

Betrouwbare modellen door onbetrouwbaar OV

dr. ir. Niels van Oort
TU Delft / Goudappel Coffeng
N.vanOort@TUDelft.nl

ir. Robert van Leusden
Bestuur Regio Utrecht
r.van.leusden@regioutrecht.nl

ir. Ties Brands
Goudappel Coffeng / Universiteit Twente
tbrands@goudappel.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
21 en 22 november 2013, Rotterdam**

Samenvatting

Betrouwbare modellen door onbetrouwbaar OV

Al het OV rijdt op tijd in verkeersmodellen. Huidige, state of the art, verkeersmodellen houden namelijk geen expliciete rekening met de betrouwbaarheid van de dienstuitvoering van OV, terwijl het door reizigers als één van de belangrijkste aspecten wordt gezien. Een onbetrouwbare dienstuitvoering leidt tot extra reistijd en een onzekere aankomsttijd. De verwachting is dan ook dat reizigers lagere kosten ervaren als zij gebruik maken van een meer betrouwbare reisoctie. Om dit aspect mee te kunnen nemen in een verkeersmodel, wordt in dit paper een driestappenplan gepresenteerd, gebruik makend van data over de gerealiseerde dienstuitvoering uit GOVI. Deze drie stappen bestaan uit het bepalen van de rijtijdspreiding van de voertuigen, het bepalen van het effect op wacht- en in-voertuigtijd en uiteindelijk het bepalen van het verwachte effect van onbetrouwbaarheid op de gemiddelde reistijd per reiziger. Deze benadering is succesvol getest op het verkeersmodel van de regio Utrecht: door het toevoegen van betrouwbaarheid als kenmerk van de OV lijnen in het model, is de verklarende waarde van het model toegenomen, doordat resultaat voor kalibratie 18% dichterbij de telcijfers komt. Doordat betrouwbaarheid nu als kenmerk van het OV netwerk wordt meegegeven, is het mogelijk om verbeteringen in de betrouwbaarheid expliciet mee te nemen als modelvariant. Dit biedt mogelijkheden voor het evalueren van maatregelen die niet zo zeer de snelheid van het OV beïnvloeden, maar wel de betrouwbaarheid. De modelresultaten kunnen bijvoorbeeld input zijn voor een maatschappelijke kosten-baten analyse. Verbeterde betrouwbaarheid heeft immers substantiële maatschappelijke baten tot gevolg. Het driestappenplan is de eerste aanpak én toepassing wereldwijd van het meenemen van onbetrouwbaarheid in verkeersmodellen. We verwachten dan ook het aantal toepassingen snel te kunnen uitbreiden de komende tijd.

1. Inleiding

Betrouwbaarheid van reistijd is zowel voor auto- als voor openbaar vervoer (OV)-verplaatsingen veel onderzocht, bijvoorbeeld door oorzaken, omvang en gevolgen te bepalen. Deze gevolgen worden dan bijvoorbeeld uitgedrukt in de kans van optreden en de omvang in termen van extra reistijd en aantal getroffen reizigers. Voor OV is het echter nog niet gebruikelijk om betrouwbaarheid op te nemen als één van de verklarende variabelen in verkeersmodellen, om de effecten op keuzeprocessen van reizigers (mede) te bepalen (1).

OV staat bekend als een duurzaam vervoermiddel. Mede daarom is er aandacht voor het verbeteren van de kwaliteit van het OV systeem; zowel om meer reizigers aan te trekken als voor het verbeteren van de kostendekkingsgraad. Betrouwbaarheid is volgens (2) een belangrijk te verbeteren aspect in verkeersmodellen, omdat het een grote verklarende waarde heeft voor reizigersgedrag (3). Dat is ook de reden dat infrastructuurprojecten vaak (terecht) er op zijn gericht om de betrouwbaarheid van het OV te verbeteren.

Betrouwbaarheid is gedefinieerd als de zekerheid waarmee reistijd, vertrektijd en aankomsttijd door de gebruiker worden ervaren zoals gepland (4). Zowel reizigers als vervoerders plukken de vruchten van verbeterde betrouwbaarheid: voorspelbare en kortere reistijden voor de reiziger en lagere kosten voor de vervoerder.

Omdat er tot voor kort geen methoden waren om de effecten van onbetrouwbaarheid op reizigers te bepalen in een netwerkcontext, wordt betrouwbaarheid tot nog toe niet meegenomen in verkeersmodellen en in kosten-baten analyses (5). Voor zover bekend wordt tot nu toe in verkeersmodellen het OV 100% op tijd verondersteld, en worden de effecten van onbetrouwbare dienstuitvoering slechts impliciet meegenomen. Dit beperkt de verklarende waarde van modellen en maakt het onmogelijk om maatregelen te evalueren die de betrouwbaarheid van het OV verbeteren, wat betreft reizigerseffecten en (maatschappelijke) kosten en baten.

Het beschikbaar komen van gegevens vanuit boardcomputers, zoals via Exploitatie Beheersing Systemen (EBS) en GOVI, maken het echter mogelijk gedetailleerde data-analyses uit te voeren, om vervolgens verbeteringen door te voeren op alle niveaus van planning uit uitvoering van OV (4,6,7,8,9). Deze data is ook te koppelen aan verkeersmodellen met nieuwe mogelijkheden tot gevolg.

In dit paper wordt een methode gepresenteerd die de effecten van onbetrouwbaarheid kwantificeert en vervolgens integreert in een statisch verkeersmodel. Dit als eerste stap om betrouwbaarheid als volwaardig element op te nemen in verkeersmodellen.

