijkheden aanwezig zijn. Verstoringsscenario's en verstoringskansen worden daarom gespecificeerd per link segment – een set aangrenzende links welke door de vervoerder zijn samen genomen waarvoor één standaard verstoringsscenario geldt – in plaats van per link. Ten tweede, sommige criteria gespecificeerd voor wegnetwerken richten zich alleen op de impact van een verstoring, terwijl andere criteria zowel de verstoringskans als impact expliciet in beschouwing nemen. Criteria die alleen de verstoringsimpact in beschouwing nemen, veronderstellen impliciet een gelijke verstoringskans voor elke link. Wanneer verstoringskansen wel meegenomen worden bij wegnetwerken wordt vaak één generieke predictor (zoals link lengte) gehanteerd om verstoringskansen voor verschillende links te onderscheiden. Yap (2014) laat echter zien dat voor verschillende verstoringstypen δ_n geïdentificeerd op een multi-level OV netwerk verschillende predictoren (zoals link segment lengte, voertuigkilometers per link segment) gebruikt zouden moeten worden om verstoringskansen voor verschillende link segmenten te onderscheiden. Ook wordt nadrukkelijk aangetoond dat de kans op een bepaalde verstoring δ verschillend is op verschillende OV netwerkniveaus, als gevolg van verschillende netwerkkarakteristieken. Dit laat zien dat het niet volstaat om een gelijke verstoringskans te veronderstellen voor alle links in een multi-level OV netwerk. Preselectie criteria voor multi-level OV netwerken zouden daarom zowel de verstoringskans (met verschillende predictoren voor verschillende verstoringen δ and verschillende parameterwaarden f_{δ_n} voor verschillende netwerkniveaus) als de impact van een verstoring op reizigers expliciet moeten duiden. Ten derde, bij wegnetwerken wordt een ratio tussen verkeersvolume en capaciteit (zoals de Incident Impact Factor of V/C ratio) gebruikt als proxy voor de impact van een verstoring. Aangezien de werkelijke verstoringsimpact op reistijd, -kosten en -comfort $\Delta W_{e,\delta_n,\tau}$ alleen bepaald kan worden na simulatie van verstoringen met een 'full computation method', is het noodzakelijk om een proxy voor deze impact te gebruiken. Bij OV netwerken is de relatie tussen volume en capaciteit minder relevant om de gevolgen van een verstoring te benaderen, aangezien op OV netwerken – zelfs in het geval van verstoringen – zeer beperkt congestie tussen OV voertuigen optreedt vergeleken met congestie tussen wegvoertuigen. De verstoringsimpact bij OV netwerken kan daarom beter benaderd worden met het aantal reizigers dat door de verstoring gehinderd wordt, in plaats van met de V/C ratio van OV voertuigen op een bepaalde link. Daarom is het reizigersvolume op de door een verstoring geraakte link een betere proxy om de impact van een verstoring te weergeven. Ten vierde, bij wegnetwerken richten sommige preselectie criteria zich alleen op de impact van een verstoring op de betreffende link e zelf, terwijl andere criteria ook terugslag effecten naar aangrenzende links j of gridlock effecten in beschouwing nemen. Bij wegnetwerken is duidelijk dat verstoringen terugslag effecten kunnen hebben op andere links. Bij OV netwerken zijn deze terugslag effecten echter anders dan bij wegnetwerken. Als gevolg van de beperkte congestie tussen OV voertuigen is er bij een verstoring geen of slechts een beperkt direct terugslag effect op OV voertuigen op aangrenzende link segmenten. OV diensten op link segmenten $js \neq es$ kunnen echter zeker beïnvloed worden door een verstoring op link segment es. Zoals aangegeven passen vervoerders standaard verstoringsscenario's toe, waarbij OV lijnen worden gesplitst, ingekort, omgeleid of geheel opgeheven. Bijvoorbeeld, indien OV lijn L opgeheven wordt als gevolg van een verstoring op link segment es, ondervinden passagiers die over andere link segmenten $js \in L$ reizen duidelijk hinder. Dit laat zien dat OV diensten op een bepaald link segment es aangetast kunnen worden door een eerste-orde effect – een verstoring die op het betreffende link segment es zelf plaats vindt – en door een tweede-orde effect. Dit tweede-orde effect is relevant wanneer een verstoring optreedt op een link segment js, wat leidt tot het toepassen van een verstoringsscenario door de vervoerder of infrastructuurbeheerder

waarbij ook OV aanbod op het betreffende link segment es aangetast wordt. Behalve gedurende de transitiefase tussen onverstoorde OV exploitatie en een specifiek verstoringsscenario kan het terugslag effect bij OV netwerken als meer statisch worden beschouwd vergeleken met het dynamische terugslag effect wat bij wegnetwerken optreedt. Gridlock effecten zijn nauwelijks relevant voor OV netwerken.

Op basis van deze conclusies stellen we een nieuwe methodologie voor om de meest kwetsbare links in multi-level OV netwerken te identificeren (zie Figuur 2), waarvoor de volgende preselectie criteria I^1 tot I^5 gespecificeerd zijn.



