

Overstappen en onbetrouwbaarheid in het OV: Een methodiek voor kwantificering van reizigerseffecten in een netwerkcontext

Aaron Lee, MSc

Technische Universiteit Delft

Ir. Menno D. Yap

Technische Universiteit Delft/ Goudappel Coffeng BV¹

Dr. Ir. Niels van Oort

Technische Universiteit Delft/ Goudappel Coffeng BV

Overstappen heeft een grote invloed op de (on)betrouwbaarheid van het OV, een belangrijk kwaliteitsaspect voor veel reizigers. In eerdere studies wordt de impact van onbetrouwbaarheid van overstappen op de totale reistijd voor meerdere overstaprichtingen niet expliciet meegenomen. In deze studie presenteren we onderzoek naar synchronisatie van overstappen en de impact hiervan op betrouwbaarheid vanuit een reizigersperspectief. Reizigersbetrouwbaarheid is geanalyseerd voor een overstaplocatie tussen trein en tram, geëxploiteerd door twee verschillende vervoerders. We hebben een methode ontwikkeld om twee op de reiziger gerichte betrouwbaarheidsindicatoren te kwantificeren: extra reistijd ten opzichte van de dienstregeling, en benodigde buffertijd als maat voor spreiding. Door de beschikbaarheid van voertuiglocatie (NDOV) data en anonieme OV Chipkaartdata is het mogelijk om de betrouwbaarheid van een overstaplocatie, of van een OV netwerk als geheel, op netwerkniveau te kwantificeren. Vijf belangrijke variabelen zijn geïdentificeerd die betrouwbaarheid van een overstap kunnen beïnvloeden: de geplande overstaptijd, de verdeling van de werkelijke aankomst- en vertrektijden van de lijnen bij de overstaplocatie, frequentie van OV lijnen, overstap-looptijd, en het reizigersvolume. Voor zowel een hypothetisch OV netwerk, als voor een werkelijk OV netwerk, is aangetoond dat het verschuiven van de overstaptijd om één specifieke overstap te optimaliseren, effect heeft op de overstaptijd en betrouwbaarheid van andere overstappen. Deze methodiek geeft kwantitatief inzicht in deze trade-offs om uiteindelijk een optimum te vinden voor alle overstappen en reizigers samen. Dit kan worden meegenomen in maatschappelijke kosten-baten analyses. Met deze methodiek kunnen zowel de totale betrouwbaarheidsbaten, als de baten voor een specifieke groep reizigers, geïdentificeerd worden als gevolg van een bepaalde betrouwbaarheidsmaatregel.

Trefwoorden: betrouwbaarheid, data-driven, netwerkperspectief, overstap, synchronisatie

¹ E: M.D.Yap@TUDelft.nl; T: 06 22 80 79 34

1. Inleiding

Betrouwbaarheid van openbaar vervoer (OV) systemen krijgt in toenemende mate aandacht in zowel wetenschap als praktijk. Een hogere betrouwbaarheid leidt tot kortere en beter voorspelbare reistijden voor reizigers, terwijl dit voor vervoerders kan leiden tot lagere exploitatiekosten en potentie biedt voor meer OV reizigers (Cats et al. 2016). Verbetering van betrouwbaarheid kan zowel plaatsvinden op operationeel niveau, als op strategisch niveau (netwerkontwerp) en tactisch niveau (dienstregeling ontwerp). Van Oort (2011) beschouwt OV betrouwbaarheid op lijnniveau, apart voor elke OV lijn. Betrouwbaarheid van overstappen op netwerkniveau wordt hierbij niet in beschouwing genomen. In deze paper wordt dit framework verder uitgebreid door ook betrouwbaarheid voor overstappende reizigers expliciet te kwantificeren, teneinde het effect van de synchronisatie van overstappen op betrouwbaarheid te kunnen evalueren. Dit is van belang, aangezien in Nederland 28% van de treinreizigers hun reis per (regionaal of stedelijk) OV voortzet (Savelberg & Bakker 2010). Aan de huis-zijde van een multimodale reis met trein als hoofdvervoerwijze gebruikt ca. 20% van de treinreizigers bus/tram/metro als voorttransport. Een verklaring hiervoor is de hogere beschikbaarheid van private vervoerwijzen (primair fiets, en in mindere mate de auto) aan de huis-zijde van een multimodale reis ten opzichte van de activiteiten-zijde (Van Nes et al. 2014).

In (wetenschappelijke) literatuur is reeds veel aandacht besteed aan het effect van overstap-synchronisatie op reistijd (bijvoorbeeld door Vuchic 2005, Ceder 2007, Muller & Furth 2009 en Mai et al. 2012). In deze studies wordt OV betrouwbaarheid alleen impliciet in beschouwing genomen, aangezien de totale gemiddelde reistijd mede hiervan afhankelijk is. Veelal is in deze studies slechts één geïsoleerde overstap in één bepaalde richting onderzocht, terwijl in de praktijk het verschuiven en optimaliseren van één specifieke overstap in één specifieke richting consequenties zal hebben voor de geplande overstaptijd en betrouwbaarheid op diverse andere, gerelateerde overstaplocaties. In deze paper vindt uitbreiding plaats van de methodiek zoals gehanteerd door Van Oort (2011) met betrouwbaarheid van overstappen. Ook vindt analyse plaats naar de belangrijkste variabelen die overstap(on)betrouwbaarheid beïnvloeden. Deze nieuwe methodiek is vervolgens toegepast om de effecten van geplande overstaptijd op betrouwbaarheid te bepalen voor een multi-level overstaplocatie tussen een stedelijk en regionaal OV systeem. In deze case study hanteren we een gelijke (geplande) frequentie en opvolgtijd voor alle lijnen. Voor details over de toepassing van deze methodiek voor OV lijnen met verschillende frequenties wordt de lezer verwezen naar Lee (2014).

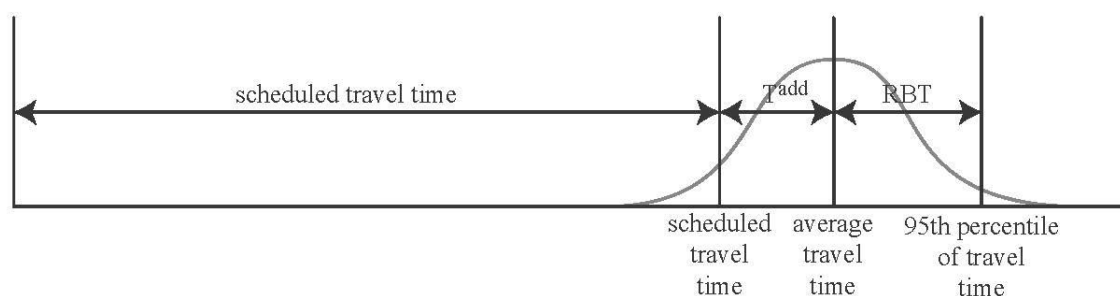
Deze paper is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 geeft enkele achtergronden weer rondom betrouwbaarheid in OV exploitatie. In hoofdstuk 3 wordt de bestaande methodiek om betrouwbaarheid te kwantificeren uitgebreid met overstappen, wat leidt tot kwantificering van twee op reizigers gerichte betrouwbaarheidsindicatoren. Het effect van variërende geplande overstaptijden op betrouwbaarheid wordt geïllustreerd voor een hypothetisch OV netwerk in hoofdstuk 4, en voor een real-life OV netwerk in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 wordt omschreven hoe deze methodiek verder uitgebreid kan worden, door onbetrouwbaarheid op netwerkniveau te kwantificeren. Conclusies worden in hoofdstuk 7 geformuleerd. Deze paper is grotendeels gebaseerd op het Engelstalige paper van Lee et al. (2014).

2. OV betrouwbaarheid

Betrouwbaarheid is een belangrijk kwaliteitsaspect van de OV reis gebleken voor reizigers. Het volgens planning arriveren op de eindhalte van een OV reis wordt beschouwd als een van de meest belangrijke attributen van een OV reis (Golob et al. 1972). Extra wachttijd en in-voertuig tijd leiden tot een groter disnut per minuut dan verwachte wachttijd en in-voertuig tijd (Balcombe et al. 2004). Daarnaast speelt betrouwbaarheid een rol in zowel routekeuze als

vervoerwijze keuze (Turnquist & Bowman 1980; König & Axhausen 2002; Schmöcker & Bell 2002). Vanuit een reizigersperspectief is betrouwbaarheid gerelateerd aan de werkelijke reistijden voor passagiers. Een route waarbij de gerealiseerde reistijden overeenkomen met de geplande reistijden (conform dienstregeling) wordt als betrouwbaar gezien. Daarentegen wordt een route met een grotere reistijdvariatie als onbetrouwbaar beschouwd, aangezien een grotere kans aanwezig is dat reizigers later dan hun voorkeurstijd op hun bestemming zullen arriveren.