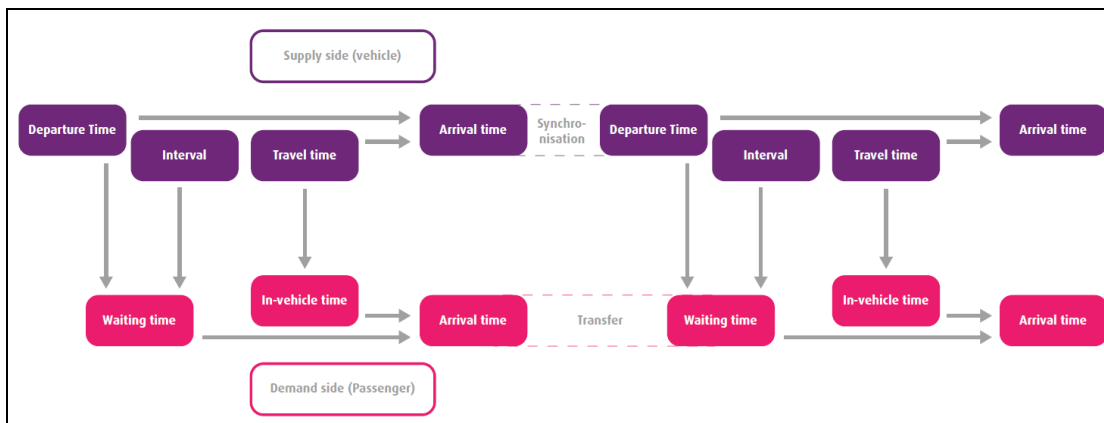
2. Het modelleren van betrouwbaarheid

De mate van onbetrouwbaarheid van OV heeft invloed op verschillende keuzes die reizigers maken, zoals welke modaliteit, welke route en vertrektijdstip. In de literatuur (bijv. 10 en 11) wordt gesteld dat een betrouwbare uitvoering erg belangrijk wordt gevonden door reizigers en dat een te laag niveau reizigers afschrikt om van het OV gebruik te maken.

Om onbetrouwbaarheid te modelleren bestaan twee denkwijzen: de "mean-variance"-aanpak en de "scheduling"-aanpak (3). De eerste kijkt naar het effect van onbetrouwbaarheid op de reistijd en de tweede focust op het (aangepaste) vertrektijdstip van reizigers als gevolg van onbetrouwbaarheid. De aanpak in dit paper borduurt voort op de "mean variance"-aanpak, zoals wordt aanbevolen voor 4-staps verkeersmodellen (12). We gebruiken daarbij de toedelingstechniek Zenith (13).

Onbetrouwbaarheid leidt zowel tot gemiddeld langere, als tot meer onzekere reistijden voor reizigers (4). In figuur 1 is de relatie tussen de reisketen van de reiziger en de bewegingen van het voertuig weergegeven. Tussen de vertrektijdstippen van twee voertuigen, zit volgens de dienstregeling een vaste tussenaankomsttijd, waardoor reizigers hun reis beginnen met een (gemiddelde) wachttijd. Daarna volgt de in-voertuigtijd, waar voertuig en reiziger met de zelfde aspecten te maken hebben. Indien een reiziger overstapt, treedt opnieuw een wachttijd op. Deze wachttijd wordt beïnvloed door de mate waarin de dienstregeling van beide lijnen is gesynchroniseerd, de daadwerkelijke uitvoering van die dienstregeling en van het wachtregime van het voertuig waarnaar wordt overgestapt (14).

De omvang van de vertraging tijdens het wachten bij onbetrouwbare dienstuitvoering, hangt af van het aankomstpatroon van de reizigers. Indien reizigers willekeurig arriveren bij de halte (in een hoogfrequent OV systeem), wordt de wachttijd bepaald door (de omvang en de variatie in) de intervallen tussen voertuigen (15). Indien reizigers (in een laagfrequent OV systeem) hun vertrektijd hebben aangepast aan de dienstregeling, wordt de wachttijd bepaald door de stiptheid (de gerealiseerde dienstuitvoering ten opzichte van de dienstregeling). Vooral bij te vroeg vertrekken heeft dat een groot effect: dan geldt dat de reiziger een volledige tussenaankomsttijd moet wachten.



Figuur 1: Interactie tussen de ketenreis van de reiziger (onder) en bewegingen van het voertuig (boven).

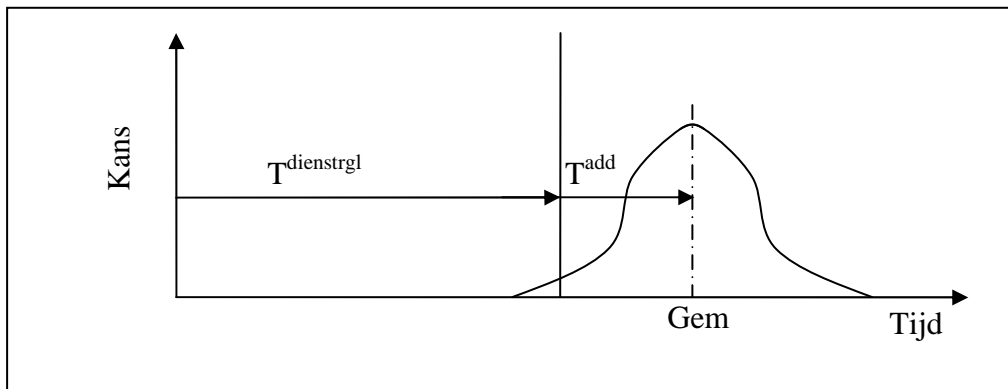
Voor reizigers zijn op geaggregeerd niveau zijn vooral de volgende drie effecten te onderscheiden als gevolg van onbetrouwbaar OV (16, 17, 18):

1. Effect op de reistijd: de in-voertuigtijd of wachttijd wordt langer;
2. Effect op de spreiding van de reistijd en daarmee de onzekerheid van de aankomsttijd;
3. Effect op het comfortniveau tijdens de reis, beïnvloed door de zitplaatskans / drukte in het voertuig.