Figuur 2. Stappenplan 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

$$I^1_{es} = \sum_{pr} \sum_{\delta,pr} \sum_{w} f^*{}_{\delta_n prw} * \frac{x_{pr,es}}{x_{pr,n}} * \tau^*{}_{\delta_n w} \qquad \forall \ es \in E \tag{3}$$

I^1_{es} geeft het eerste-orde effect weer: de verwachte verstoringsduur van een bepaald link segment es_n in een bepaald tijdinterval als gevolg van het optreden van grote verstoringen op het betreffende link segment zelf. Deze verstoringsduur is het product van de gemiddelde frequentie $f^*{}_{\delta_n prw}$ waarmee verstoring δ_n per tijdinterval voorkomt op netwerkniveau n in seizoen w en de gemiddelde duur $\tau^*{}_{\delta_n w}$ van elke verstoring δ_n in seizoen w. Voor elke δ_n is een predictor pr vastgesteld om de gemiddelde frequentie waarmee δ_n per tijdinterval voorkomt op het gehele netwerkniveau n (wat verkregen is vanuit historische data) te transformeren naar de gemiddelde frequentie per link segment es. Deze transformatie is gebaseerd op de ratio tussen de waarden van deze predictor $x_{pr,es}$ op link segment es en de waarde $x_{pr,n}$ op het totale netwerkniveau n. Bij dit criterium zijn alleen de gemiddelde frequentie f^* en gemiddelde duur τ^* van een verstoring gebruikt. In dat geval is geen Monte Carlo simulatie noodzakelijk om waarden uit de geïdentificeerde verdelingsfuncties te trekken, hetgeen rekentijd reduceert.

$$I^2_{es} = \sum_{js} \sum_{pr} \sum_{\delta,pr} \sum_{w} f^*{}_{\delta_n prw} * \frac{x_{pr,es}}{x_{pr,n}} * \tau^*{}_{\delta_n w} \qquad \forall \ es \in E \tag{4}$$

I^2_{es} geeft de verwachte verstoringsduur van een bepaald link segment es_n in een bepaald tijdinterval weer als gevolg van het beschreven tweede-orde effect. In dit onderzoek hebben we de verstoringsscenario's zoals deze in werkelijkheid door vervoerders worden toegepast gebruikt om te bepalen welke andere link segmenten $js \neq es$ OV diensten op het link segment es beïnvloeden in geval van verstoringen.

$$I^3_{es} = I^1_{es} + I^2_{es} \qquad \forall \ es \in E \tag{5}$$

I^3_{es}, de som van de eerste-orde en tweede-orde effecten, geeft de verwachte totale verstoringsduur van een link segment es in een bepaald tijdinterval weer als gevolg van grote verstoringen.

$$I^4_e = q_e \qquad \forall \ e \in E \tag{6}$$

Waar I^3_{es} de verstoringskans per link segment expliciet berekent, geeft I^4_e de verwachte impact weer van een verstoring op basis van het reizigersvolume op de betreffende link e. Deze waarde kan bepaald worden na het toedelen van reizigers over het onverstoorde netwerk, wat het reizigersvolume laat zien dat over een bepaalde link e zou reizen in geval er geen verstoring zou zijn. Omdat het reizigersvolume kan verschillen voor verschillende links $e \in es$ wordt de waarde van I^4_e voor elke link e apart uitgedrukt. Voor alle geanalyseerde links van het multi-level netwerk kunnen de waarden van I^3_{es} en I^4_e tegen elkaar uitgezet worden. In deze plot wordt een Pareto front gevormd door links met de hoogste waarde op $I^3|I^4_n$ of andersom. Een eerste selectie van kwetsbare links op basis van deze preselectie criteria kan gemaakt worden door het selecteren van alle links welke op of vlakbij het Pareto front verschijnen. Aangrenzende links in het OV netwerk die allemaal op het Pareto front verschijnen kunnen als een link segment samen genomen worden.

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

$$I^5_e = \ aantal\ beschikbare\ alternatieve\ routes$$

Voor elk(e) in de eerste selectie opgenomen kwetsbare link (segment) kan het aantal beschikbare alternatieve routes I^5_e worden beoordeeld, gegeven het totale multi-level OV netwerk. Dit wordt, net als bij wegnetwerken, veelal kwalitatief beoordeeld op basis van expert judgement, omdat het aantal beschikbare alternatieve routes per HB-paar verschilt. Links waarvoor nauwelijks alternatieve routes beschikbaar zijn worden als meest kwetsbaar geclassificeerd, wat leidt tot een definitieve lijst van meest kwetsbare links.

2.3 Evaluatie en kwantificering van link onrobuustheid

Wanneer de meest kwetsbare links van het multi-level OV netwerk geïdentificeerd zijn, kan de robuustheid van deze links worden geëvalueerd en gekwantificeerd. Hierbij worden zowel de blootstelling aan verstoringen als de impact van deze verstoringen expliciet meegenomen, zie vergelijking (1). Voor elk verstoringsscenario S is voor een gekozen tijdhorizon Monte Carlo simulatie gebruikt worden om verstoringen δ_n met een bepaalde duur τ_{δ_n} te genereren. Op basis van de geschatte parameters voor frequentie en duur van $\delta_{n,w}$ kunnen waarden getrokken worden uit theoretische verdelingsfuncties. Na aanpassing van het OV netwerk en OV diensten volgens elk verstoringsscenario is een nieuwe reizigerstoedeling uitgevoerd. De totale gemonetariseerde maatschappelijke kosten $W_{e,\delta_n,\tau}$ voor alle reizigers over alle HB-paren kunnen vergeleken worden tussen de onverstoorde situatie en het specifieke verstoringsscenario S.

$$C_t = \sum_{o=1}^{n}\sum_{d=1}^{n} \left(\alpha_a t_a + \alpha_w \sum_{x=1}^{n_t+1} t_{w,x} + \ \alpha_{in} \sum_{y=1}^{n_t+1} t_{in,y} + \ \alpha_{n_t} n_t + \ \alpha_t \sum_{z=1}^{n_t} t_{t,z} + \ \alpha_e t_e\right) * VoT \tag{7}$$