Betrouwbaarheid kan worden gekwantificeerd op basis van twee kenmerken van de verdeling van gerealiseerde reistijden (Figuur 1). Ten eerste geldt hierbij de extra reistijd (additional travel time: *ATT*), wat gelijk staat aan het verschil tussen de gemiddelde gerealiseerde reistijd en de geplande reistijd (Van Oort 2011). Zoals te zien in Figuur 1 is de gerealiseerde reistijd in veel gevallen (in enige mate) langer dan de geplande reistijd tijdens perfecte, onverstoorde condities, als gevolg van kleine variaties in de dienstuitvoering. Voor toepassing in maatschappelijke kosten-baten analyses kan deze indicator gemonetariseerd worden door middel van de value-of-time (Warffemius 2013). Ten tweede geeft de breedte van de verdeling van gerealiseerde reistijden een indicatie van de variatie in reistijd. Deze reistijdvariatie kan gekwantificeerd worden door de 'betrouwbaarheid buffer tijd' (reliability buffer time: verder aangeduid in deze paper als *RBT*). De *RBT* reflecteert het verschil tussen het 95' en 50' percentiel van de gerealiseerde reistijdverdeling (Furth & Muller 2005). Het 95' percentiel wordt gebruikt om een indicatie te geven hoeveel extra tijd een reiziger moet nemen, bovenop de gemiddelde of verwachte reistijd, om in 19 van de 20 reizen op tijd op de eindhalte te arriveren. Het in 95% van alle reizen op tijd arriveren, wordt over het algemeen als acceptabel beschouwd voor de gemiddelde woon-werk reiziger. Deze indicator kan voor MKBA's gemonetariseerd door, onder aanname van een normaal verdeelde reistijdspreiding, de standaardafwijking *sd* te bepalen (waarbij het 95' percentiel gelijk is aan de gemiddelde reistijd + $2*sd$) en hier de value-of-reliability op toe te passen (Warffemius 2013; Kouwenhoven et al. 2015).



Figuur 1: Indicatoren voor reizigersbetrouwbaarheid: extra reistijd (*ATT* en *RBT*) (Van Oort, 2011)

Van Oort (2011) laat zien dat reizigersbetrouwbaarheid kan worden uitgelegd als de relatie tussen de exploitatie van OV voertuigen en reizigersgedrag. Hierbij is de totale extra reistijd als gevolg van onbetrouwbaarheid een functie van de extra wachttijd en extra in-voertuig tijd. In deze studie is de extra overstaptijd toegevoegd als component aan de totale extra reistijd, om onbetrouwbaarheid voor overstappende reizigers te kunnen kwantificeren.

3. Betrouwbaarheid voor overstappende reizigers

In dit hoofdstuk wordt de methodiek om betrouwbaarheid voor overstappende reizigers te berekenen verder uiteengezet, als uitbreiding van de methodiek van Van Oort (2011) voor reizigers die zonder overstap reizen. Eerst identificeren we variabelen die reistijdvariatie voor overstappende reizigers beïnvloeden (paragraaf 3.1). Vervolgens worden indicatoren voor onbetrouwbaarheid voor overstappen gekwantificeerd (paragraaf 3.2).

3.1 Variabelen van invloed op reistijdvariatie van overstappende reizigers

Op basis van literatuur en interviews zijn vijf variabelen geïdentificeerd die een belangrijke invloed hebben op de reistijdverdeling van overstappende reizigers (Lee et al. 2014):

1. Spreiding in de aankomsttijd en vertrektijd van voertuigen
2. Benodigde overstap-looptijd
3. Geplande overstaptijd
4. Geplande frequentie en opvolgtijd op beide OV lijnen bij een overstaplocatie
5. Aantal overstappende reizigers

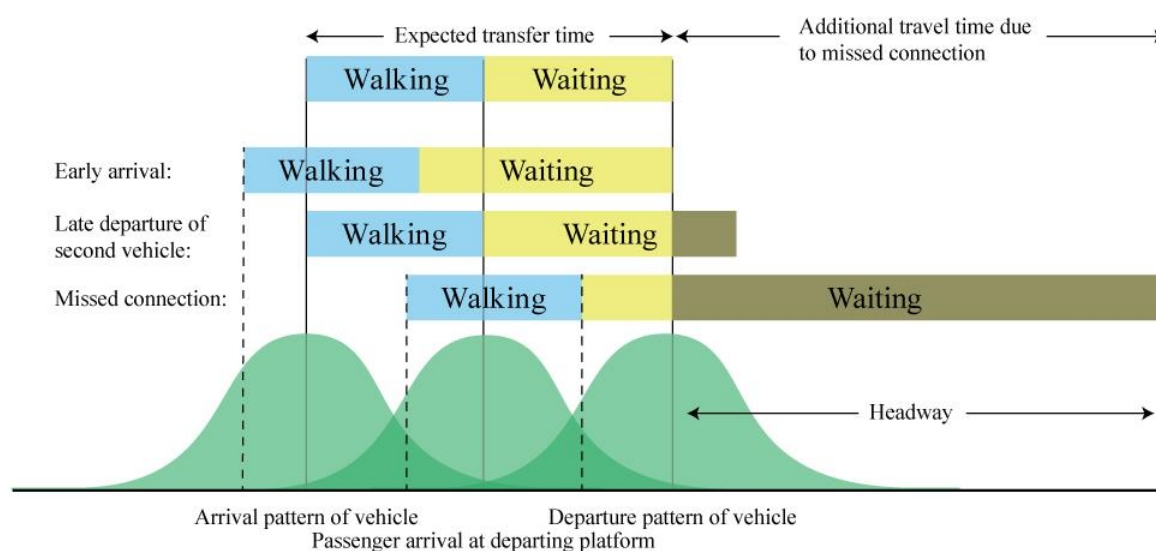
Tabel 1: Oorzaken en effecten van de vijf meest belangrijke variabelen die betrouwbaarheid van een overstap beïnvloeden

| Oorzaak | Variabele | Gevolg |
|---|--|--|
| Invloed van overig verkeer Buffertijd in dienstregeling Afstand tot overstaplocatie Locatie van holding points | Spreiding (standaardafwijking) van aankomst- en vertrektijden van voertuigen | Minder spreiding bij een of meerdere lijnen leidt tot hogere betrouwbaarheid |
| Lay-out van overstaplocatie Reizigersgedrag | Overstap-looptijd | Kortere looptijd staat een kortere geplande overstaptijd toe |
| Dienstregeling / netwerkontwerp | Geplande overstaptijd | Langere overstaptijd leidt tot een langere geplande reistijd, maar een kleinere kans op een gemiste overstap |
| Dienstregeling / netwerkontwerp | Frequentie van OV lijnen bij overstaplocatie | Lagere frequentie vergroot de (negatieve) impact van een gemiste aansluiting |
| Vraagpatronen Kwaliteit van OV aanbod | Aantal (of aandeel) overstappende reizigers | Belang van betrouwbare overstap neemt toe bij een groter aantal overstappers |

Tabel 1 toont deze variabelen, samen met de bijbehorende oorzaak / oorzaken en gevolgen. Een grotere spreiding in aankomsttijd van het eerste voertuig van een reis vergroot de kans dat een overstap wordt gemist, en dat reizigers een extra opvolgtijd aan extra reistijd moeten wachten. De verdeling van de vertrektijd van het eerste voertuig op diverse haltes heeft invloed op de wachttijd bij haltes, wanneer reizigers in een interval rondom de geplande vertrektijd bij de halte arriveren in een laagfrequent OV systeem. Een kortere benodigde looptijd voor een overstap betekent dat de geplande overstaptijd (de tijd tussen de geplande aankomsttijd van het eerste voertuig en de geplande vertrektijd van het tweede voertuig) verkort kan worden, zonder dat concessies aan betrouwbaarheid hoeven worden gedaan. Wijziging van de geplande overstaptijd beïnvloedt het aantal reizigers dat een bepaalde overstap wel of niet haalt, en beïnvloedt daarmee de verdeling van reistijd voor reizigers. Ook de geplande frequentie en opvolgtijd tussen voertuigen op een lijn beïnvloedt de totale reistijdverdeling. Voornamelijk de opvolgtijd van de lijn waar reizigers op overstappen is van belang hierbij, omdat hiermee het effect van het missen van een aansluiting wordt gerepresenteerd. Tenslotte speelt ook het aandeel overstappende reizigers op elke specifieke overstaplocatie een rol. Een overstaplocatie met een hoog aandeel overstappende reizigers kan meer invloed hebben op de totale extra reistijd van het OV systeem als geheel.

3.2 Kwantificering van onbetrouwbaarheid voor overstappende reizigers

In deze paragraaf worden indicatoren voor onbetrouwbaarheid gekwantificeerd. In geval van een overstap van lijn l naar lijn m hanteren we de volgende variabelen. Een OV reis bestaande uit twee ritten met overstap kan substantiële reistijdvariatie hebben, als gevolg van de mogelijkheid dat een of beide ritten gemist kan worden, en daarmee betrouwbaarheid in negatieve zin beïnvloeden (Mai et al. 2012). Het is hierbij bekend dat reizigers in het algemeen de voorkeur geven aan een overstapscenario met een kleine spreiding in overstaptijd (Ceder et al. 2013). Een geplande overstap bestaat uit de aankomst van het binnenkomende voertuig, looptijd naar de locatie van het vertrekkende voertuig, en een geplande buffertijd in geval van vertraagde binnenkomst van het eerste voertuig. In deze studie is de geplande overstaptijd gedefinieerd als de tijd tussen de geplande aankomsttijd van het binnenkomende voertuig en de geplande vertrektijd van het tweede voertuig. Al deze componenten van de overstaptijd kunnen door kansverdelingen worden weergegeven (Figuur 2).