In deze paper wordt ingegaan op de eerste twee aspecten, welke gerelateerd zijn aan reistijd. Op drukte in het voertuig wordt ingegaan door bijvoorbeeld (19).

Gerealiseerde halteertijden, intervallen en rijtijden zijn beschikbaar in een systeem zoals GOVI, of worden voorspeld door het uitvoeren van een simulatie zoals bijvoorbeeld in (20) wordt geïllustreerd. Door te combineren met telgegevens, bijvoorbeeld vanuit de OV chipkaart, is het mogelijk geaggregeerde reizigerseffecten te bepalen.

Onbetrouwbaarheid leidt tot langere gemiddelde reistijden, doordat de gemiddelde wachttijd oploopt bij onregelmatige dienstuitvoering (hoogfrequent systeem) of bij te vroeg of te laat vertrekken (laagfrequent systeem). Deze gemiddelde extra wachttijd wordt hier als indicator gebruikt voor de onbetrouwbaarheid. Het tweede effect van variatie in de dienstuitvoering is de spreiding van de reistijd. Figuur 2 laat de samenhang zien tussen de gemiddelde extra reistijd (T^{add}), de spreiding van de reistijd en de geplande reistijd in de dienstregeling. Deze laatste bestaat uit geplande wachttijd en geplande in-voertuigtijd. De geplande in-voertuigtijd heeft een directe relatie met de geplande rijtijd van het voertuig, en is dus (door een krappe of juist ruime dienstregeling) direct te beïnvloeden.



Figuur 2: Geplande reistijd ($T^{dienstregl}$), gemiddelde extra reistijd (T^{add}) en spreiding van de reistijd

Tabel 1 bevat vier componenten van onbetrouwbaarheidseffecten op reizigers (4). Echter, indien de dienstuitvoering niet wordt bijgestuurd (bijvoorbeeld door voertuigen stil te laten staan), treedt er geen extra in-voertuigtijd op ten opzichte van de gemiddelde rit. Daarom wordt hier alleen verder ingegaan op de componenten met nummer 1, 2 en 3 in de tabel.

Tabel 1: Effect van onbetrouwbaarheid op reizigers

	Extra reistijd	Spreiding van de reistijd
In-voertuigtijd	<i>Niet gebruikt</i>	2
Wachttijd	1	3

De effecten van onbetrouwbaarheid worden uitgedrukt in drie attributen in de gegeneraliseerde kostenfunctie: extra wachttijd, spreiding in de invoertuigtijd en spreiding in de wachttijd (zie vergelijking 1).

$$GC = \alpha + \beta_1 d + \beta_2 \left(\hat{T} + \hat{W} + \frac{\beta_3}{\beta_2} v \right) + \beta_4 f + \beta_5 N \quad (1)$$

Where:

- GC = Gegeneraliseerde kosten in €
- d = Afstand in km
- \hat{T} = Gemiddelde reistijd in uren
- \hat{W} = $W + T^{add}$; gemiddelde wachttijd in uren

- v = $v_{in-vehicle} + v_{waiting}$; spreiding in invoertuigtijd en wachttijd in uren
 f = tarief in €
 N = Aantal overstappen
 α = Alternatief specifieke constante in €
 β_1 = Coëfficiënt voor afstandswaardering in €/Km
 β_2 = Coëfficiënt voor reistijdwaardering (value of time, VOT) in €/hour
 β_3 = Coëfficiënt voor waardering van spreiding in de reistijd (value of reliability, VOR) in €/hour
 $\frac{\beta_3}{\beta_2}$ = Reliability ratio (RR)
 β_4 = Coëfficiënt voor tariefswaardering (dimensieloos, indien tarief in €, gelijk aan 1)
 β_5 = Coëfficiënt voor waardering van een overstap in €/transfer

Bij het berekenen van de extra wachttijd wordt onderscheid gemaakt tussen hoogfrequentie systemen (waar passagiers willekeurig bij de halte aankomen) en laagfrequente systemen (waar passagiers hun aankomst bij de halte plannen). Voor de hoogfrequente situatie is de stiptheid niet van belang, omdat reizigers toch niet op de dienstregeling letten. De extra wachttijd wordt dan bepaald door de variatiecoëfficiënt

(CoV) van de gerealiseerde tussenaankomsttijden $\tilde{H}_{l,j}^{act}$. De gemiddelde wachttijd per passagier kan met vergelijking 2 worden uitgerekend (15, 21, 22), uitgaande van de volgende aannames:

- Er wordt een homogene periode beschouwd met vergelijkbare frequentie en rijtijden, (zoals bijvoorbeeld de ochtendspitsperiode op alle werkdagen in één maand)
- Het aantal reizigers op een lijn staat vast
- Er hoeven geen passagiers bij de halte achter te blijven vanwege een te vol voertuig

$$E(\tilde{T}_{l,j}^{waiting}) = \frac{E(\tilde{H}_{l,j}^{act})}{2} * (1 + CoV^2(\tilde{H}_{l,j}^{act})) \quad (2)$$

Waarbij:

$\tilde{T}_{l,j}^{waiting}$ = Wachttijd van een reiziger op lijn l en halte j .

