

Verkeersmodellen verrijken met onbetrouwbaarheid OV vanuit een reizigersperspectief

Niels van Oort

TU Delft / Goudappel Coffeng¹

Robert van Leusden

Bestuur Regio Utrecht

Ties Brands

Goudappel Coffeng/ Universiteit Twente

In verkeersmodellen rijdt al het OV op tijd. 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. 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 (Grenzeloze OV Informatie). 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 OV onbetrouwbaarheid per lijn of traject in het model, is de verklarende waarde van het model toegenomen: het resultaat voor kalibratie komt 18% dichterbij de telcijfers. Doordat OV onbetrouwbaarheid expliciet wordt meegenomen, 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 kan immers substantiële maatschappelijke baten tot gevolg hebben. Het driestappenplan is een eerste aanpak én toepassing van het meenemen van onbetrouwbaarheid van OV in verkeersmodellen. De volgende stap is het

¹ N.vanOort@TUDelft.nl

verfijnen van deze methodiek door bijv. onbetrouwbaarheid als zelfstandig aspect in de nutsfunctie mee te nemen.

Trefwoorden: Openbaar vervoer, verkeersmodellen, betrouwbaarheid, reiziger

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 (Outwater & Charlton 2006).

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 Petersen & Vovsha (2006) een belangrijk te verbeteren aspect in verkeersmodellen, omdat het een grote verklarende waarde heeft voor reizigersgedrag (Hollander 2006). 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 (Van Oort 2011). 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 OV-onbetrouwbaarheid op reizigers te bepalen in een netwerkcontext, wordt betrouwbaarheid tot nog toe niet meegenomen in verkeersmodellen en in kosten-baten analyses (Hollander en Buckmaster 2010, Van Oort 2012). 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. Van Oort (2012) laat echter zien dat betrouwbaarheidsbaten substantieel kunnen zijn in een MKBA (i.e. ca. 2/3 van de totale kosten in de case Uithoflijn in Utrecht).

Het beschikbaar komen van gegevens vanuit boardcomputers, zoals via Exploitatie Beheersing Systemen (EBS) en GOVI (Grenzeloze OV Informatie, zie Van Oort et al. (2013)), maken het echter mogelijk gedetailleerde data-analyses uit te voeren, om vervolgens verbeteringen door te voeren op alle niveaus van planning tot uitvoering van OV (Van Oort et al. 2012, Furth en Muller 2006,

Hickman 2004, Pelletier et al. 2011). 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 in het OV kwantificeert en vervolgens integreert in een statisch verkeersmodel. Dit als eerste stap om betrouwbaarheid als volwaardig element op te nemen in verkeersmodellen.

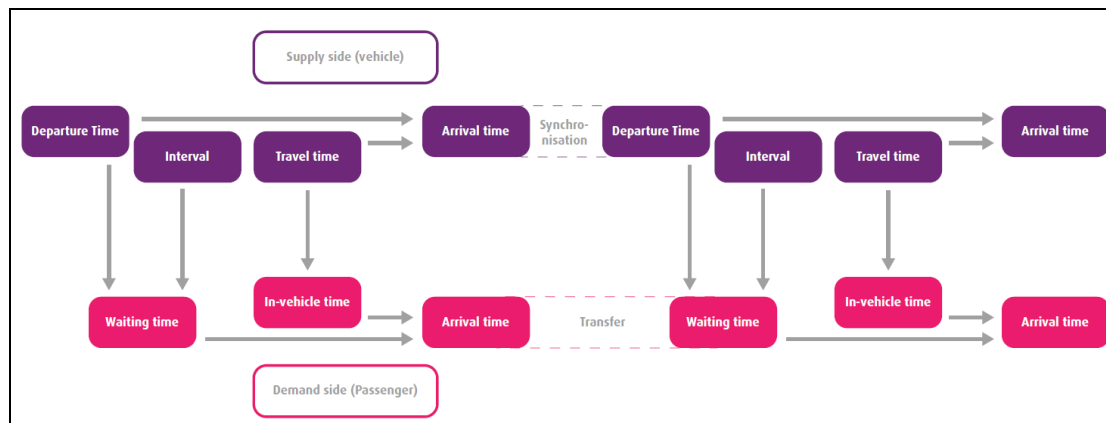
2. Het modelleren van betrouwbaarheid

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. Bates et al. 2001 en Rietveld et al. 2011) 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 (Hollander 2006). De eerste kijkt naar het effect van onbetrouwbaarheid op de reistijd(spreiding) 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 (Paulley 2006). We gebruiken daarbij de toedelingstechniek Zenith (Brands et al. 2013).