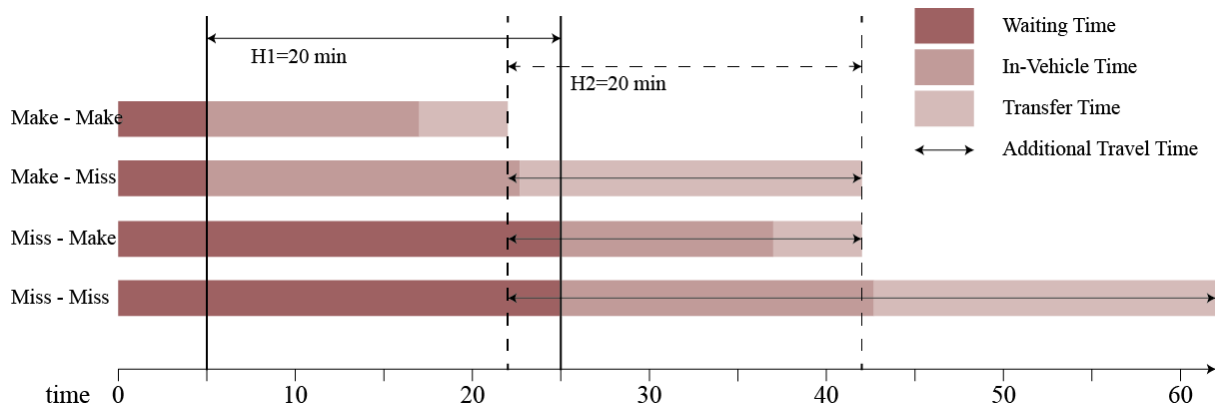
Figuur 2: Relevante kansverdelingen tijdens een OV overstapbeweging (Lee et al. 2014)

In geval van frequenties van 6 voertuigen per uur of hoger kan het aankomstpatroon van reizigers bij de halte als random worden beschouwd. Berekeningen voor dit laatste scenario worden uiteengezet in Van Oort et al. (2010). In geval van frequenties lager dan 6 voertuigen per uur arriveren reizigers volgens een verdeling rondom de geplande vertrektijd bij de eerste vertrekhalte (Van Oort 2011; Seddon & Day 1974; Van der Waard 1988). Deze reizigers kunnen ofwel hun geplande voertuig halen, in geval de aankomsttijd voor de gerealiseerde vertrektijd ligt, of het voertuig missen en moeten wachten tot het volgende voertuig. In Van Oort et al. (2012) is het aankomstpatroon in geval van een laagfrequent OV systeem versimpeld door te veronderstellen dat alle reizigers een bepaalde tijd τ^{early} voor de geplande vertrektijd arriveren. Wanneer de gerealiseerde vertrektijd $\tau^{departure}$ eerder is dan τ^{early} , zullen bij deze aanname alle reizigers het voertuig missen. Hierdoor neemt de totale reistijd toe met de wachttijd op het volgende voertuig. Wanneer de gerealiseerde vertrektijd van het voertuig plaats vindt binnen het tijdsinterval $[\tau^{early}, \tau^{late}]$, is verondersteld dat reizigers geen extra wachttijd ervaren. Dit reflecteert het door reizigers geaccepteerde vertrektijdinterval van het betreffende voertuig. Wanneer $\tau^{departure}$ later is dan τ^{late} ondervinden alle wachtende reizigers een extra reistijd die gelijk is aan het verschil tussen de gerealiseerde en geplande vertrektijd.

Figuur 2 laat zien dat de variatie in wachttijd en in-voertuig tijd van de eerste rit van een reis geen invloed heeft op de aankomsttijd bij de uiteindelijke bestemming van de reis, mits de

geplande overstap nog steeds wordt gehaald. Extra in-voertuig tijd tijdens de eerste rit heeft dezelfde afname aan overstaptijd tot gevolg, terwijl een kortere in-voertuig tijd tijdens de eerste rit tot een toename van de overstaptijd leidt. Om de complexiteit te beperken negeren we in deze studie de impact op de door reizigers ervaren reistijd, als gevolg van verschillende gewichten die door reizigers worden toegekend aan verschillende componenten van een OV reis (Van der Waard 1988). De overstap op zichzelf kan op twee manieren de totale reistijdvariatie beïnvloeden. Ten eerste leidt extra overstaptijd als gevolg van een vertraagd vertrek van het voertuig waarop overgestapt is, direct tot extra totale reistijd. Ten tweede leidt het missen van een aansluiting tot een toename van de overstaptijd, en daarmee de totale reistijd, aangezien op het volgende voertuig gewacht moet worden. Dit betekent dat voor overstappende reizigers de uiteindelijke reistijdverdeling een functie is van het al dan niet missen van de geplande aansluiting, vertraging van het vertrek van het aansluitende voertuig, en extra in-voertuig tijd in het tweede deel van de reis.

Dit betekent dat de extra reistijd voor overstappende passagiers, in geval van laagfrequente OV lijnen, afhangt of een reiziger het geplande voertuig tijdens het eerste deel van de reis haalt, en of de geplande overstap gehaald wordt. In totaal resulteert dit in vier groepen reizigers (Figuur 3). Groep 1 betreft reizigers die het eerste voertuig volgens planning halen ('Make'), en het aansluitende voertuig bij de overstap volgens planning halen ('Make'). Daarnaast zijn er reizigers die het eerste voertuig halen ('Make'), maar de aansluiting missen ('Miss') (groep 2), reizigers die het eerste voertuig missen ('Miss') maar wel de bijbehorende aansluiting halen ('Make') (groep 3), en reizigers die zowel het eerste voertuig missen ('Miss'), als de aansluiting ('Miss') (groep 4).



Figuur 3: Illustratie van reistijd vanaf instaphalte tot het instappen in het aansluitende voertuig voor de vier groepen overstappende reizigers bij een frequentie van 3x per uur (Lee et al. 2014)

Om de reistijdeffecten voor deze reizigersgroepen te berekenen is gebruik gemaakt van Automatische Voertuig Locatie data (AVL data: in Nederland aangeduid als NDOV data, zie bijv. Van Oort et al. 2015) data als input. Deze dataset bevat zowel de geplande als gerealiseerde vertrek- en aankomsttijd van elke voertuigrit bij elke halte. Vergelijking (1) toont de berekening van de extra wachttijd bij de instaphalte voor reizen zonder overstap in geval van een laagfrequent OV systeem (Furth & Muller 2006). Diezelfde categorisering is gebruikt om reizigers met overstap te verdelen in de categorie welke bij de eerste rit het geplande voertuig haalt ('Make') of mist ('Miss').

$$ATT_{l,i,j} = \begin{cases} D_{l,i+1,j}^{act} - D_{l,i,j}^{sched} & \text{if } D_{l,i,j}^{act} \leq -\tau_{early} \\ 0 & \text{if } -\tau_{early} < D_{l,i,j}^{act} < \tau_{late} \\ D_{l,i,j}^{act} - D_{l,i,j}^{sched} & \text{if } D_{l,i,j}^{act} \geq \tau_{late} \end{cases} \quad (1)$$

Het aantal reizigers dat de overstap wel en niet haalt wordt vervolgens gedefinieerd door vergelijking (2) en (3). De aankomsttijd van overstappende reizigers op de locatie / het perron van het aansluitende voertuig wordt berekend volgens vergelijking (4), met een veronderstelde overstap-looptijd van 2 minuten. De looptijd t_{l-m}^{walk} kan stochastisch zijn op basis van variatie in loopsnelheid. In deze studie hanteren we echter een constante loopsnelheid.

$$N_{l-m,i,j}^{make} = N_{l-m,i,j}^{trans} \times P\left(t_{l-m,i,j}^{platform} \leq D_{m,i,j}^{act}\right) = \int_{-\infty}^{D_{m,i,j}^{act}} F(x) dx \quad (2)$$

$$N_{l-m,i,j}^{miss} = N_{l-m,i,j}^{trans} - N_{l-m,i,j}^{make} \quad (3)$$

$$t_{l-m,i,j}^{platform} = A_{l,i,j}^{act} + t_{l-m}^{walk} \quad (4)$$

Hierbij hanteren we de volgende variabelen:

| | | |
|--|---|--|
| $A_{l,i,j}^{sched}$ | = | Geplande aankomsttijd van voertuig i van lijn l bij halte j |
| $A_{l,i,j}^{act}$ | = | Gerealiseerde aankomsttijd van voertuig i van lijn l bij halte j |
| $N_{l-m,i,j}^{trans}$ | = | Aantal overstappende reizigers uit voertuig i van lijn l naar lijn m bij halte j |
| $D_{m,i,j}^{sched}$ | = | Geplande vertrektijd van voertuig i van lijn m vanaf halte j |
| $D_{m,i,j}^{act}$ | = | Gerealiseerde vertrektijd van voertuig i van lijn m vanaf halte j |
| t_{l-m}^{walk} | = | Looptijd van aankomstlocatie van lijn l naar vertreklocatie lijn m |
| $t_{l-m,i,j}^{platform}$ | = | Aankomsttijd van overstappende reizigers van lijn l op de vertreklocatie van lijn m |
| $F(x)$ | = | Verdeling van op halte / perron arriverende reizigers |
| $N_{l-m,i,j}^{make}$ | = | Aantal reizigers dat vanuit voertuig i op halte j de geplande aansluiting van lijn l naar lijn m haalt |
| $N_{l-m,i,j}^{miss}$ | = | Aantal reizigers dat vanuit voertuig i op halte j de geplande aansluiting van lijn l naar lijn m mist |
| $P(t_{l-m,i,j}^{platform} \leq D_{m,i,j}^{act})$ | = | Kans dat reiziger vanuit voertuig i op de vertreklocatie van lijn m arriveert voor de gerealiseerde vertrektijd van lijn m |