$\tilde{H}_{l,j}^{act}$ = Gerealiseerde tussenaankomsttijd van lijn l op halte j .

$CoV(\tilde{H}_{l,j}^{act})$ = Variatiecoëfficiënt van de gerealiseerde tussenaankomsttijden van lijn l op halte j .

In een volledig betrouwbare dienstuitvoering (elk voertuig komt op exact op tijd), is de variatiecoëfficiënt gelijk aan 0 en de gemiddelde wachttijd de helft van de tussenaankomsttijd. In alle andere gevallen kan de gemiddelde extra wachttijd door onbetrouwbare dienstuitvoering worden berekend met vergelijking 3.

$$E(\tilde{T}_{l,j}^{Add,wacht}) = \frac{E(\tilde{H}_{l,j}^{act})}{2} * (CoV^2(\tilde{H}_{l,j}^{act})) \quad (3)$$

Waarin:

$E(\tilde{T}_{l,j}^{Add,wacht})$ = Gemiddelde extra wachttijd per reiziger door onbetrouwbaarheid van lijn l op halte j .

Voor laagfrequente systemen nemen we aan dat reizigers hun aankomst bij de instaphalte plannen aan de hand van de dienstregeling. Dit leidt tot een andere rekenmethode, zie vergelijkingen 4 en 5 (6). Er wordt aangenomen dat een reiziger aankomt op τ_{vroeg} , een veiligheidsmarge voor de geplande vertrektijd. Indien het voertuig vertrekt tussen τ_{vroeg} en een kleine, acceptabele marge na de geplande vertrektijd τ_{laat} , wordt gesteld dat de reiziger geen extra wachttijd ervaart. Empirisch onderzoek naar de waarden van beide parameters is gedaan in (4). Het effect van te vroeg rijden is heel anders dan het effect van te laat rijden, omdat te vroeg rijden (dat wil zeggen meer dan τ_{vroeg} te vroeg) er toe leidt dat de reiziger een volledige tussenaankomsttijd moet

wachten (H_l^{sched} , er vanuit gaande dat het volgende voertuig op tijd vertrekt). Vooral bij lage frequenties kan dit tot grote extra wachttijden leiden. In het geval van te laat rijden (meer dan τ_{laat} te laat) is de extra wachttijd gelijk aan de vertraging van het voertuig ($\tilde{d}_{l,i,j}^{vertrek}$). Dit leidt tot een gemiddelde en een spreiding van de extra wachttijd per halte.

$$\begin{cases} \tilde{T}_{l,i,j}^{Add,waiting} = H_l^{sched} & \text{if } \tilde{d}_{l,i,j}^{departure} \leq -\tau_{early} \\ \tilde{T}_{l,i,j}^{Add,waiting} = 0 & \text{if } -\tau_{early} < \tilde{d}_{l,i,j}^{departure} < \tau_{late} \\ \tilde{T}_{l,i,j}^{Add,waiting} = \tilde{d}_{l,i,j}^{departure} & \text{if } \tilde{d}_{l,i,j}^{departure} \geq \tau_{late} \end{cases} \quad (4)$$

$$E(\tilde{T}_{l,j}^{Add,waiting}) = \frac{\sum_i E(\tilde{T}_{l,i,j}^{Add,waiting})}{n_{l,i}} \quad (5)$$

Waarin:

$E(\tilde{T}_{l,i,j}^{Add,waiting})$ = Gemiddelde extra wachttijd per reiziger door onbetrouwbaarheid van voertuig i op halte j

H_l^{sched} = Interval volgens dienstregeling op lijn l

$\tilde{d}_{l,i,j}^{departure}$ = Vertrektijdafwijking van voertuig i op halte j

τ_{early} = Ondergrens van aankomstinterval van reizigers op vertrekhalte

τ_{late} = Bovengrens van aankomstinterval van reizigers op vertrekhalte

$n_{l,i}$ = Aantal voertuigen i op lijn l

Door nu van de gemiddelde extra reistijd per reiziger, per halte gewogen het gemiddelde te nemen, kan de gemiddelde extra reistijd per reiziger op lijnniveau worden uitgerekend. De weging vindt plaats aan de hand van de verdeling van de reizigers de haltes $\alpha_{l,j}$, zie vergelijking 6. Doordat er fracties worden gebruikt is deze indicator onafhankelijk van het absolute aantal passagiers op de lijn.

$$E(\tilde{T}_l^{Add,wacht}) = \sum_j (\alpha_{l,j} * E(\tilde{T}_{l,j}^{Add,wacht})) \quad \text{met} \quad \sum_j \alpha_{l,j} = 1 \quad (6)$$

waarin:

$\alpha_{l,j}$ = fractie van de reizigers op lijn l die gebruik maken van halte j