Vergelijking (7) toont de berekening van de door reizigers ervaren, gemonetariseerde reistijdeffecten C_t voor een netwerk met n herkomsten O en n bestemmingen D. De verschillende reistijdcomponenten – de tijd van herkomst naar een halte t_a, wachttijd t_w voor het instappen van elk OV voertuig (het aantal wachtmomenten x is gelijk aan het aantal overstappen $n_t + 1$), in-voertuigtijd t_{in} voor elke OV voertuig (het aantal gebruikte OV voertuigen y is gelijk aan het aantal overstappen $n_t + 1$), het aantal overstappen n_t, looptijd t_t bij elke overstap z en de tijd van

een halte naar de uiteindelijke bestemming t_e – worden vermenigvuldigd met hun bijbehorende weegfactor α zoals ervaren door reizigers en gemonetariseerd met de Value of Time (VoT) (zie Bovy and Hoogendoorn-Lanser 2005 en Warffemius 2013 voor gebruikte waarden). Hierbij is een vaste VoT gebruikt, ongeacht de mate van vertraging die op een bepaald HB-paar is ontstaan. Naast reistijd effecten zijn ook de effecten van verstoringen op reiskosten C_c geëvalueerd. Het meenemen van C_c is met name belangrijk wanneer verstoringen in de context van multi-level OV netwerken worden geanalyseerd. In geval van verstoringen moeten reizigers vaak via een alternatieve, langere route reizen waarbij soms gebruik moet worden gemaakt van OV diensten van een andere vervoerder. Bij de evaluatie zijn ook de maatschappelijke kosten als gevolg van gereduceerd reiscomfort voor respectievelijk zittende reizigers $C_{comf,seat}$ en staande reizigers $C_{comf,stand}$ gekwantificeerd. Dit is van belang, omdat met name tijdens verstoringen de bezettingsgraad op overgebleven alternatieve routes in het OV netwerken substantieel kan toenemen. Ook de kosten als gevolg van niet-gefaciliteerde vraag $C_{non-f,t}$ zijn gekwantificeerd, aangezien het mogelijk is dat tijdens een verstoring het reizigersvolume op een link van een bepaalde alternatieve route groter is dan de totaal aangeboden capaciteit (zitplaatsen en staanplaatsen) op die link. Met behulp van de rule of half op de gegeneraliseerde reiskosten van elk beïnvloed HB-paar zijn annuleringskosten C_{cancel} meegenomen voor het percentage reizigers dat in geval van een voorspelbare storing hun OV reis *a priori* annuleert. Zie Yap (2014) voor een uitgebreide toelichting op de kwantificering van C_c, $C_{comf,seat}$, $C_{comf,stand}$, $C_{non-f,t}$ en C_{cancel}.

$$\Delta W_{e,\delta_n,\tau} = \Delta C_t + \Delta C_c + \Delta C_{comf,seat} + \Delta C_{comf,stand} + \Delta C_{non-f} + \Delta C_{cancel} \quad (8)$$

Vergelijking (8) toont alle componenten van de totale gemonetariseerde maatschappelijke kosten $\Delta W_{e,\delta_n,\tau}$ als gevolg van een verstoring. Wanneer we alle voor link e gespecificeerde verstoringsscenario's S in beschouwing nemen, kunnen we vergelijking (1) aanpassen om de maatschappelijke kosten van onrobuustheid van link e voor een zekere tijdhorizon te berekenen:

$$c_{e_n} = \sum_S \sum_{\delta_n} E\left(f_{e,\delta_n,S}\right) * E\left(\tau_{e,\delta_n,S}\right) * \Delta W_{e,\delta_n,\tau,S} \quad (9)$$

3. Resultaten case study

3.1 Case study netwerk

De voorgestelde methodologie om kwetsbare links te identificeren en link robuustheid te evalueren is toegepast op de Randstad Zuidvleugel als case study. Dit gebied is gekozen vanwege de relatief hoge OV netwerkdichtheid met verschillende OV diensten op verschillende netwerkniveaus, zodat ook interacties tussen deze netwerkniveaus geanalyseerd kunnen worden. Het OV netwerk is met de transport planning software OmniTRANS met een hoog detailniveau gemodelleerd als supernetwerk met 5.791 zones, 106.000 knopen $v \in V_n$ en 116.000 links $\in E_n$. Voor belangrijke OV lijnen L zijn zitplaatscapaciteit en totale capaciteit gespecificeerd. Er is gebruik gemaakt van een frequency-based netwerk representatie, wat betekent dat de wachttijd voor een OV lijn L verondersteld is gelijk te zijn aan de helft van de tussenaankomsttijd tussen twee voertuigen op die lijn. Hoewel een schedule-based netwerk representatie realistischer is, is hiervoor meer gedetailleerde model input nodig en neemt rekentijd voor reizigerstoedeling substantieel toe. Daarnaast blijven de verschillen in wachttijd tussen een frequency-based en schedule-based netwerk representatie beperkt als gevolg van de relatief hoge frequenties van OV lijnen in de Randstad.

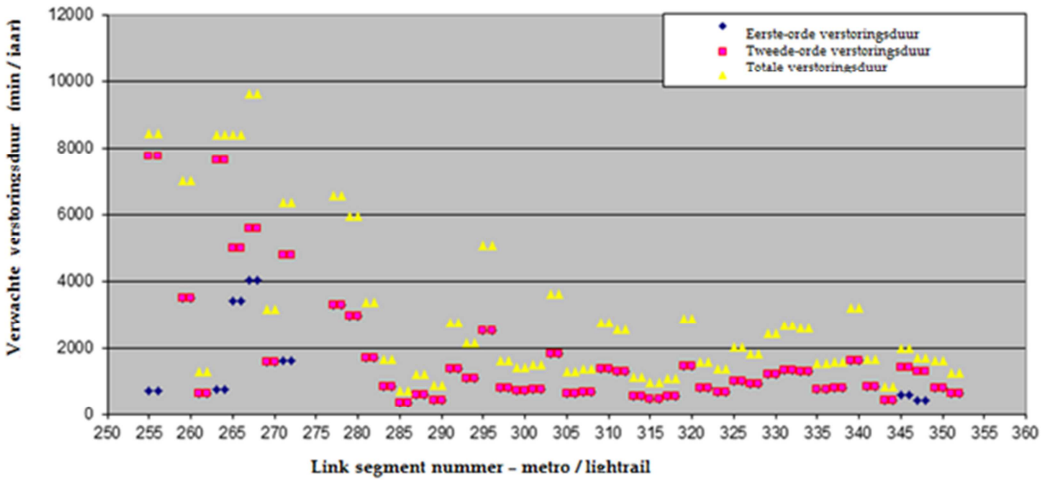
In het model zijn vier tijdsperioden onderscheiden: ochtendspits 7-8 uur, ochtendspits 8-9 uur, avondspits en de rest(werk)dag. Omdat de vervoersvraag met name in de ochtendspits in