Op basis van de categorisering van overstappende reizigers in een van de vier groepen kan de extra reistijd voor elke individuele overstappende reiziger worden berekend met vergelijking (5). Voor een specifieke overstap kan vervolgens de totale extra reistijd berekend worden met behulp van vergelijking (6), waaruit de gemiddelde extra reistijd volgt in vergelijking (7).

$$ATT_{l-m,i,j}^{transfer} = \begin{cases} D_{m,i,j}^{act} - D_{m,i,j}^{sched} & \text{for Make Make} \\ D_{m,i+1,j}^{act} - D_{m,i,j}^{sched} & \text{for Make Miss} \\ D_{m,i+1,j}^{act} - D_{m,i,j}^{act} & \text{for Miss Make} \\ D_{m,i+2,j}^{act} - D_{m,i,j}^{act} & \text{for Miss Miss} \end{cases} \quad (5)$$

$$ATT_{l-m}^{transfer,total} = \sum_i ATT_{l-m,i,j}^{transfer} \times N_{l-m,i,j}^{trans} \quad (6)$$

$$ATT_{l-m}^{transfer} = \frac{ATT_{l-m}^{transfer,total}}{N_{l-m,i,j}^{trans}} \quad (7)$$

Hierbij hanteren we de volgende variabelen:

$$\begin{aligned} ATT_{l-m}^{transfer,total} &= \text{Totale extra reistijd voor reizigers die overstappen van lijn } l \text{ naar } m \\ ATT_{l-m}^{transfer} &= \text{Gemiddelde extra reistijd per reiziger die overstapt van lijn } l \text{ naar } m \\ ATT_{l-m,i,j}^{transfer} &= \text{Totale extra reistijd voor reizigers die overstappen van lijn } l \text{ naar } m \\ &\quad \text{vanuit voertuig } i \end{aligned}$$

De Reliability Buffer Time wordt berekend op basis van de verdeling van de extra reistijd per individuele reiziger:

$$RBT^{transfer} = T^{add,transfer,95th} - T^{add,transfer,50th} \quad (8)$$

Dit framework is gehanteerd om betrouwbaarheid van overstappende reizigers te berekenen voor een hypothetisch OV netwerk (hoofdstuk 4) en een werkelijk case study netwerk (hoofdstuk 5).

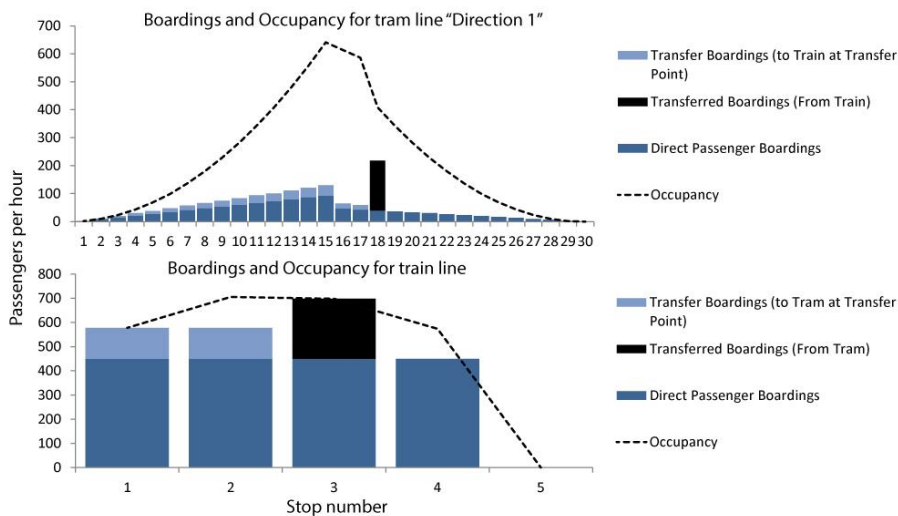
4. Resultaten voor hypothetisch OV netwerk

De methodiek zoals omschreven in hoofdstuk 3 wordt in dit hoofdstuk toegepast op een hypothetisch netwerk wat bestaat uit een tramlijn en spoorlijn, beide geëxploiteerd in beide richtingen. Op één locatie is een overstapmogelijkheid tussen tram en trein. Paragraaf 4.1 omschrijft het OV netwerk, paragraaf 4.2 toont de resultaten.

4.1 Omschrijving OV netwerk

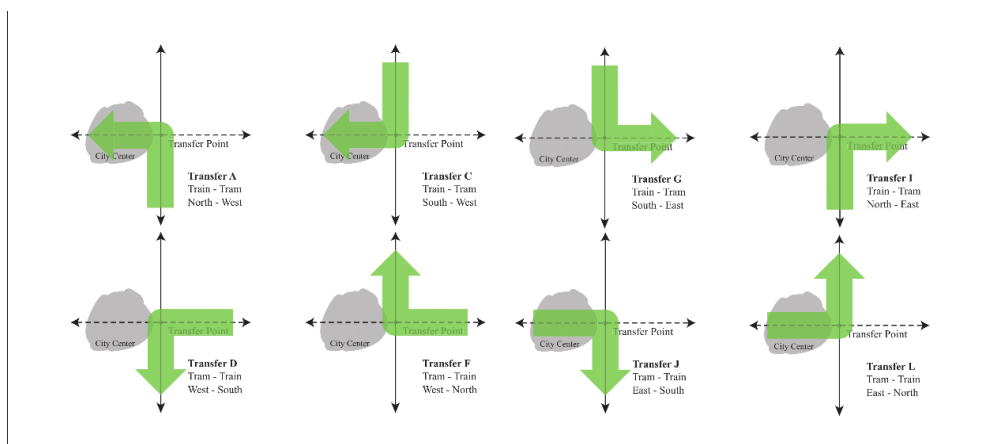
De tramlijn bestaat uit 30 haltes. De geplande rijtijd over de gehele lijn is 60 minuten per richting. De treinroute bestaat uit 5 stations en beslaat 40 minuten per richting. In de dienstregeling van de treinroute is bij elk station een geplande halteertijd van 1 minuut opgenomen. Voor beide lijnen geldt een frequentie van 4 voertuigen per uur per richting, resulterend in een geplande opvolgtijd van 15 minuten. De dienstregeling van de trein is dusdanig dat de vertrektijden op het overstapstation in beide richtingen gelijk zijn. Gerealiseerde aankomst- en vertrektijden zijn gegenereerd vanuit cumulatieve rijtijden op elke link, op basis van een random trekking uit een normale verdeling waarbij de standaarddeviatie gelijk is aan 20% van de geplande rijtijd. Het overstapstation is in het midden van de treinroute, en nabij het midden van de tramlijn (halte 13 en 18, respectievelijk voor elke richting). Dit kan als representatief worden beschouwd voor een typische grote stad in Nederland, waarbij het centraal station veelal aan de rand van het centrum is gepositioneerd.

Reizigersaantallen voor de tramlijn zijn gebaseerd op de hypothetische case study gehanteerd door Van Oort (2011). Twee-derde van de reizigers stapt in de eerste helft van de tramlijn in, waarbij het aantal instappers vanaf het begin van de lijn tot aan het centrum steeds verder toeneemt. Een-derde van de reizigers stapt in het tweede deel van de tramlijn in, waarbij het aantal instappers richting het eindpunt van de lijn steeds verder afneemt. Het aantal reizigers in de trein is constant verondersteld over de gehele route, met een gelijk aantal in- en uitstappers voor elk station. Overstappende reizigers zijn aan deze reizigersaantallen toegevoegd als percentage van het aantal directe, niet-overstappende tramreizigers (zie Figuur 4).