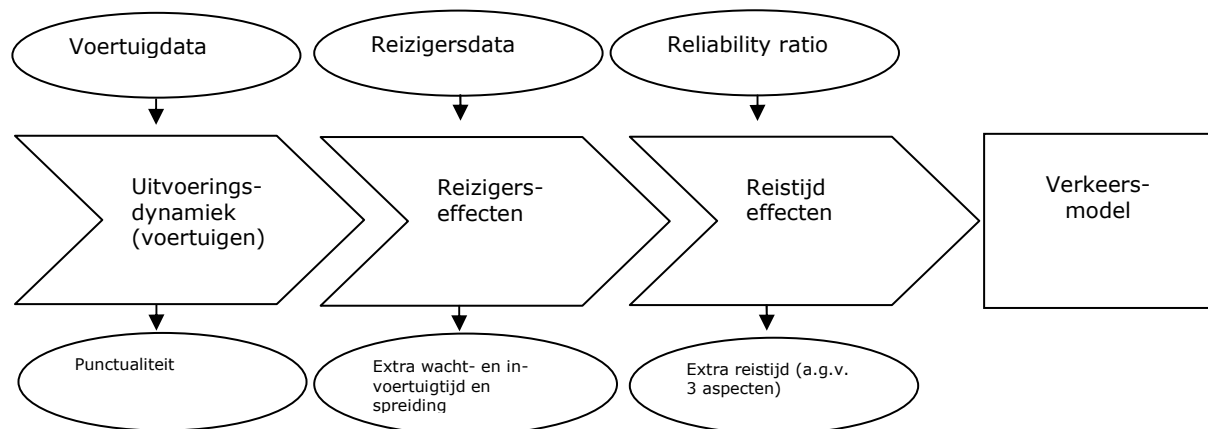
In de volgende paragraaf wordt een aanpak beschreven die uitvoeringsgegevens omzet naar de beschreven aan onbetrouwbaarheid gerelateerde grootheden, zodat het effect van onbetrouwbaarheid in een verkeersmodel geschat kan worden.

3. Het driestappenplan

Ons onderzoek heeft tot doel om onbetrouwbaarheid in het openbaar vervoer mee te nemen in een statisch verkeersmodel. Het volgende driestappenplan wordt voorgesteld om het effect van onbetrouwbaarheid op reizigersgedrag te bepalen (zie figuur 3):

- Stap 1: Analyse van de dienstuitvoering, gebruikmakend van GOVI gegevens (24);
- Stap 2: Op basis daarvan het effect berekenen op reizigers: bepaling van het gemiddelde en spreiding van extra wacht- en in-voertuigtijd voor reizigers;
- Stap 3: Deze effecten uitdrukken in reistijdverlening.

Na deze 3 stappen kunnen de resultaten opgenomen worden in een bestaand statisch verkeersmodel, wat is staat is de effecten op de verkeersvraag en netwerkeffecten te bepalen. De drie stappen worden hieronder verder toegelicht.



Figuur 3: Het driestappenplan

Stap 1 geeft inzicht in de dienstuitvoering door rijtijden en halteertijden te vergelijken met de dienstregeling. Hier wordt bepaald waar te vroeg, op tijd of te laat is gereden, en worden de gerealiseerde intervallen bepaald.

In *Stap 2* worden de effecten op de reistijd bepaald met behulp van de vergelijkingen uit hoofdstuk 2: gemiddelde extra wachttijd, spreiding van de wachttijd en spreiding van de in-voertuigtijd. De berekeningswijze verschilt hierbij voor hoogfrequente of laagfrequente systemen, zoals in hoofdstuk 2 geïllustreerd.

In stap 3 krijgen deze grootheden een plaats in het bestaande verkeersmodel. De gemiddelde extra in-voertuigtijd kan direct worden opgeteld bij de basisreistijd (welke in het verkeersmodel vaak de dienstregeling volgt of bepaald wordt aan de hand van de afstand met behulp van een gemiddelde snelheid), wat leidt tot een gemiddelde in-voertuigtijd. De spreiding van zowel wachttijd als in-voertuigtijd wordt uitgedrukt in een kansverdeling, en vereenvoudigd weergegeven door een standaardafwijking. Deze standaardafwijking wordt vermenigvuldigd met de reliability ratio (RR), zodat deze standaardafwijking wordt omgerekend naar een waarde uitgedrukt in reistijd. In de literatuur loopt de waarde van deze RR uiteen van 0.70 (17) tot 1.40 (23). Uiteindelijk zijn de drie effecten uit tabel 1 dus uitgedrukt in één eenheid: reistijdverlenging.

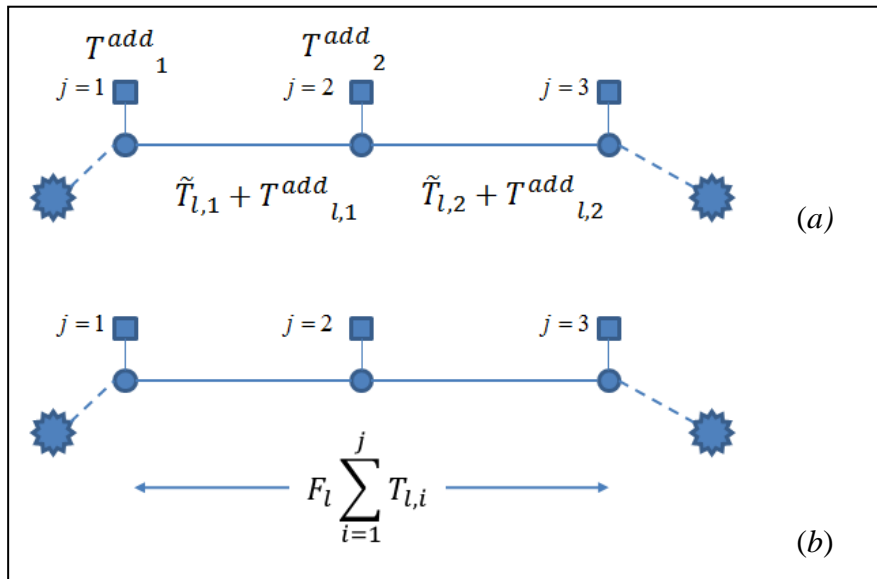
Vervolgens zijn er twee mogelijkheden om bovenstaande data mee te nemen in het verkeersmodel, welke hieronder worden beschreven.