Nederland niet uniform verdeeld is over de twee uren (CBS 2013), is het noodzakelijk de ochtendspits in twee aparte perioden te splitsen om bias in de kwantificering van de maatschappelijke kosten van verstoringen als gevolg van gereduceerd comfort en niet-gefaciliteerde vraag te voorkomen. Het Zenith algoritme is toegepast voor de reizigerstoedeling (Brands et al. 2013). Comfort is niet opgenomen als component van de gegeneraliseerde kostenfunctie gebruikt voor de toedeling, omdat reizigers met name tijdens onverwachte verstoringen de bezettingsgraad van OV diensten op een alternatieve route niet van tevoren weten. Daarnaast zou een iteratieve, capaciteitsafhankelijke toedeling de rekentijd substantieel doen toenemen.

3.2 Identificatie van kwetsbare links in het Randstad Zuidvleugel netwerk

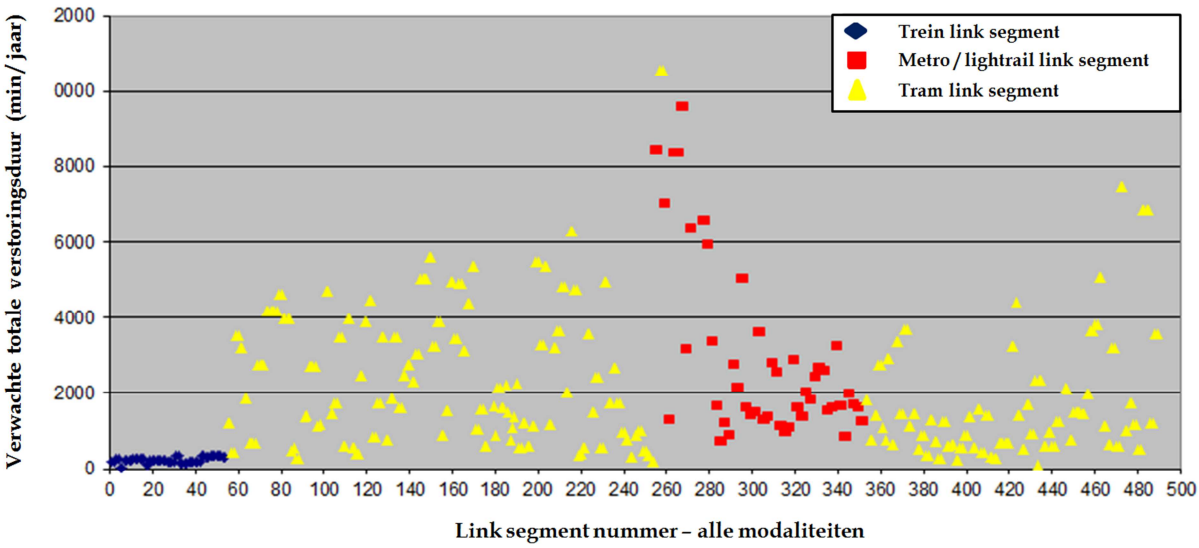
Figuur 3 toont de verwachte eerste-orde, tweede-orde en totale verstoringsduur per jaar als gevolg van grote verstoringen voor link segmenten op het metro / lightrail netwerkniveau. Figuur 4 toont de verwachte totale verstoringsduur per jaar als gevolg van grote verstoringen voor link segmenten op het trein, metro / lightrail en tram netwerkniveau. Het metro en lightrail netwerkniveau zijn samengenomen, aangezien deze modaliteiten op hetzelfde functionele niveau opereren. Op basis van Figuur 3 en Figuur 4 formuleren we de volgende vier conclusies:

1. Ten eerste is het van belang om tweede-orde terugslag effecten mee te nemen bij de berekening van de verwachte totale verstoringsduur voor link segmenten. Figuur 3 laat voor link segmenten op het lightrail / metro netwerk duidelijk zien dat de verwachte totale verstoringsduur van veel link segmenten es_n in sterke mate bepaald wordt door verstoringen die optreden op andere link segmenten $js_n \neq es_n$. Het niet in beschouwing nemen van tweede-orde effecten zou tot substantiële overschatting van link segment robuustheid leiden.
2. Ten tweede blijkt dat de verwachte verstoringsduur voor lightrail link segmenten nabij Den Haag (alle punten in Figuur 3 tot nr. 283) structureel groter is dan voor link segmenten van het Rotterdamse metronetwerk (punten in Figuur 3 vanaf nr. 283). Een verklaring hiervoor is het aanzienlijk grotere aantal wissels per kilometer op het Rotterdamse metronetwerk vergeleken met het lightrail netwerk rondom Den Haag, Pijnacker en Zoetermeer. Verstoringen blijven daardoor meer lokaal, hetgeen hun tweede-orde effecten naar andere link segmenten reduceert. De kleinere tweede-orde effecten op het Rotterdamse netwerk blijken ook uit Figuur 3, waarbij eerste-orde en tweede-orde effecten veelal even groot zijn.