Figuur 4: Instappers en bezetting voor de tram- en spoorlijn in één richting, met onderscheid tussen reizigers die wel en niet overstappen. Instappers zijn verdeeld in reizigers die gaan overstappen, een overstap gemaakt hebben, en niet overstappen (Lee et al. 2014)

In dit netwerk zijn acht overstappen mogelijk: vier vanuit de tram naar de trein en vier van de trein naar de tram, aangeduid als overstappen A, C, D, F, G, I, J en L (zie Figuur 5). Aangezien de vertrektijden van de trein in beide richtingen op elkaar is afgestemd, is het mogelijk om de geplande overstaptijd te kiezen voor vier van deze overstappen door het verschuiven van de vertrektijden van de tram. De overstaptijd voor de vier overstappen in de tegengestelde richting staat hiermee vast en kan niet meer vrij gekozen worden. Dit laat de meest optimale situatie zien, waarbij het maximale aantal overstappen kan worden gekozen om op elkaar af te stemmen. In de geplande overstaptijd, het verschil tussen de geplande vertrektijd van de tweede lijn en de geplande aankomsttijd van de eerste lijn, is overstap-looptijd niet inbegrepen. Dit betekent dat reizigers een overstap met geplande overstaptijd van 1 minuut niet halen, gegeven de voor dit netwerk veronderstelde overstap-looptijd van 2 minuten. In deze case study is de dienstregeling van de tram steeds gevarieerd, waardoor de geplande overstaptijd varieert van 1 tot 14 minuten. In de berekeningen is verondersteld dat reizigers in principe hun overstap zoals gepland maken. Dit betekent dat bij een geplande overstaptijd van 1 minuut reizigers de aansluiting zullen missen, tenzij het eerste voertuig te vroeg arriveert of het voertuig van de tweede lijn te laat vertrekt.



Figuur 5: Identificatie van overstappen in het hypothetische en real-life case study OV netwerk (trein weergegeven met doorgetrokken lijn; tram met gestippelde lijn). Overstapgroepen zijn aangeduid met een letter waarna in de tekst in hoofdstuk 4 en 5 wordt verwezen (Lee et al. 2014)

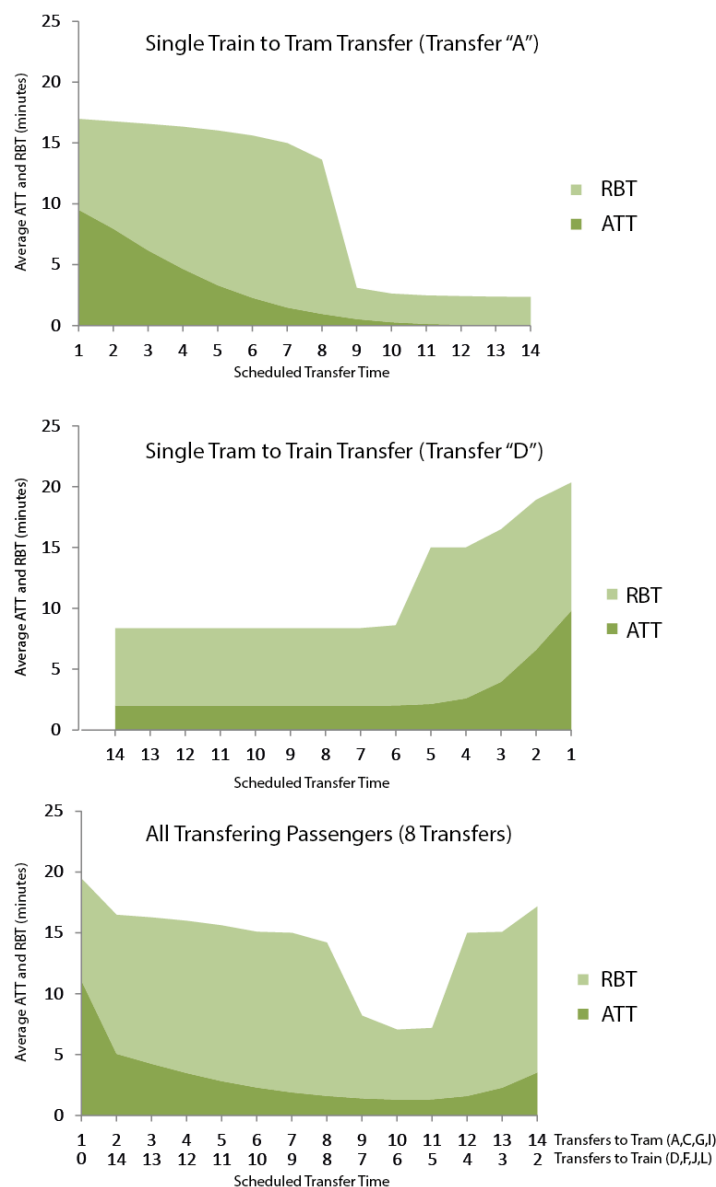
4.2 Resultaten

De gemiddelde extra reistijd per reiziger en de RBT voor twee specifieke overstappen zijn weergegeven in Figuur 6. In beide gevallen zijn deze figuren representatief voor alle vier vergelijkbare overstappen, aangezien de belangrijkste variabelen hetzelfde zijn. Conform verwachting laten de resultaten zien dat een overstap onbetrouwbaarder wordt, naarmate de geplande overstaptijd korter is. Dit illustreert de belangrijke spanning tussen betrouwbaarheid bij een overstap en geplande reistijd. Een langere geplande overstaptijd reduceert de extra reistijd en de RBT, maar leidt direct tot een toename in de totale geplande reistijd. Dit betekent dat een verbetering in de betrouwbaarheid van een overstap leidt tot een toename van de geplande reistijd. Figuur 6 laat een verschil in de curve zien tussen beide voorbeelden. De curve van een overstap van tram naar trein daalt steiler dan de curve van een overstap van trein naar tram, maar bereikt niet de waarde nul. Dit verschil komt voort uit het gegeven dat het voor treinen niet is toegestaan om te vroeg te vertrekken. Dit betekent dat minder reizigers hun aansluiting missen in geval van een krappe aansluiting, omdat de trein in ieder geval niet te vroeg kan vertrekken. Dit betekent ook dat voor langere overstaptijden de gemiddelde extra reistijd niet gelijk wordt aan nul.

Bij de RBT valt op dat in geval van een overstap van trein naar tram, de 95^e percentiel waarde van de reistijd sterk afneemt van 15 minuten tot ongeveer 3 minuten. Dit suggereert dat een grote toename in betrouwbaarheid gerealiseerd kan worden, wanneer de geplande overstaptijd van 8 minuten wordt opgerekt tot 9 minuten. Dit geeft echter een misleidend beeld, als gevolg van de aard van de RBT. De verdeling van overstaptijd is namelijk opgebouwd uit twee groepen: een groep rondom 0 minuten die de geplande overstap halen, en een groep rondom de opvolgtijd van de lijn waarop overgestapt wordt die de overstap missen. Het 95^e percentiel van deze verdeling blijft rondom 15 minuten (de opvolgtijd) wanneer het percentiel zich bevindt in deze bovenste sub-verdeling, maar lijkt opeens sterk af te nemen doordat slechts weinig reizigers een overstaptijd hebben met een overstaptijd tussen ca. 0 en ca. 15 minuten in. Bij de overstap van tram naar trein is de RBT in enkele gevallen langer dan de opvolgtijd van 15 minuten. Dit komt door de extra reistijd voor reizigers die zowel hun eerste voertuig, als hun overstap missen. Bij 'overstap A' in de bovenste afbeelding van Figuur 6 is dit deel van de verdeling niet zichtbaar, als gevolg van de aard van het gebruikte model. Dit komt omdat reizigers van 'overstap A' hun reis per trein beginnen. Aangezien de trein niet verondersteld is te vroeg te kunnen vertrekken, en reizigers verondersteld worden hun geplande eerste voertuig te halen wanneer deze na τ^{early} vertrekt, is het niet mogelijk voor deze treinreizigers om hun eerste voertuig te missen. Dit is een beperking van de gehanteerde methodiek. Het effect van het missen van de trein kan in vervolgonderzoek worden meegenomen, indien het model zou worden uitgebreid tot het beschouwen van volledige multimodale deur-tot-deur reizen, met stedelijk OV zowel als voortransport als natransport van een treinreis. Hiermee kan het effect van vertragingen in het voortransport op het al dan niet missen van de trein als hoofdvervoerwijze, met vervolgens gevolgen voor vertragingen in de reis met bus/tram/metro als natransport, volledig gekwantificeerd worden.

Aangezien het variëren van de overstaptijd van een bepaalde overstap een tegengesteld effect heeft op een andere overstap, is het relevant om de effecten van alle overstappen tezamen te analyseren. Figuur 6 (onder) toont de gemiddelde extra wachttijd en RBT voor alle acht groepen van overstappende reizigers, terwijl de geplande overstaptijd voor alle acht overstappen wordt gevarieerd. In dit geval ligt het optimum bij een geplande overstaptijd van 10 minuten voor trein-tram overstappen, en 6 minuten voor tram-trein overstappen. Bij dit optimum is de geplande overstaptijd van tram naar trein korter dan van trein naar tram. Dit komt omdat treinen in principe niet te vroeg vertrekken, waardoor overstappen vanuit de tram richting de trein betrouwbaarder zijn dan overstappen vanuit de trein richting de tram. De betrouwbaarheids-

winst leidt tot een toename in geplande reistijd. Zoals te zien in Figuur 6, betekent een steilere curve van extra reistijd een grotere toename in betrouwbaarheid per minuut toename in reistijd. Bij 'overstap D' bijvoorbeeld leidt een toename van de geplande overstaptijd met 1 minuut tot een toename in betrouwbaarheid, wanneer de nieuwe geplande overstaptijd minder dan 5 minuten is. Aan de andere kant treedt geen toename in betrouwbaarheid op, wanneer de geplande overstaptijd met 1 minuut toeneemt van 8 naar 9 minuten. Echter, zoals gesteld kan het puur optimaliseren van betrouwbaarheid leiden tot een toename in geplande reistijd. In hoofdstuk 5 wordt op kwantitatieve wijze meer aandacht gegeven aan deze spanning.