1) Onbetrouwbaarheid op halteniveau.

Voor elk traject tussen twee haltes en voor elke halte wordt onbetrouwbaarheidsdata berekend. De ervaren onbetrouwbaarheid in het voertuig wordt op elk traject opgeslagen. De ervaren onbetrouwbaarheid op de instaphalte wordt in het model opgenomen als extra penalty op die specifieke halte. Daardoor wordt bij het routezoeken deze instap-penalty toegepast op alle passagier die op een specifieke halte instappen, en wordt de onbetrouwbaarheid in het voertuig toegepast op alle passagiers die over een traject reizen. Op een reis op een OV lijn ervaart een passagier dus precies één instap-penalty en meerdere onbetrouwbaarheidseffecten op alle trajecten. Dit wordt geïllustreerd in figuur 4a: indien een reiziger instapt op halte 1 en uitstapt op halte 3, ervaart hij of zij de onbetrouwbaarheid bij het instappen op halte 1, en de onbetrouwbaarheid in het voertuig op 2 trajecten.

2) Onbetrouwbaarheid op lijnniveau.

In dit geval wordt met behulp van vergelijking 6 één gemiddelde waarde voor onbetrouwbaarheid bepaald voor de hele lijn. Deze waarde wordt in de vorm van een onbetrouwbaarheidsfactor F_i toegevoegd aan het netwerk, per OV lijn. In de voorbeeldverplaatsing in figuur 4b betekent dit dat een reiziger die instapt bij halte 1 en uitstapt bij halte 3, een onbetrouwbaarheidswaarde ervaart naar rato van de reistijd tussen halte 1 en halte 3.



Figuur 4: Het effect van onbetrouwbaarheid op halteniveau (a) en op lijnniveau (b)

Nadat de onbetrouwbaarheidsgegevens zijn bepaald en toegevoegd aan het netwerk, wordt met bestaande modeltechnieken het effect bepaald op de reizigersstromen. In de volgende paragraaf wordt een toepassing van het bovenstaande beschreven in de regio Utrecht.

4. Toepassen driestappenplan: Case study Utrecht

Bovenstaande aanpak om onbetrouwbaarheid mee te nemen in verkeersmodellen, is voor het eerst toegepast op het model van de regio Utrecht (VRU-model). In Utrecht spelen verschillende uitdagingen op het moment: budgetten staan onder druk, terwijl er een hogere OV kwaliteit wordt verlangd. Onbetrouwbaarheid is een belangrijk aspect bij het bepalen van de reizigerseffecten van mogelijke maatregelen ter verbetering van de kwaliteit en van de baten van die maatregelen (5).

Het VRU 3.0 model is een multimodaal verkeersmodel (auto, fiets en OV, bestaande uit trein, tram en bus). Het studiegebied van dit model beslaat de 9 gemeentes die samenwerken in het Bestuur Regio Utrecht (BRU). Het invloedsgebied van het model loopt tot in heel Nederland en enkele delen van België en Duitsland. Het bevat 4.400 zones, ongeveer 50.000 links, 5.000 OV-haltes en 900 OV-lijnen.

Om het fenomeen onbetrouwbaarheid van OV succesvol mee te nemen in de verkeersmodellering is het eerder gepresenteerde driestappenplan op de volgende manier toegepast:

In de regio Utrecht is volop data uit GOVI beschikbaar (zie bijv 25) die inzicht geeft in de operationele kwaliteit van het OV. Deze data is gebruikt in stap 1 om inzicht te krijgen in de dynamiek van de uitvoering en de match van de uitvoering met de dienstregeling.

De tweede stap behelst het vertalen van de voertuigeffecten naar de reizigerseffecten. De vergelijkingen 2-5 zijn gebruikt om de extra reistijd en de spreiding daarvan in kaart te brengen (cf. 11 en 25).

Voor stap 3 zijn de waarden van value of time (VOT) en value of reliability (VOR) uit (27) gebruikt, na inflatiecorrectie (zie tabel 2).

Tabel 2 Value of Time (VOT) en Value of Reliability (VOR) in 2011

Reismotief	Value of time (€/uur)	Value of reliability (€/uur)
Zakelijk	10.00	14.00
Woon-werk	17.44	24.42
Overig	6.33	8.86

Zoals te zien in tabel 2 wordt onbetrouwbaarheid 40% hoger gewaardeerd dan reistijd in dit onderzoek, en moet de waarde van de standaarddeviatie dus met een factor 1,4 worden vermenigvuldigd om uitgedrukt te worden in reistijd. Daardoor kunnen alle wachttijdeffecten worden opgeteld tot één waarde, die bestaat uit geplande wachttijd, gemiddelde extra wachttijd en spreiding van de wachttijd.