Figuur 3. Verwachte eerste-orde, tweede-orde en totale verstoringsduur per link segment van het lightrail / metro case study netwerk

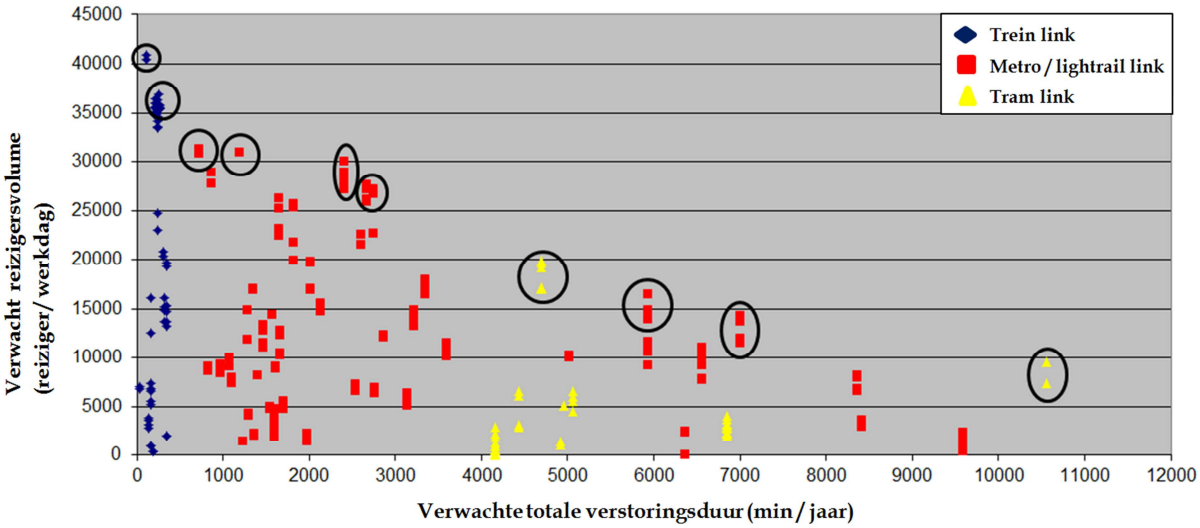
3. Ten derde laat Figuur 4 zien dat de verwachte verstoringsduur voor trein link segmenten relatief laag is, ten opzichte van metro / lightrail en tram link segmenten. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn de volledig eigen baan voor treinen, de aanwezigheid van seinbeveiliging ter voorkoming van onderlinge aanrijdingen en de gemiddeld genomen relatief lage voertuigintensiteit op treinnetwerk links vergeleken met de intensiteit op links van metro, lightrail of tramnetwerken.
4. Ten vierde zijn in het algemeen link segmenten van het tramnetwerk van Den Haag (gele punten links in Figuur 4) kwetsbaarder voor verstoringen vergeleken met link segmenten op het Rotterdamse tramnetwerk (gele punten rechts in Figuur 4). Ten dele kan dit verklaard worden doordat in het algemeen meer parallelle (soms niet meer gebruikte) tramsporen beschikbaar zijn in Rotterdam, welke als back-up kunnen fungeren bij verstoringen en daardoor tweede-orde effecten op de verwachte verstoringsduur verkleinen. De gele outlier in het midden van Figuur 4 laat de link Ternoot – Laan van NOI van het Haagse tramnetwerk zien. Deze link bevindt zich direct voor/na het lightrail tracé Laan van NOI – Forepark – Zoetermeer / Rotterdam, zonder tussenliggende bijsturingsmogelijkheden. Daardoor zijn de tweede-orde verstoringseffecten relatief hoog: een verstoring op het lightrail netwerk beïnvloedt vaak ook OV diensten op deze link.



Figuur 4. Verwachte totale verstoringsduur per link segment van het multi-level case study netwerk (geel links: tramnetwerk Den Haag; geel rechts: tramnetwerk Rotterdam)

In Figuur 5 zijn voor elke link de verwachte totale verstoringsduur per jaar (preselectie criterium I^3) en het verwachte reizigersvolume (criterium I^4) tegen elkaar uitgezet. Op basis van deze figuur benadrukken we het belang om in een methodologie om de meest kwetsbare links in multi-level OV netwerken te identificeren preselectie criteria te gebruiken die zowel de blootstelling aan verstoringen als de impact van elke verstoring expliciet in beschouwing nemen. Figuur 5 laat duidelijk zien dat voor sommige link segmenten de verwachte impact van een verstoring relatief laag is, terwijl deze alsnog op het Pareto front liggen als gevolg van de grote mate van blootstelling aan verstoringen (zie bijvoorbeeld de meest rechts gelegen gele punten in Figuur 5). Indien slechts de verstoringsimpact zou worden geanalyseerd, zouden alleen de drukste links van het treinnetwerk als meest kwetsbaar worden geïndiceerd. Gebaseerd op het gevormde Pareto front op basis van verstoringskans én verstoringsimpact concluderen we echter dat de meest kwetsbare links niet van een specifiek netwerkniveau of een specifieke modaliteit afkomstig zijn: links op het Pareto front zijn afkomstig van zowel het trein, metro / lightrail als

tramnetwerk. Links van het treinnetwerk zijn vooral kwetsbaar door de verwachte grote impact van verstoringen áls deze optreden, terwijl links van het metro- en tramnetwerk met name kwetsbaar zijn bij een combinatie van grote verstoringskans en een relatief grote impact.



Figuur 5. Kwetsbaarheid van links van het multi-level case study netwerk op basis van I^3 en I^4

De beschikbaarheid van alternatieve routes (I^5) is voor alle link segmenten op het Pareto front in een tweede stap kwalitatief beoordeeld (Yap 2014). Dit leidt tot de volgende selectie van meest kwetsbare link segmenten voor dit case study netwerk:

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

De voorgestelde methodologie om link robuustheid te evalueren en kwantificeren is ter illustratie toegepast op het lightrail segment Laan van NOI – Forepark, geëxploiteerd door HTM en RET.