Onbetrouwbaarheid in het OV leidt zowel tot gemiddeld langere, als tot meer onzekere reistijden voor reizigers (Van Oort 2011). 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-voertuig-tijd, 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 (Lee et al. 2014).

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 (Welding 1957). 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.



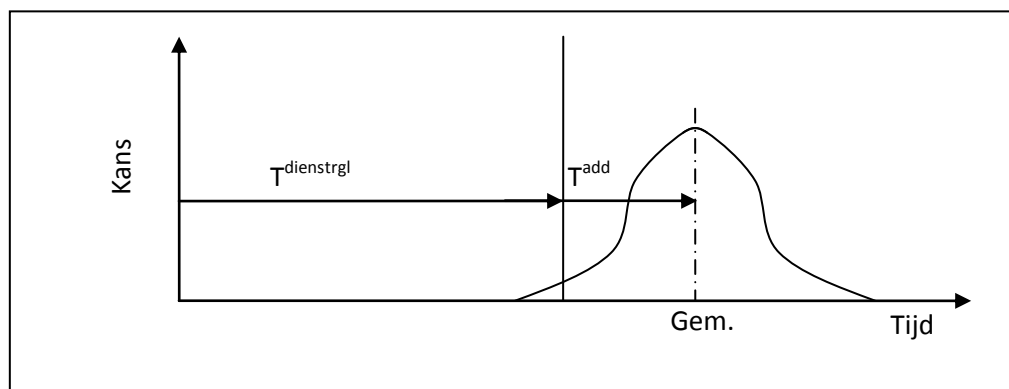
Afbeelding 1. Interactie tussen de ketenreis van de reiziger (onder) en bewegingen van het voertuig (boven) (Van Oort 2012).

Voor reizigers zijn op geaggregeerd niveau zijn vooral de volgende drie effecten te onderscheiden als gevolg van onbetrouwbaar OV (Noland & Small 1995, Noland & Polak 2002, Van Oort & Van Nes 2009):

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 (Hensher et al. 2011).

Gerealiseerde halteertijden, intervallen en rijtijden zijn beschikbaar in een systeem zoals GOVI, of worden voorspeld door het uitvoeren van een simulatie (zoals in Kanacilo en Van Oort 2008) 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 (Tadd), 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.



Afbeelding 2. Geplande reistijd ($T^{\text{dienstgrl}}$), gemiddelde extra reistijd (T^{add}) en spreiding van de reistijd

Tabel 1 bevat vier componenten van onbetrouwbaarheidseffecten op reizigers (Van Oort et al. 2012). Echter, er wordt er hier van uitgegaan dat de dienstuitvoering niet wordt bijgestuurd (bijvoorbeeld door voertuigen stil te laten staan), waardoor er geen extra invoertuigtijd optreedt ten opzichte van de gemiddelde rit. Daarom wordt hier alleen verder ingegaan op de componenten met nummer 1, 2 en 3 in de tabel. In Van Oort et al. (2012) wordt uitgebreider ingegaan op de extra in-voertuig als gevolg van bijsturing in de dienstuitvoering (i.e. holding).

Tabel 1. Effect van onbetrouwbaarheid op reizigers

	Extra reistijd	Spreiding van de reistijd
In-voertuigtijd	Niet gebruikt	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 voor een voorbeeld van een dergelijke functie). In deze functie worden meerdere manieren gefaciliteerd om de reiskosten uit te drukken, direct via het tarief of indirect via de afstand. De weerstand als gevolg van de tijd die een reis kost, los van financiële aspecten, kan via de reis- en wachttijd meegenomen worden.