Op een zelfde manier zijn alle in-voertuigtijdeffecten opgeteld tot één waarde, bestaande uit geplande in-voertuigtijd en spreiding van de in-voertuigtijd. Deze waarden zijn bepaald voor alle haltes en trajecten in het model. Dit heeft het mogelijk gemaakt zowel de benadering te testen die onderscheid maakt per halte, als ook de benadering die gebruik maakt van een gemiddelde onbetrouwbaarheidswaarde per lijn. In het model werken deze gegevens door in de gegeneraliseerde kosten van alle herkomstbestemmingsparen, en daardoor weer op de te verwachte vervoersvraag voor openbaar vervoer.

De hier beschreven benadering is een eerste stap naar het volledig meenemen van onbetrouwbaarheid in OV modellen. In de volgende paragraaf worden de resultaten van beide benaderingen besproken.

5. Resultaten

Om de meerwaarde van deze benadering te illustreren, worden de resultaten van het synthetische model (dus voor kalibratie) met en zonder het meenemen van onbetrouwbaarheid vergeleken, voor een gedeelte van het studiegebied van het VRU, namelijk de corridor naar Nieuwegein. Hiertoe zijn de resultaten van beide benaderingen vergeleken met 24 telwaarden in het gebied, die bekend waren voor de lijnen van het BRU. Hieronder is te zien dat de verklarende waarde van het model licht toeneemt en dus meerwaarde heeft.

Benadering 1: Onbetrouwbaarheidseffecten op halteniveau

Van de 24 telpunten lieten er 15 een verbeterde match zien tussen tellingen en synthetische matrix en 9 een verslechtering. In totaal is het verschil tussen tellingen en synthetische matrix afgenomen met 18% (van 3.300 tot 2.700; op een totaal van 9.300).

Benadering 2: Onbetrouwbaarheidseffecten op lijnniveau

Van de 24 telpunten lieten er 13 een verbeterde match zien tussen tellingen en synthetische matrix en 11 een verslechtering. In totaal is het verschil tussen tellingen en synthetische matrix gelijk gebleven (van 3.300; op een totaal van 9.300).

Beide benaderingen laten een lichte verbetering zien ten opzichte van de telgegevens. Er is een terechte verschuiving vanuit bussen naar de meer betrouwbare tram. Een nadeel van dit kleine studiegebied zijn de randeffecten: van sommige lijnen waren geen gegevens beschikbaar, waardoor deze lijnen relatief aantrekkelijker werden. Bij volledig meenemen van onbetrouwbaarheid in alle lijnen in het model (ook inclusief trein) zal naar verwachting beter aan de telcijfers worden voldaan.

Naast een verbeterde voorspellingskracht van het model biedt de gevolgde aanpak nog meer voordelen. Omdat we geslaagd zijn om de onbetrouwbaarheidseffecten voor de reiziger in het model te krijgen, zijn we ook in staat om de veranderende vervoervraag als gevolg van een verandering in de betrouwbaarheid (bijv. door aanleg van infrastructuur of betere prioriteit bij verkeerslichten) in kaart te brengen. Dit ondersteunt het opstellen van goede business cases voor dergelijke maatregelen, waar voorheen vooral de kosten van bekend waren. Tot slot is de toegevoegde waarde van deze aanpak dat door het berekenen van de reizigerseffecten van onbetrouwbaarheid eenvoudiger een maatschappelijke kosten-baten analyse kan worden uitgevoerd, inclusief de onbetrouwbaarheidseffecten. Iets wat voor kort niet mogelijk was (5).

6. Conclusies

Dit paper beschrijft de mogelijkheden en toegevoegde waarde van het meenemen van onbetrouwbaarheid van OV in verkeersmodellen. Betrouwbaarheid is een belangrijk kwaliteitsaspect van OV, zowel voor reizigers als vervoerders. Verrassend wordt dit aspect niet expliciet meegenomen in verkeersmodellen. Dit beperkt de nauwkeurigheid van dergelijke modellen en daarnaast is het niet mogelijk de effecten van een verandering van de mate van betrouwbaarheid op reizigersstromen gedetailleerd uit te rekenen. Verder zijn de maatschappelijke kosten of baten van een veranderde betrouwbaarheid niet beschikbaar als input voor een maatschappelijke baten analyse.

Om wel te voorzien in deze mogelijkheden zijn ontwikkelingen in verkeersmodellen gewenst. Voor de korte termijn hebben we een driestappenplan ontwikkeld om de betrouwbaarheid expliciet mee te nemen in een verkeersmodel. Naast de theoretische ontwikkeling hebben we deze aanpak succesvol toegepast in het verkeersmodel van de regio Utrecht. Grofweg bestaat de aanpak uit het uitrekenen van de dynamiek van de uitvoering, het vertalen daarvan in reizigerseffecten (zowel verlenging als spreiding van reistijd) en tot slot deze onder een noemer reistijd brengen met behulp van monetaire kentallen voor wat betreft value of time en value of reliability. Verkeersmodellen kunnen vervolgens overweg met de reistijdeffecten, waardoor alle functionaliteiten gebruikt kunnen worden voor prognoses.

De ontwikkeling én toepassing van het driestappenplan in het Utrechtse model is uniek in de wereld en illustreert dat de methode succesvol gebruikt kan worden met de gewenste, nieuwe inzichten en is een opstap naar meer toepassingen.

Acknowledgements

Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met de Bestuur Regio Utrecht (BRU), TU Delft, Goudappel Coffeng en Omnitrans International.