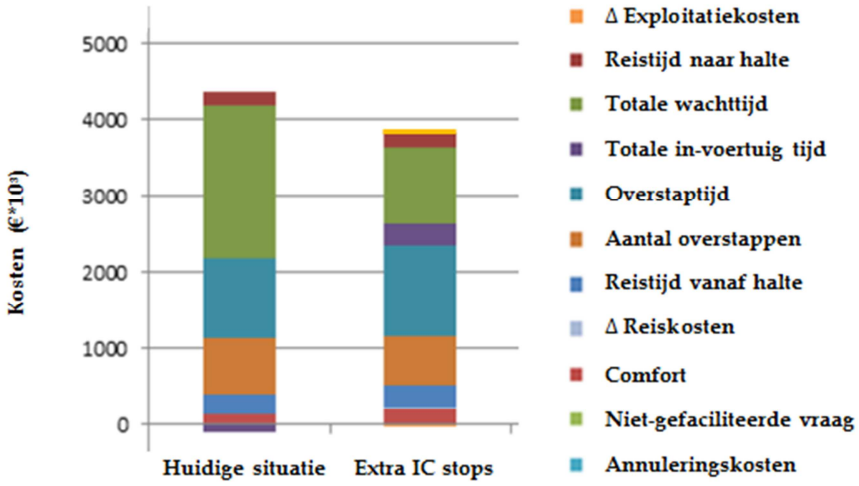
3.3 Evaluatie en kwantificering van de robuustheid van lightrail segment Laan van NOI – Forepark

Met Monte Carlo simulatie zijn verstoringen gegenereerd voor een tijdhorizon van 10 jaar. Op basis van deze simulatie kunnen we concluderen dat het lightrail segment Laan van NOI – Forepark gedurende 10 jaar 964 uren versperd is als gevolg van grote verstoringen, wat bij een gemiddelde exploitatie van 18 uur per dag neerkomt op 1.5% van de tijd. Het model laat zien welk percentage van door de verstoring geraakte reizigers welk route alternatief gebruikt. De link segment kwetsbaarheid c_{es_n} wordt berekend met vergelijking (9), waarbij $\Delta W_{es,\delta_n,\tau}$ volgens vergelijking (8) wordt bepaald. In de huidige situatie bedragen daarmee de verwachte totale maatschappelijke kosten van verstoringen op dit link segment in 10 jaar €4.3 miljoen. Deze waarde geeft de kosten van onrobuustheid van het geanalyseerde link segment weer. Figuur 6 (links) laat zien dat extra overstappen met bijbehorende extra wachttijd en overstaptijd de belangrijkste determinanten van deze maatschappelijke kosten zijn. Gedurende deze 10 jaar worden 787 verstoringen op dit link segment verwacht, hetgeen betekent dat de gemiddelde maatschappelijke kosten van een verstoring op dit link segment €5.4 duizend bedragen.

In dit onderzoek is ook een maatregel ter verbetering van de robuustheid van dit link segment ontworpen en geëvalueerd. Aangezien veel geraakte reizigers de Sprinter verbinding tussen Zoetermeer, Ypenburg en Den Haag als back-up gebruiken, stellen we een tijdelijke

frequentieverhoging voor op deze verbinding. Dit wordt gerealiseerd door de intercitytreinen Den Haag – Utrecht op deze parallelle treinverbinding tijdelijk extra te laten stoppen op de Sprinter stations Zoetermeer en Den Haag Ypenburg, *alleen* indien het lightrail link segment Laan van NOI – Forepark versperd is. Daarmee wordt de frequentie van (stoppende) treinen tussen Zoetermeer, Ypenburg en Den Haag tijdelijk verdubbeld. Dit verbetert overstapmogelijkheden tussen netwerkniveaus en verbetert de back-up functie van het treinnetwerk voor het verstoorde lightrail netwerk. Nadeel is echter dat de reistijd voor doorgaande reizigers in de intercitytreinen met ≈5 minuten toeneemt.

Nadat verstoringen gegenereerd zijn met behulp van een pseudo-random generator kunnen we robuustheidseffecten van deze maatregel kwantificeren (zie Figuur 6 rechts). De totale maatschappelijke kosten van onrobuustheid na 10 jaar bedragen nu €3.9 miljoen. Dit betekent dat deze maatregel de kosten van onrobuustheid van dit link segment met 8% reduceert en daarmee een positieve Netto Contante Waarde heeft. De verwachte gemiddelde maatschappelijke kosten per verstoring bedragen nu €5.0 duizend. De substantiële reductie in wachttijd die door deze maatregel wordt gerealiseerd gaat ten koste van extra in-voertuigtijd. De gemonetariseerde baten als gevolg van wachttijdreductie zijn echter groter dan de gemonetariseerde kosten van extra in-voertuigtijd.



Figuur 6. Maatschappelijke kosten van onrobuustheid van link segment Laan van NOI – Forepark in de huidige situatie (links) en voor de voorgestelde maatregel (rechts)

4. Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusie en discussie

Ondanks het belang van robuuste openbaar vervoer netwerken wordt dit onderwerp zowel door wetenschap als praktijk nog niet vanuit een volledig reizigersperspectief benaderd. Zover bij ons bekend, is dit het eerste onderzoek waarbij zowel de mate van blootstelling aan grote verstoringen als de impact van deze verstoringen op een systematische en realistische wijze geanalyseerd zijn. In tegenstelling tot mono-level benaderingen, hebben wij het integrale, totale multi-level OV netwerk wat voor reizigers beschikbaar blijft na het optreden van een bepaalde verstoring in beschouwing genomen. We hebben een nieuwe methodologie ontwikkeld om de meest kwetsbare links in een multi-level OV netwerk te identificeren. De case study in de Randstad Zuidvleugel laat het belang zien van het expliciet meenemen van verstoringskansen in

deze methodologie. Het al dan niet in beschouwing nemen van de verstoringskans, naast de verstoringsimpact, beïnvloedt namelijk in sterke mate het resultaat van de methodologie. Ook benadrukken we het belang om tweede-orde terugslag effecten van verstoringen mee te nemen in deze methodologie, aangezien link robuustheid anders substantieel overschat kan worden.