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

Waarin:

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 €/uur

β_3 = Coëfficiënt voor waardering van spreiding in de reistijd (value of reliability, VOR) in €/uur

$\frac{\beta_3}{\beta_2}$ = 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; de spreiding ten opzichte van de verwachtingswaarde)

van de gerealiseerde tussenaankomsttijden $\tilde{H}_{l,j}^{act}$. De gemiddelde wachttijd per passagier kan met vergelijking 2 worden uitgerekend (Welding 1957, Osuna & Newell 1972, Heap & Thomas 1976), 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:

$\tilde{T}_{l,j}^{waiting}$ = Wachtijd 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 wachtijd de helft van de tussenaankomsttijd. In alle andere gevallen kan de gemiddelde extra wachtijd 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 wachtijd 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 (Van Oort et al. 2012). Er wordt aangenomen dat een reiziger aankomt ten opzichte van de geplande vertrektijd met een verschil van τ_{early} , een veiligheidsmarge voor de geplande vertrektijd. Indien het voertuig vertrekt tussen τ_{early} en een kleine, acceptabele marge na de geplande vertrektijd τ_{late} , wordt gesteld dat de reiziger geen extra wachtijd ervaart. Empirisch onderzoek naar de waarden van beide parameters is gedaan in (Van Oort 2011). 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_{early} te vroeg) er toe leidt dat de reiziger een volledige tussenaankomsttijd moet wachten (H_i^{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_{late} te laat) is de extra wachtijd gelijk aan de vertraging van het voertuig ($\tilde{d}_{l,i,j}^{vertrek}$). Dit leidt tot een gemiddelde en een spreiding van de extra wachtijd 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 over 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

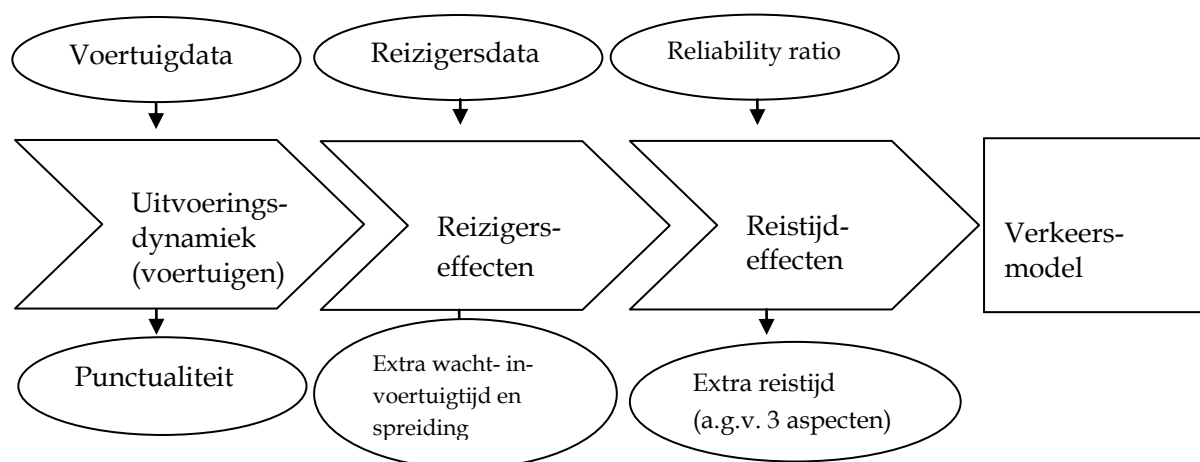
In de volgende paragraaf wordt een aanpak beschreven die uitvoeringsgegevens omzet naar de beschreven aan onbetrouwbaarheid gerelateerde grootheden, zodat het effect van onbetrouwbaarheid in een verkeersmodel geschat kan worden.

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 (Van Oort et al. 2013);
- 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 reistijdverlenging.

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



Afbeelding 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 (bepaling van o.a. $D_{l,i,j}$, $E(H_{l,i,j})$ en $CoV(H_{l,i,j})$).

In Stap 2 worden de effecten op de reistijd bepaald met behulp van de vergelijkingen uit hoofdstuk 2: gemiddelde extra wachttijd (vergelijking 3 of vergelijkingen 4 en 5), spreiding van de wachttijd en spreiding van de in-voertuigtijd. De berekeningswijze verschilt hierbij voor hoogfrequente (vergelijking 3) of laagfrequente (vergelijkingen 4 en 5) systemen, zoals in hoofdstuk 2 geïllustreerd.

In stap 3 worden deze grootheden voorbereid voor 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 voor OV uiteen van 0,70 (Noland & Polak 2002) tot 1,40 (SHRP 2013). Uiteindelijk zijn de drie effecten uit tabel 1 dus uitgedrukt in één eenheid: reistijdverlenging.