Referenties

- (1) Outwater, M. L. and B. Charlton (2006). The San Francisco Model in Practice. Validation, Testing and Application. In *Conference Proceedings 42. Innovations in Travel Demand Modeling. Summary of a conference*. Transportation Research Board of the National Academies, Austin, Texas, pp. 24-29.
- (2) Petersen, E. en P. Vovsha (2006). Directions for Coordinated Improvement of Travel Surveys and Models. In *Conference Proceedings 42. Innovations in Travel Demand Modeling. Summary of a conference*. Transportation Research Board of the National Academies, Austin, Texas, pp. 85-88.
- (3) Hollander, Y. (2006). Direct versus indirect models for the effects of unreliability. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, Vol. 40, No. 9, pp. 699-711.
- (4) Oort, N. van. (2011) Service Reliability and Urban Public Transport Design, *TRAIL. PhD Thesis Series T2011/2*, Delft, The Netherlands.
http://www.goudappel.nl/media/files/uploads/2011_Proefschrift_Niels_van_Oort.pdf.
- (5) Leusden, R. van & Oort, N van (2011). Excellent OV naar de Uithof: Capaciteits- en betrouwbaarheidsverbetering door tram in Utrecht. Bijdrage aan het colloquium vervoersplanologisch speurwerk (pp. 1-14).
- (6) Oort, N. van, J. W. Boterman and R. van Nes. (2012) The impact of scheduling on service reliability: trip-time determination and holding points in long-headway services. *Public Transport*, Vol. 4, No.1, pp. 39-56.
- (7) Furth, P. G. and T. H. J. Muller (2006). Service Reliability and Hidden Waiting Time: Insights from Automated Vehicle Location Data. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1995, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 79-87.
- (8) Hickman, M. (2004). *Evaluating the Benefits of Bus Automatic Vehicle Location (AVL) Systems*. Chapter 5 in D. Levinson and D. Gillen (eds.), *Assessing the Benefits and Costs of Intelligent Transportation Systems*, Kluwer, Boston.
- (9) Pelletier, M., M. Trepanier and C. Morency (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 19, No. 4, pp. 557-568.
- (10) Bates, J., J. Polak, P. Jones and A. Cook (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation*, Vol. 37, No. 2, pp. 191-229.

- (11) Rietveld, P., F. R. Bruinsma and D. J. van Vuuren (2001). Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands. *Transportation Research A: Policy and Practice*, Vol. 35, No. 6, pp. 539-559.
- (12) Paulley, N., R. Balcombe, R. Mackett, H. Titheridge, J. M. Preston, M. R. Wardman, J. D. Shires and P. White (2006). The demand for public transport: The effects of fares, quality of service, income and car ownership. *Transport Policy*, Vol. 13, No.4, pp. 295-306.
- (13) Brands, T., E. de Romph and T. Veitch (2013). Modelling public transport route choice with multiple access and egress modes. Presented at 41st European Transport Conference, Frankfurt, Germany.
- (14) Lee, A., N. van Oort and R. van Nes (2014). Service Reliability in a network context: impacts of synchronizing schedules in long headway services, *Submitted for Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, Washington, D.C., 2014.
- (15) Welding, P.I. (1957). The instability of a close interval service. *Operational Research Quarterly*, Vol. 8, No.3, pp.133-148.
- (16) Noland, R., K.A. Small (1995). Travel time uncertainty, departure time and the cost of the morning commute. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1493, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 150-158.
- (17) Noland, R. and J. Polak (2002). Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues. *Transport Reviews*, Vol. 22, No. 1, pp. 39-54.
- (18) Oort, N. van and R. van Nes (2009). Regularity analysis for optimizing urban transit network design. *Public transport*, Vol. 1, No. 2, pp. 155-168.
- (19) Hensher, D. A., J. M. Rose and A. Collins (2011). Identifying Commuter Preferences for Existing Modes and a Proposed Metro in Sydney, Australia. *Public Transport: Planning and Operations*, Vol. 3, No. 2, pp. 109-147.
- (20) Kanacilo, E. M. and N. van Oort (2008). Using a rail simulation library to assess impacts of transit network planning on operational quality. In J. Allen, E. Arias, C.A. Brebbia, C.J. Goodman, A.F. Rumsey, G. Sciutto and N. Tomii (Eds.), *Computers in railways XI*, Southampton, UK. *WITpress*, pp. 35-44.
- (21) Osuna, E. E. and G. F. Newell (1972). Control strategies for an idealized public transport system. *Transportation Science*, Vol.6, No. 1, pp.52-72.
- (22) Heap, R. C. and T. H. Thomas (1976). The modelling of platooning tendencies in public transport. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 8, No. 9, pp.360-362.
- (23) SHRP 2 Reliability Project L05 (2013). *Incorporating Reliability Performance Measures into the Transportation Planning Programming Processes*. Transportation

Research Board of the National Academies, Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., pp. 38-40

(24) Oort, N. van, D. Sparing and T. Brands (2013). Optimizing Public Transport Planning and Operations Using Automatic Vehicle Location Data: The Dutch Example. Presented at the 3rd International Conference on Models and Technology for ITS, Dresden, Germany. (in voorbereiding)

(25) Leusden, R van, Oort, N van & Ebben, M (2012). Robuuster, goedkoper en beter openbaar vervoer door gebruik van GOVI-data. Bijdrage aan het colloquium vervoersplanologisch speurwerk (pp. 1-12).

(26) Turnquist, M.A. and L.A. Bowman (1980). The effects of network structure on reliability of transit service. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 14, No. 1-2, pp.79-86.

(27) RAND Europe and AVV (2005). *The value of reliability in transport: Provisional values for The Netherlands based on expert opinion*, Rand Europe, Leiden, The Netherlands, Report TR-240-AVV for AVV.