Ondanks het belang dat aan robuust OV wordt toegekend, zijn tot op heden vrijwel alleen de kosten van robuustheidsmaatregelen bekend. De methodologie zoals uiteengezet in deze paper stelt ons in staat om ook de maatschappelijke kosten van verstoringen te evalueren en in geld uit te drukken. Daarnaast kan met deze methodologie gekwantificeerd worden welk deel van deze maatschappelijke kosten door een bepaalde robuustheidsmaatregel weggenomen kan worden. Hiermee kunnen robuustheidsbaten van maatregelen in geld worden uitgedrukt en afgezet worden tegen de benodigde kosten van die betreffende maatregel, en kan de waarde van robuustheid gekwantificeerd worden. Daarmee ondersteunt onze methodologie besluitvorming door vervoerders en vervoersautoriteiten aangaande de implementatie van verschillende robuustheidsmaatregelen.

Het is van belang te realiseren dat rondom het thema robuustheid continu afwegingen gemaakt dienen te worden. Sommige maatregelen (zoals de aanleg van extra wissels) kunnen enerzijds de maatschappelijke kosten van een verstoring reduceren, áls een verstoring optreedt, maar verhogen anderzijds de frequentie van verstoringen. Andere maatregelen verminderen de verstoringsimpact voor getroffen reizigers, maar verlengen de reistijd voor andere reizigers. Ook zijn maatregelen denkbaar die robuustheid kunnen verbeteren, maar anderzijds een substantiële investering vragen. Deze afweging verschilt per locatie en is afhankelijk van de frequentie van verstoringen, de verstoringsimpact, het aantal getroffen reizigers en de mate waarin alternatieve routes in het totale multi-level OV netwerk beschikbaar zijn. Toepassing van onze methodologie stelt besluitvormers in staat om voor elke specifieke locatie dergelijke dilemma's inzichtelijk te maken en alle aspecten in dezelfde monetaire eenheid uit te drukken, zodat een afweging kan worden gemaakt. Ook kan met behulp van gevoeligheidsanalyses *a priori* de stabiliteit van de NCW inzichtelijk worden gemaakt. Hiermee kan onze methodologie besluitvorming ondersteunen en rationaliseren.

In de case study hebben we de robuustheidsbaten van een specifieke maatregel, waarbij het treinnetwerk als back-up fungeert voor een kwetsbaar link segment op het lightrail netwerk, gekwantificeerd. Wat betreft de evaluatie en implementatie van deze maatregel maken we enkele noties. Ten eerste is het van belang om de verdeling van financiële en maatschappelijke kosten en baten over stakeholders te analyseren. Bij de voorgestelde maatregel draagt de NS de grootste kosten als gevolg van de extra dienstregeling-uren voor hun treinen en nadelen voor treinreizigers, terwijl de verstoringen plaatsvinden op door HTM en RET geëxploiteerd netwerk. Voor een succesvolle implementatie lijkt het verstrekken van een (financiële) incentive aan de NS door vervoersautoriteiten of de HTM en RET noodzakelijk. Ten tweede zijn netwerkbrede effecten van de langere rijtijd van intercitytreinen voor treinreizigers, zoals in hoeverre aansluitingen verderop in de reis gemist worden, niet gekwantificeerd. Wel is voldoende buffertijd aanwezig op het specifieke traject om deze treinen tijdelijk extra op deze twee stations te laten stoppen. Ten derde is het voor een succesvolle implementatie noodzakelijk dat de RET en HTM reizigers informatie verstrekken over het tijdelijk extra stoppen van intercitytreinen op Zoetermeer en Den Haag Ypenburg, teneinde de back-up functie van het treinnetwerk voor het gestremde lightrail netwerk te verbeteren. Reizigers zullen anders hun routekeuze niet hierop aanpassen. Ten vierde zijn kosten om de oorspronkelijke dienstregeling, voertuig- en personeelsomloop te herstellen niet meegenomen. Dit betekent dat de werkelijke kosten van onrobuustheid nog hoger liggen en de maatschappelijke kosten zoals in deze paper berekend als ondergrens beschouwd kunnen worden.

4.2 Aanbevelingen

We formuleren vier aanbevelingen voor verder onderzoek. De eerste aanbeveling is het valideren van de door ons ontwikkelde methodologie om kwetsbare links in multi-level OV netwerken te identificeren. In dat geval zou voor een test netwerk de overlap geanalyseerd dienen te worden tussen de set van kwetsbare links verkregen op basis van onze methodologie, en de set verkregen na een complete evaluatie van robuustheid op basis van een 'full computation method'. Een tweede aanbeveling is om te onderzoeken of in deze methodologie het criterium 'aantal alternatieve routes' gekwantificeerd kan worden, bijvoorbeeld op basis van route keuzeset criteria (Fiorenzo-Catalano 2007). Ten derde 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 alternatieve routes verondersteld werd. Dit toont de potentie van het totale multi-level netwerk aan om als back-up te fungeren bij een verstoring. In werkelijkheid zijn verstoringen echter dynamisch en is niet altijd volledige informatie over de verstoring beschikbaar. Daarom is het interessant om in een vervolgstudie de dynamiek van verstoringen en de rol van informatie over een verstoring verstrekt aan reizigers, in combinatie met en-route route keuze, in de toedeling op te nemen (zie bijvoorbeeld Van der Hurk et al. 2012). Ten vierde wordt opgemerkt dat een multi-level benadering van robuustheid tamelijk complex is wat betreft dataverzameling over verstoringen bij meerdere vervoerders, rekentijd en implementatie van maatregelen die het netwerk van een bepaalde vervoerder overstijgen. De recentelijke ontwikkelingen rondom open data in het OV kunnen helpen deze complexiteit te verminderen. Daarnaast wordt aanbevolen aan de OV-sector om aangaande robuustheid een reizigersperspectief te hanteren, waarbij over concessiegrenzen heen de reiziger centraal staat. Uiteindelijk baseert de reiziger zijn of haar vervoerwijze keuze immers op basis van de gehele deur-tot-deur reis en beïnvloedt een betere robuustheid van het totale multi-level OV netwerk ook het OV gebruik.