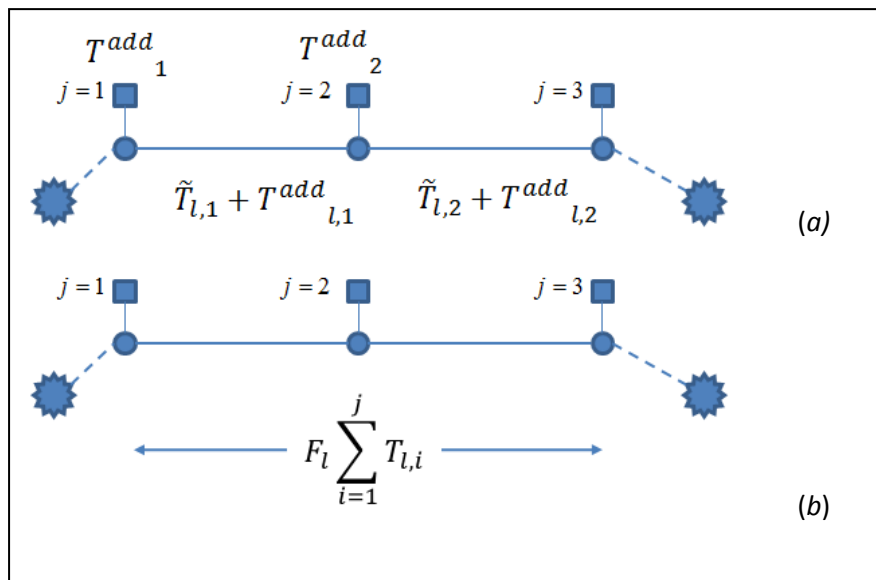
Vervolgens zijn er twee mogelijkheden om bovenstaande data mee te nemen in het verkeersmodel, welke hieronder worden beschreven.

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 reizigers 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_1 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.



Afbeelding 4: Het effect van onbetrouwbaarheid op halteniveau (a) en op lijnniveau (b) ten opzichte van de gewone reistijd (bijv. $\tilde{T}_{l,1}$) (met in methode a een onbetrouwbaarheidstoetslag op de halte (bijv. T_1^{Add}) en op het traject (bijv. $T_{l,1}^{Add}$))

Methode 1) is gedetailleerder, omdat onderscheid wordt gemaakt tussen vertragingen per haltepaar: op het ene haltepaar kan een groot verkeersplein liggen, waardoor de rijtijd zeer onbetrouwbaar is, terwijl op het andere haltepaar een vrijliggende busbaan ligt met constante rijtijd. In dat geval wordt bij methode 2 het effect gemiddeld over deze trajecten, wat voor reizigers die slechts een deel van het traject rijden, een onnauwkeurigere inschatting van de onbetrouwbaarheid betekent. Voordeel van methode 2) is dat deze eenvoudiger is en met minder data kan worden gebruikt, bijvoorbeeld door het gebruik van kentallen of expert judgements. 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 (Van Oort 2013).

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, 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. Van Oort & Van Nes 2009).

Voor stap 3 zijn de waarden van value of time (VOT) en value of reliability (VOR) uit (RAND Europe & AVV 2005) 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% zwaarder gewaardeerd dan reistijd in dit onderzoek, en kan de waarde van de standaarddeviatie dus met een factor 1,4 worden vermenigvuldigd te kunnen vergelijken met reistijd. Daardoor kunnen alle wachttijdeffecten worden opgeteld tot één waarde, die bestaat uit geplande wachttijd, gemiddelde extra wachttijd en spreiding van de wachttijd. Inmiddels is er door het KiM een verfijningsslag gemaakt en beschikbaar gesteld voor de values of reliability (Significance et al. 2013).

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 herkomst-bestemmingsparen, en daardoor weer op de te verwachte vervoersvraag voor openbaar vervoer. In de volgende paragraaf worden de resultaten van beide benaderingen besproken.

De hier beschreven benadering is een eerste stap naar het volledig meenemen van onbetrouwbaarheid in OV modellen. De volgende stap in ons onderzoek is het explicieter

meenemen van onbetrouwbaarheid in verkeersmodellen door de vertaling van onbetrouwbaarheid naar reistijd, zoals in het driestappenplan, te vervangen door een uitbreiding van de kostenfunctie met onbetrouwbaarheid en deze nieuwe functie te schatten.