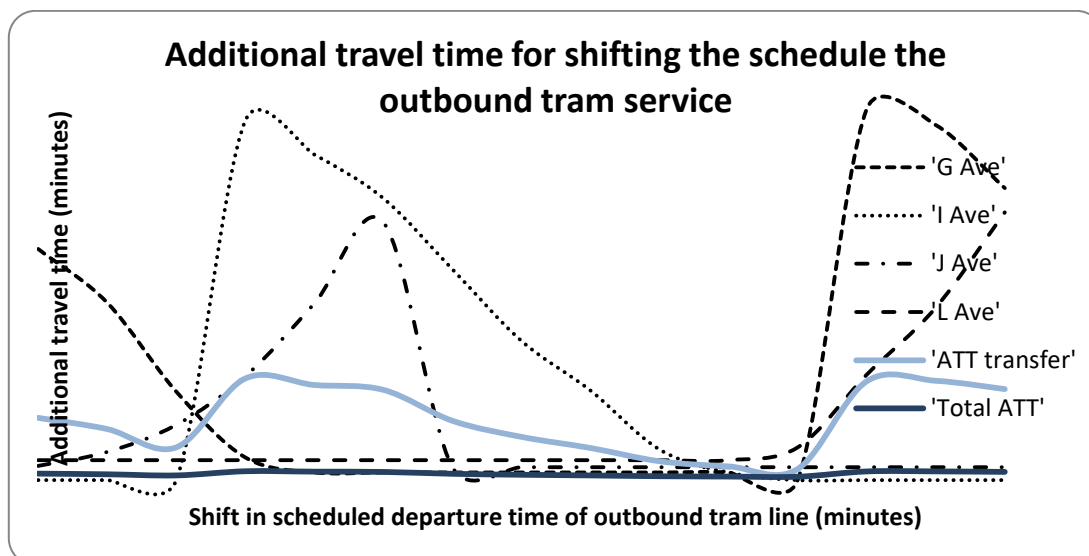


Figuur 6: Gemiddelde extra reistijd en RBT voor reizigers van 'overstap A' (bovenste figuur), reizigers van 'overstap D' (middelste figuur), en voor alle overstappende reizigers van alle 8 overstapmogelijkheden (onderste figuur) (Lee et al. 2014)

5. Resultaten voor bestaand OV netwerk

In het hypothetische OV netwerken konden we het effect van diverse variabelen in OV netwerk ontwerp op betrouwbaarheid van een overstap illustreren. In dit hoofdstuk passen we deze methodiek toe op basis van een bestaand OV netwerk met realisatiedata uit de praktijk. We laten zien hoe NDOV data (AVL data) en data met passagiersaantallen gebruikt kan worden in deze methodiek, en hoe vervoerders deze resultaten kunnen gebruiken. Door HTM, stadsvervoerder in Den Haag, zijn zowel geplande als gerealiseerde aankomst- en vertrektijden en reizigersaantallen verstrekt van tramlijn 9. Deze lijn rijdt vanuit Scheveningen via station Den Haag Centraal, de Haagse binnenstad, station Den Haag HS in westelijke richting naar Vrederust. Dit voorbeeld richt zich op de overstap bij station Den Haag HS. De treindienstregeling is als input gebruikt in ons model. Gerealiseerde vertrek- en aankomsttijden van de trein zijn gegenereerd uit een lognormale verdeling, waarvan de parameters dusdanig gekozen zijn dat de punctualiteit van de Nederlandse Spoorwegen (NS) wordt benaderd. De data is afkomstig van 8 werkdagen in november 2012 in de avonduren. In dit geval rijden zowel de trein als tram elk kwartier.

Terwijl de treindienstregeling constant gehouden is, is de dienstregeling van de in westelijke richting rijdende tramlijn steeds gevarieerd om alle mogelijke geplande overstaptijden te kunnen evalueren. In dit geval heeft het verschuiven van de geplande overstaptijd invloed op vier overstappen: overstappen van de westelijke tramlijn naar de trein in zuidelijke richting (in Figuur 5 gelabeld als overstap J) en in noordelijke richting (overstap L), en overstappen van de trein vanuit noordelijke richting (overstap G) en vanuit zuidelijke richting (overstap I) naar de westelijke tramlijn. De effecten van het variëren van de geplande overstaptijd op de extra reistijd van deze groepen reizigers worden getoond in Figuur 7 ('Ave' in Figuur 7). Ook wordt de gemiddelde extra reistijd getoond voor alle acht groepen overstappende reizigers gezamenlijk, daarmee inclusief de constante extra reistijd voor de resterende vier overstapgroepen ('ATT transfer' in Figuur 7). De gemiddelde extra reistijd voor alle reizigers in het OV netwerk, inclusief directe trein- en tramreizigers die zonder overstap reizen ('Total ATT' in Figuur 7), laat zien dat het aantal overstappende reizigers van groot belang is bij het vaststellen van de optimale geplande overstaptijd. Aangezien ook niet-overstappende reizigers in de variabele 'Total ATT' zijn opgenomen, worden effecten van overstap-betrouwbaarheid uitgemiddeld ten opzichte van 'ATT transfer'. Omdat in deze case study de treinen in beide richtingen niet dezelfde geplande vertrektijd hebben vanaf Den Haag HS (zoals wel het geval was in het hypothetische OV netwerk), treden ook de 'pieken' in onbetrouwbaarheid niet op. Hierdoor is het moeilijk om een dienstregeling te vinden die betrouwbaar is voor alle overstaprichtingen.



Figuur 7: Extra reistijd bij het schuiven van de dienstregeling van tramlijn 9 (westelijke richting) in Den Haag (Lee et al. 2014)

Het optimum wat betreft extra reistijd komt neer op het verschuiven van de dienstregeling van tramlijn 9 (westelijke richting) met 11 minuten. Hierdoor wijzigt voor sommige overstappen de geplande overstaptijd met 11 minuten (meer of minder), en voor andere overstappen met 4 minuten (meer of minder). Dit resulteert in een gewijzigde geplande reistijd voor de verschillende groepen overstappende reizigers. Tabel 2 laat zien dat de toename van de geplande overstaptijd voor overstap G en J resulteert in een afname in de extra reistijd, een afname van de benodigde buffer tijd (RBT), en een toename van de betrouwbaarheid. Anderzijds wordt de geplande overstaptijd van overstap L 11 minuten korter, waardoor de extra reistijd en benodigde buffertijd juist toeneemt. Ook bij overstap I daalt de geplande overstaptijd, in dit geval met 4 minuten. Echter, zowel de oorspronkelijke als de nieuwe geplande overstaptijden zijn dusdanig ruim dat betrouwbaarheid niet negatief wordt beïnvloed door deze verkorting van de geplande overstaptijd.

De resultaten van deze case study laten zien dat het synchroniseren van een bepaalde overstap, teneinde de betrouwbaarheid te vergroten, kan leiden tot een lagere betrouwbaarheid van andere overstappen. Dit betekent dat een vervoerder ofwel moet kiezen welke overstap gesynchroniseerd wordt, ofwel een dienstregeling kiezen waarbij de betrouwbaarheid over alle overstaprichtingen gezamenlijk geoptimaliseerd wordt, of een dienstregeling kiezen waarbij de spanning tussen betrouwbaarheid en geplande reistijd geoptimaliseerd wordt. Hierbij is voornamelijk het aantal overstappende reizigers bij elke overstaplocatie belangrijk, aangezien een groter overstapvolume een grotere impact heeft op de totale extra reistijd op netwerkniveau.

Tabel 2: Gemiddeld effect per reiziger per overstapgroep van het verschuiven van de vertrektijden van tramlijn 9 (in westelijke richting) met 11 minuten op de geplande overstaptijd, extra reistijd en buffertijd

| | Wijziging in: | | |
|------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| | Geplande overstaptijd | Extra reistijd (ATT) | Buffer tijd (RBT) |
| Overstap G | 11.00 min | -9.33 min | -0.95 min |
| Overstap I | -4.00 min | 0.00 min | 0.00 min |
| Overstap J | 4.00 min | -0.05 min | -0.20 min |
| Overstap L | -11.00 min | 0.51 min | 6.16 min |

6. Vervolgonderzoek

Zoals in hoofdstuk 3 omschreven, is het aantal overstappende reizigers van belang om het effect van onbetrouwbaarheid van een overstap op de extra reistijd voor het gehele OV netwerk te kwantificeren. In dit hoofdstuk wordt omschreven hoe deze methodiek in vervolgonderzoek verder uitgebreid kan worden, door onbetrouwbaarheid op netwerkniveau te kwantificeren.