Dankwoord

Dit onderzoek was niet mogelijk zonder steun van HTM, RET en ProRail. De auteurs danken hen voor hun bijdrage.

Referenties

Bovy, P.H.L. and Hoogendoorn-Lanser, S. (2005). Modelling route choice behaviour in multi-modal transport networks. *Transportation,* 32, 341-368.

Brands, T., De Romph, E., Veitch, T. and Cook, J. (2013). *Modelling public transport route choice with multiple access and egress modes.* Presented at 41st European Transport Conference, Frankfurt, Germany.

Cats, O. and Jenelius, E. (2014). Dynamic Vulnerability Analysis of Public Transport Networks: Mitigation Effects of Real-Time Information. *Networks and Spatial Economics*. DOI 10.1007/s11067-014-9237-7.

CBS. (2013). Mobiliteit in Nederland; mobiliteitskenmerken en motieven, regio's. Verplaatsingen per persoon per dag. Geraadpleegd 23 oktober 2013, http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=81123NED&D1=0&D2=0&D3=a&D4=0,25-37&D5=0&D6=l&HD=130830-1202&HDR=T,G4,G1,G5,G2&STB=G3

Cicerone, S., D'Angelo, G., Di Stefano, G., Frigioni, D., Navarra, A., Schachtebeck, M. and Schöbel, A. (2009). Recoverable Robustness in Shunting and Timetabling. In: Ahuja, R.K.,

Möhring, R.H., Zaroliagis, C.D. (eds), Robust and Online Large-Scale Optimization: Models and Techniques for Transportation systems. Lecture Notes in Computer Science, 28-60.

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.

Delgado, F., Munoz, J., Giesen, R. and Cipriano, A. (2009). Real-Time Control of Buses in a Transit Corridor Based on Vehicle Holding and Boarding Limits. *Transportation Research Record,* 2090, 59-67.

Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D. and Vansteenwegen, P. (2009). Improving the robustness in railway station areas. *European Journal of Operational Research,* 235, 276 – 286.

Fiorenzo-Catalano, M.S. (2007). *Choice Set Generation in Multi-Modal Transportation Networks* (Doctoral dissertation). Delft University of Technology, the Netherlands.

Fischetti, M., Salvagnin, D. and Zanette, A. (2009). Fast Approaches to Improve the Robustness of a Railway Timetable, *Transportation Science,* 43(3), 321-335.

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

Golob, T.F., Canty, E.T., Gustafson, R.L. and Vitt, J.E. (1972). An analysis of consumer preferences for a public transportation system. *Transportation Research,* 6(1), 81-102.

Goverde, R.M.P. (2005). *Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis* (Ph.D. thesis). Delft University of Technology, the Netherlands.

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

Holmgren, Å.J. (2007). A Framework for Vulnerability Assessment of Electric Power Systems. In A.T. Murray & T.H. Grubesic (Ed.), *Critical Infrastructure: Reliability and Vulnerability* (pp.31-55). Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.

Immers, B., Egeter, B., Snelder, M. and Tampère, C. (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.

Kroon, L., Maroti, G., Retel Helmrich, M., Vromans, M.J.C.M. and Dekker, R. (2008). Stochastic improvement of Cyclic Railway Timetables. *Transportation Research Part B*, 42, 553-570.

Lee, A. N. van Oort, R. van Nes (2014), Service reliability in a network context, *Transportation Research Record,* No. 2417, pp. 18-26

Li, M. (2008). *Combining DTA Approaches for Studying Road Network Robustness* (Doctoral dissertation). Delft University of Technology, the Netherlands.

Parbo, J., Nielsen, O.A., Landex, A. and Prato, C.G. (2013). *Measuring Robustness, Reliability and Punctuality within passenger railway transportation – a literature review.* KGS Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark.

Rietveld, P., Bruinsma, F.R. and Van Vuuren, D.J. (2001). Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands. *Transportation Research Part A,* 35(6), 539-559.

Savelberg, F. en Bakker, P. (2010). *Betrouwbaarheid en robuustheid op het spoor.* Den Haag, Nederland: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Schöbel, A. and Kratz, A. (2009). A Bicriteria Approach for Robust Timetabling, In: Ahuja,R.K., Möhring, R.H., Zaroliagis, C.D. (eds), Robust and Online Large-Scale Optimization: Models and Techniques for Transportation Systems. Lecture Notes in Computer Science, 119-144.

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 der Hurk, E., Kroon, L.G., Maroti, G. and Vervest, P.H.M. (2012). Dynamic Forecasting Model of Time Dependent Passenger Flows for Disruption Management. In S Voss & J.C. Munoz (Eds.), *CASPT*. Santiago, Chili: CASPT.

Van Nes, R., Hansen, I.A. en Winnips, C. (2014). *Potentie multimodaal vervoer in stedelijke regio's.* Delft, Nederland: DBR.

Van Nes, R., Marchau, V., Van Wee, G.P. and Hansen, I.A. (2007). Reliability and robustness of multimodal transport network analysis and planning: towards a new research agenda. *Proceedings of the INSTR2007 conference,* The Hague, the Netherlands.

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., 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.

Warffemius, P. (2013). *De maatschappelijke waarde van kortere en betrouwbare reistijden.* Den Haag, Nederland: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

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.

Ziha, K. (2000). Redundancy and robustness of systems of events. *Probabilistic Engineering Mechanics,* 15(4), 347-357.