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 van Utrecht 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 reizigers per werkdag; 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 (3.300 reizigers per werkdag; op een totaal van 9.300).

Beide benaderingen laten een lichte verbetering zien ten opzichte van de telgegevens (voor wat betreft reizigersaantallen en/of aantal verbeterde telpunten). 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 er eenvoudiger een maatschappelijke kosten-baten analyse kan worden uitgevoerd, inclusief de onbetrouwbaarheidseffecten. Iets wat voor kort niet mogelijk was (Van Oort 2012).

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 OV-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 reistijdefecten, waardoor alle functionaliteiten gebruikt kunnen worden voor prognoses.

De ontwikkeling én toepassing van het driestappenplan in het Utrechtse model is naar ons weten uniek en illustreert dat de methode succesvol gebruikt kan worden met de gewenste, nieuwe inzichten en is een opstap naar meer toepassingen, bijvoorbeeld in andere regionale of landelijke modellen. Methodologisch is de volgende stap van ons onderzoek het explicietere meenemen van onbetrouwbaarheid in verkeersmodellen door de vertaling van onbetrouwbaarheid naar reistijd, zoals in het driestappenplan, te vervangen door een uitbreiding van de kostenfunctie met onbetrouwbaarheid en deze nieuwe functie te schatten.

Acknowledgements

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

Referenties

Bates, J., J. Polak, P. Jones and A. Cook (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation*, 37(2), 191-229.

Brands, T., E. de Romph and T. Veitch (2013). Modelling public transport route choice with multiple access and egress modes. *Proceedings of the 41st European Transport Conference*, Frankfurt, Germany.

Furth, P. G. and T. H. J. Muller (2006). Service Reliability and Hidden Waiting Time: Insights from Automated Vehicle Location Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1995, 79-87.

Heap, R. C. and T. H. Thomas (1976). The modelling of platooning tendencies in public transport. *Traffic Engineering and Control*, 8(9), 360-362.

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*, 3(2), 109-147.

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.

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

Hollander, Y. and Buckmaster, M. (2010) The reliability component in project evaluation. Paper presented at the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.

Kanacilo, E. M. and N. van Oort (2008). Using a rail simulation library to assess impacts of transit network planning on operational quality. *Proceedings of Computers in railways XI (WITpress)*, Southampton, UK, 35-44.

Lee, A., N. van Oort and R. van Nes (2014). Service Reliability in a network context: impacts of synchronizing schedules in long headway services, *Proceedings of the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.

Noland, R. and J. Polak (2002). Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues. *Transport Reviews*, 22(1), 39-54.

Noland, R., K.A. Small (1995). Travel time uncertainty, departure time and the cost of the morning commute. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1493, 150-158.

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.

Oort, N. van (2012). Quantifying benefits of enhanced service reliability in public transport, *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Systems for Public Transport (CASPT12)*, Santiago, Chile.

Oort, N. van and R. van Nes (2009). Regularity analysis for optimizing urban transit network design. *Public transport*, 1(2), 155-168.

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

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*, 4(1), 39-56.

Osuna, E. E. and G. F. Newell (1972). Control strategies for an idealized public transport system. *Transportation Science*, 6(1), 52-72.

Outwater, M. L. and B. Charlton (2006). The San Francisco Model in Practice: Validation, Testing and Application. *Proceedings of the 42nd Conference for Innovations in Travel Demand Modeling*. Transportation Research Board of the National Academies, Austin, Texas, 24-29.

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*, 13(4), 295-306.

Pelletier, M., M. Trepanier and C. Morency (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 557-568.

Petersen, E. en P. Vovsha (2006). Directions for Coordinated Improvement of Travel Surveys and Models. *Proceedings of the 42nd Conference for Innovations in Travel Demand Modeling*. Transportation Research Board of the National Academies, Austin, Texas, 85-88.

RAND Europe en 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.

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*, 35(6), 539-559.

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

Significance, VU University, John Bates Services, TNO, NEA, TNS NIPO en PanelClix (2013) Values of time and reliability in passenger and freight transport in The Netherlands, Report for the Ministry of Infrastructure and the Environment, Significance, The Hague.

Welding, P.I. (1957). The instability of a close interval service. *Operational Research Quarterly*, 8(3), 133-148.