Om de optimale geplande overstaptijd vast te stellen dient steeds een afweging gemaakt te worden tussen de waarschijnlijkheid en de impact van het mogelijk missen van een aansluiting door overstappende reizigers, en het verlengen van de geplande reistijd voor overstappende en eventueel doorgaande reizigers (indien de halteertijd bij een overstapstation toeneemt). Om deze afwegingen te kunnen maken, is het van belang inzicht te hebben in het volume van de diverse reizigersstromen. Om de impact van een bepaalde geplande overstaptijd op de totale reistijd te kwantificeren, is inzicht benodigd in het volume van alle herkomst-bestemming relaties in het OV netwerk. De beschikbaarheid van diverse databronnen de afgelopen jaren stelt ons in staat om betrouwbaarheid in een netwerkcontext te kwantificeren. Op basis van anonieme OV Chipkaartdata kan het aantal gemaakte OV reizen voor elke herkomst-bestemming relatie worden afgeleid (zie bijv. Van Oort et al. 2015). Doordat in Nederland een gesloten regime geldt, waarbij zowel moet worden in- als uitgecheckt (in tegenstelling tot open regimes waarbij alleen hoeft worden ingecheckt, zoals in diverse steden wereldwijd gehanteerd), kan een goede benadering van de totale gerealiseerde reisduur worden verkregen. Aangezien bij stedelijk OV in Nederland in het voertuig moet worden in- en uitgecheckt, kan (overstap)looptijd afgeleid worden op basis van de geregistreerde check-in en check-out tijd, in combinatie met coördinaten van de in- en uitstaphalte. Dit biedt de mogelijkheid om het effect van het missen van een geplande overstap op de gehele reisduur te kwantificeren. Hierdoor is het ook mogelijk om indicatoren voor betrouwbaarheid te formuleren, waarmee betrouwbaarheid vanuit een reizigersperspectief op netwerkniveau wordt gemeten.

De in hoofdstuk 3 gedefinieerde 'reliability buffer time' (RBT) kan hierdoor gebaseerd worden op de reistijd van de totale OV reis, eventueel met meerdere overstappen (Wood 2015). Met de huidige databeschikbaarheid is het mogelijk om de extra reistijd op netwerkniveau vast te stellen ten opzichte van de verwachte, gemiddelde reistijd. Deze indicator wordt aangeduid als 'journey excess time' (JET) (Uniman et al. 2010). De JET is reeds op basis van OV Chipkaartdata toegepast voor de Londen Overground op netwerkniveau, waarbij overstappen expliciet zijn inbegrepen (Zhao et al. 2013; Hendren et al. 2015). Op basis van GTFS data (General Transit Feed Specification: data met informatie over de statische dienstregeling en lijnvoering) is het daarnaast mogelijk om de geplande reistijd volgens dienstregeling vast te stellen; op basis van chipkaarttransacties kan de gerealiseerde reistijd afgeleid worden. Hierdoor kan de JET ook worden vastgesteld ten opzichte van de *geplande* reistijd, in plaats van de *gemiddelde* reistijd. Bij deze indicator is de gerealiseerde extra reistijd (gerealiseerde reistijd T^a - geplande reistijd T^s) uitgedrukt als ratio ten opzichte van de geplande reistijd voor een bepaalde percentielwaarde $upp\%$ als maat voor betrouwbaarheid SD tussen i en j (zie vergelijking 9) (Bagherian et al. 2016). Deze indicator kan ruimtelijk geschaald worden van het herkomst-bestemming niveau naar het totale netwerkniveau, of uitgedrukt worden voor een specifieke herkomst of bestemming.

$$SD_{ij}(\tau) = \frac{T_{ij}^{a,upp\%} - T_{ij}^s}{T_{ij}^s} \quad (9)$$

Een beperking van deze indicator is dat alleen de nominale reistijd wordt gebruikt. De door reizigers ervaren reistijd, die verschilt tussen in-voertuig tijd, wachttijd of tijdens drukte, is hierin niet opgenomen. De in deze paper voorgestelde indicator kan daarom beschouwd worden als uitbreiding van de JET indicatoren van Uniman et al. (2010) en Bagherian et al. (2016). De 'perceived journey excess time' (PJET) drukt de ervaren extra reistijd T_p^a uit ten opzichte van de

geplande ervaren reistijd T_p^s . Om de indicator onafhankelijk van de reisduur te maken, wordt de indicator uitgedrukt als ratio ten opzichte van de geplande ervaren reistijd (zie vergelijking 10). In lijn met Bagherian et al. (2016) wordt de gerealiseerde ervaren reistijd vergeleken met de geplande reistijd. Dit heeft als voordeel dat een reistijd als referentie wordt gehanteerd, die - in tegenstelling tot de gemiddelde reistijd - onafhankelijk is van de huidige mate van (on)betrouwbaarheid van het OV netwerk. Hiermee is deze indicator gemakkelijker te interpreteren en communiceren richting vervoerders, OV autoriteiten en reizigers. Het meenemen van de ervaren reistijd komt meer overeen met de perceptie van reizigers in geval van onbetrouwbaarheid. Bij stedelijk OV kan onbetrouwbaarheid bijvoorbeeld bunching van voertuigen tot gevolg hebben: de situatie waarin twee voertuigen van dezelfde lijn vlak achter elkaar rijden, in plaats van met de geplande opvolgtijd. In geval van een hoogfrequente lijn blijft het effect van bunching op de gemiddelde wachttijd beperkt. Echter, door de ongelijkmatige verdeling van reizigers over de beschikbare capaciteit kan de gemiddelde drukte in het voertuig, en daarmee de ervaren in-voertuig tijd, aanzienlijk toenemen. Het niet meenemen van reistijdperceptie kan daarmee de impact van onbetrouwbaarheid op reizigers onderschatten.

$$T_{ij}^{PJET} = \frac{T_{p,ij}^{a,upp\%} - T_{p,ij}^s}{T_{p,ij}^s} \quad (10)$$

Zowel de geplande als gerealiseerde ervaren reistijd kunnen worden berekend door het sommeren van de verschillende reistijdcomponenten, elke component gewogen conform reizigersperceptie. Het verschil tussen de geplande en gerealiseerde ervaren in-voertuig tijd wordt bepaald op basis van bezettingscijfers. Naarmate een voertuig drukker is, wordt de reistijd negatiever door reizigers ervaren. De nominale in-voertuig tijd wordt veelal vermenigvuldigd met een bepaalde crowding factor, die toeneemt met toenemende drukte (Wardman 2012). De verwachte drukte kan worden bepaald op basis van historische bezettingscijfers per traject per uur, en de daarbij horende ervaren in-voertuig tijd. Door de ervaren in-voertuig tijd behorend bij de gerealiseerde drukte in het voertuig te vergelijken met de verwachte drukte en verwachte in-voertuig tijdperceptie, kan het effect van onbetrouwbaarheid op in-voertuig tijdperceptie gekwantificeerd worden. Ook deze indicator kan ruimtelijk geschaald worden. In plaats van de PJET uit te drukken voor een specifiek herkomst-bestemmingspaar, kan deze ook worden uitgedrukt voor een specifieke herkomst of specifieke bestemming. Door zowel over alle herkomsten als bestemmingen te aggregeren, kan betrouwbaarheid op netwerkniveau worden uitgedrukt. Ook kan de PJET bepaald worden voor verschillende tijdsperioden, indien op basis van GTFS data voor elke tijdsperiode de geplande reistijd is vastgesteld.

De PJET kan ook worden toegepast om expliciet betrouwbaarheid van een overstaplocatie te kwantificeren. OV knooppunten kunnen verschillen in de mate van betrouwbaarheid, wat routekeuze van reizigers kan beïnvloeden. Inzicht in knooppunt-betrouwbaarheid is daarom van belang. Twee verschillende indicatoren worden in deze paper gepresenteerd. Een voor de hand liggende indicator is het percentage gemiste overstappen, gewogen naar het aantal overstappende reizigers (zie vergelijking 11). Op basis van NDOV data kan voor elke combinatie van binnenkomende en vertrekkende rit r van OV lijn l bij een overstappunt, in combinatie met een minimaal benodigde overstap-looptijd, worden vastgesteld of een overstap is gehaald. Op basis van OV Chipkaartdata kan het aantal reizigers per overstaprelatie $q_{r_{l_1}-r_{l_2}}$ gekwantificeerd worden, waardoor deze indicator meer gewicht geeft aan het missen van een overstap met een groot reizigersvolume. Door dit te aggregeren over alle mogelijke overstaprelaties kan de betrouwbaarheid van de overstaplocatie s_{hub} als geheel inzichtelijk gemaakt worden en vergeleken worden met andere overstaplocaties in het netwerk S_{hub} . Deze indicator kan verder uitgebreid worden door de extra ervaren reistijd tijdens de gehele reis als gevolg van het missen van een overstap te kwantificeren (vergelijking 12). Hierdoor wordt de impact van het missen van een overstap op het resterende deel van de reis meegenomen in de indicator. Neem

bijvoorbeeld een drukke overstap tussen twee hoogfrequente OV lijnen, die in de praktijk relatief onbetrouwbaar blijkt te zijn. Bij het toepassen van de indicator volgens vergelijking (11) is dit een onbetrouwbare overstap: er is sprake van een hoog percentage gemiste overstappen, in combinatie met een groot overstapvolume. Echter, de impact van het missen van de overstap kan beperkt blijven, als door de hoge frequentie de wachttijd en uiteindelijke aankomsttijd op de eindbestemming slechts enkele minuten later dan gepland is. Was bij dezelfde overstapvolumes sprake van een laagfrequent OV systeem, zou de impact op de uiteindelijke extra ervaren reistijd aanzienlijk groter zijn. De indicator volgens vergelijking (12) is in staat om dit onderscheid te maken, door de impact op de uiteindelijke extra ervaren reistijd centraal te stellen.

$$Q_{mc} = \frac{\sum_l^L \sum_r^R q_{t,r,l_1-r,l_2} * MC_{q_{r,l_1-r,l_2}}}{\sum_l^L \sum_r^R q_{t,r,l_1-r,l_2}} \quad \forall S_{hub} \in S_{hub} \quad (11)$$

$$PJET_{mc} = \frac{\sum_l^L \sum_r^R q_{t,r,l_1-r,l_2} * MC_{q_{r,l_1-r,l_2}} * (T^a - T^s)}{\sum_l^L \sum_r^R q_{t,r,l_1-r,l_2} * T^s} \quad \forall S_{hub} \in S_{hub} \quad (12)$$

met $MC = \begin{cases} 1 & \text{als de overstap gemist is} \\ 0 & \text{als de overstap gehaald is} \end{cases}$

Conclusies

In deze paper is een uitbreiding gepresenteerd van de methodiek om betrouwbaarheid te kwantificeren vanuit reizigersperspectief volgens Van Oort (2011). Deze behelst het in acht nemen van betrouwbaarheid van overstappen, vaak een zwakke schakel in een OV reis. In het uitgebreide model worden alle acht mogelijke groepen overstappende reizigers expliciet in beschouwing genomen, waardoor inzichtelijk kan worden gemaakt voor welke groepen reizigers de betrouwbaarheid toeneemt of juist afneemt. De optimale geplande overstaptijd, uit het oogpunt van betrouwbaarheid, is afhankelijk van de verdeling van gerealiseerde aankomst- en vertrektijden van voertuigen bij de overstaplocatie, de overstap-looptijd, frequentie van OV lijnen, en het aantal overstappende reizigers. Ook is geïllustreerd dat restricties in het vertrekregime invloed hebben op betrouwbaarheid. Voor overstappen van de tram naar de trein zijn kortere geplande overstappen betrouwbaarder dan voor overstappen van trein naar tram, omdat treinen niet te vroeg vertrekken. Door middel van gebruik van NDOV data en anonieme OV Chipkaartdata is het mogelijk om de betrouwbaarheid van een overstaplocatie, of van een OV netwerk als geheel, op netwerkniveau te kwantificeren.

Voor een specifieke overstap is sprake van een trade-off tussen de geplande reistijd enerzijds, en de extra reistijd en benodigde buffertijd als gevolg van onbetrouwbaarheid anderzijds. De optimale geplande overstaptijd is afhankelijk van de specifieke eigenschappen van de overstap, zoals de verdeling van aankomsttijden, frequenties van beide lijnen, overstap-looptijd en het aantal OV reizigers. Het wijzigen van de dienstregeling van één lijn in een bepaalde richting, om deze overstap te optimaliseren, kan echter direct invloed hebben op de drie andere overstaprichtingen. In dit geval dient een keuze gemaakt te worden om te zich te richten op het optimaliseren van de overstap van één bepaalde overstapgroep, of om een optimale overstaptijd te hanteren over alle overstapgroepen gezamenlijk. De methodiek uit deze paper kan worden toegepast in maatschappelijke kosten-baten analyses. Met deze methodiek kunnen zowel de totale betrouwbaarheidsbaten, als de baten voor een specifieke groep reizigers, geïdentificeerd worden als gevolg van een bepaalde maatregel, zoals aanpassing van de dienstregeling.

Dankwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met HTM, Den Haag.

Referenties

- Bagherian, M., O. Cats, N. van Oort & M. Hickman. Measuring passenger travel time reliability using smartcard data, 2016. *To be published*.
- Balcombe, R., N. Mackett, N. Paulley, J. Preston, J. Shires, H. Titheridge, M. Wardman, & P. White. *The demand for public transport: A practical guide*. TRL 593, 2004.
- Cats, O., M. Yap, N. van Oort (2016) Exposing the role of exposure: Public transport network risk analysis, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 88, pp. 1-14,
- Ceder, A. Public transit planning and operation, theory, modelling and practice, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, 2007.
- Ceder, A., S. Chowdhury, N. Taghipouran, & J. Olsen. Modelling public-transport users' behaviour at connection point. *Transport Policy*, Vol. 27, 2013, pp. 112-122.
- Furth, P. & T. Muller. Service reliability and hidden waiting time insights from automatic vehicle location data. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1955, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006, pp. 79-87.
- Golob, T., E. Canty, R. Gustafson, & J. Vitt. An analysis of consumer preferences for a public transportation system. *Transportation Research*, Vol. 6, No. 1, 1972, pp. 81-102.
- Hendren, P., J. Antos, Y. Carney, & R. Harcum. Transit Travel Time Reliability: 2 Shifting the Focus from Vehicles to Customers 3, In *Transportation Research Board 94th Annual meeting*, 2015.
- König, A. & K. Axhausen. The reliability of the transportation system and its influence on the choice behavior. In *Proceedings of the 2nd Swiss Transportation Research Conference*, Monte Verita, 2002.
- Kouwenhoven, M., De Jong, G., Koster, P., Van den Berg, V., Verhoef, E., Bates, J. & Warffemius, P. (2015). De waarde van betrouwbare reistijden in personenverkeer- en vervoer in Nederland. *Tijdschrift Vervoerwetenschap*, 51(1), pp. 17-48.
- Lee, A. N. van Oort, R. van Nes (2014), Service reliability in a network context, *Transportation Research Record*, Vol. 2417, pp. 18-26.
- Mai, E., G. List, & R. Hranac. Simulating the travel time impact of missed transit connections. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.2274, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012, pp. 69-76.
- Muller, T. H. J. & P.G. Furth. *Transfer scheduling and control to reduce passenger waiting time*. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2112, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2009.
- O'Flaherty, C.A. & D.O. Mangan. Bus passengers waiting time in central areas, *Traffic Engineering Cont.* 11, 1970, pp. 419-421.
- Savelberg, F. and P. Bakker. *Betrouwbaarheid en robuustheid op het spoor*, 2010. Kennisinstituut van Mobiliteitsbeleid, Nederland.
- Schmöcker, J. D. & M.G.H. Bell. The PFE as a tool for robust multi-modal network planning. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 43, No. 3, 2002, pp. 108-115.
- Seddon, P.A. & M.P. Day. Bus passengers waiting times in greater Manchester, *Traffic Engineering Cont.* 15, 1974, pp. 422-445.
- Turnquist, M. & L. Bowman. The effects of network structure on reliability of transit service. *Transportation Research Part B*, Vol. 14, No. 1-2, 1980, pp. 79-86.

A. Lee, M.D. Yap, N. van Oort

Overstappen en onbetrouwbaarheid in het OV: Een methodiek voor kwantificering van reizigerseffecten in een netwerkcontext

Uniman, D., J. Attanucci, R. Mishalani & N. Wilson. Service Reliability Measurement Using Automated Fare Card Data, In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* No. 2143, 2010, pp. 92-99.

Van der Waard, J. The relative importance of public transport trip time attributes in route choice, In *PTRC Summer Annual Meeting, 16th, 1988, Bath, United Kingdom*. 1988.

Van Nes, R., Hansen, H. & Winnips, C. *Potentie multimodaal vervoer in stedelijke regio's*, 2014. Technische Universiteit Delft, Nederland.

Van Oort, N. *Service Reliability and Urban Public Transport Design* (PhD dissertation). TRAIL Thesis Series T2011/2. TRAIL Research School, Delft, 2011.

Van Oort, N., N.H.M Wilson & R. Van Nes. Reliability improvement in short headway transit services. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2143, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010, pp. 67-76.

Van Oort, N., J. Boterman, and R. Van Nes. The impact of scheduling on service reliability: Trip-time determination and holding points in long-headway services. *Public Transport*, Vol. 4, No. 1, 2012, pp. 39-56.

Van Oort, N., T. Brands, E. de Romph (2015a), Short-Term Prediction of Ridership on Public Transport with Smart Card Data, *Transportation Research Record*, No. 2535, pp. 105-111.

Van Oort, N., D. Sparing, T. Brands, R.M.P. Goverde (2015b), Data driven improvements in public transport: the Dutch example, *Public Transport*, Vol 7(3), pp.369-389

Vuchic, V.R. *Urban Transit, Operations, Planning and Economics*, John Wiley and Sons, 30 Inc, New Jersey, 2005.

Wardman, M. Review and meta-analysis of U.K. time elasticities of travel demand, In *Transportation*, Vol. 39, No. 3, 465-490. DOI: 10.1007/s11116-011-9369-2, 2012.

Warffemius, P. *De maatschappelijke waarde van kortere en betrouwbaardere reistijden*, 2013. Kennisinstituut van Mobiliteitsbeleid, Nederland.

Wood, D.A. A framework for measuring passenger-experienced transit reliability using automated data. Massachusetts Institute of Technology, 2015.

Zhao, J., M. Frumin, N. Wilson & Z. Zhao. Unified estimator for excess journey time under heterogeneous passenger incidence behavior using smartcard data, In *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 34, 2013, pp. 70-88.