

# De potentie van sociaal reisadvies als sturingsmaatregel in het openbaar vervoer

**Oskar A.L. Eikenbroek**  
University of Twente<sup>1</sup>

**Xiaojie Luan**  
Beijing Jiaotong University, ETH Zürich<sup>2</sup>

**Francesco Corman**  
ETH Zürich<sup>3</sup>

**Eric C. van Berkum**  
University of Twente<sup>4</sup>

---

De COVID-19 pandemie en de bijbehorende reisbeperkende maatregelen gedurende lockdowns hebben voor een forse daling in het aantal openbaar vervoer (OV) reizigers gezorgd. Nog altijd zijn reizigersaantallen lager dan voor de pandemie. Daarentegen zijn met name in de spits enkele trajecten zwaarbelast. Waar OV-bedrijven veelal aanbod gestuurde interventies doen om de kwaliteit van te verbeteren, zou daarnaast ook de bestaande capaciteit in het OV beter benut kunnen worden door de vraag efficiënter te verdelen. Dit artikel verkent de potentie van sociaal reisadvies als sturingsmaatregel in het OV, waarbij een groep reizigers wordt gevraagd hun route, modaliteit en of vertrektijd aan te passen om maatschappelijke of netwerk-brede doelstellingen te halen. Dit paper presenteert een model raamwerk in de vorm van een optimaliseringsprobleem voor het bepalen van systeem-optimaal maar gepersonaliseerd reisadvies. Het raamwerk anticipeert op netwerk-brede terugkoppel-effecten in termen van drukte als gevolg van het veranderende keuzegedrag in reactie op het advies. Een numerieke casestudy in het OV-stelsel van Regio Twente verkent de effecten en de praktische haalbaarheid van de sturingsmaatregel. Resultaten laten zien dat er een duidelijke wisselwerking is tussen netwerkefficiëntie en de gelijkheid in gegeneraliseerde reiskosten, maar dat slechts een klein deel van de reizigers een omweg dient te nemen om een substantiële verbetering in efficiëntie te bewerkstelligen.

---

*Trefwoorden:* capaciteitsmanagement, openbaar vervoer, reiziger, reisadvies, sturingsmaatregel.

---

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, University of Twente & Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich, E: [o.a.l.eikenbroek@utwente.nl](mailto:o.a.l.eikenbroek@utwente.nl)

<sup>2</sup> School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, China, voorheen Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich, Switzerland

<sup>3</sup> Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich, Switzerland

<sup>4</sup> Department of Civil Engineering, University of Twente

## 1. Inleiding

Het openbaar vervoer (OV) speelt een belangrijke rol in het bereikbaar houden van steden en in de transitie naar een duurzamer transportsysteem. Het gebruik van OV wordt dan ook veelal door overheden en werkgevers gestimuleerd. Het uitbreken van de COVID-19 pandemie heeft echter voor een sterke daling in passagiersaantallen gezorgd, met tot wel 90% minder reizigers gedurende lockdowns met reisbeperkende maatregelen (Gkiotsalitis & Cats, 2021). Ondanks dat in Nederland de COVID-gerelateerde maatregelen op het moment van schrijven niet langer van kracht zijn, is het aantal OV-reizigers (nog) niet terug op het oude (*pre-COVID*) niveau. Dit is onder meer te verklaren door een toename in telewerken en structurele veranderingen in vervoerswijze (van Hagen et al., 2021). Waar over de gehele breedte de vraag voor OV is afgenomen, is desalniettemin met name het treinvervoer recent frequent onderwerp van discussie door de overvolle voertuigen op enkele trajecten (o.a. Peene, 2022; Rover 2022). De afname in het totaal aantal reizigers gecombineerd met de negatieve ervaringen nu kan desastreuze gevolgen hebben voor de duurzaamheid- en bereikbaarheidsdoelstellingen op de langere termijn. Immers, een vicieuze cirkel dreigt waarbij een afname in de vraag en dus inkomsten tot een inkrimping van de dienstregeling kan zorgen, wat weer een daling in reizigersaantallen teweeg kan brengen. Er ligt dus een uitdaging voor zowel OV-autoriteiten als vervoerders om de kwaliteit van het stelsel te verbeteren, en het OV toegankelijk te houden op de (middel)lange termijn.

In Nederland zijn OV-stelsels vaak geregeld middels een starre dienstregeling die regulier – bijvoorbeeld jaarlijks – wordt aangepast. Om zo goed mogelijk aan de vraag te kunnen voldoen, met inachtneming van de kosten en de beperkte capaciteit van infrastructuur, materieel en personeel, wordt getracht een robuuste dienstregeling te ontwerpen waarbij een minimale *level of service* kan worden gegarandeerd. Tactische beslissingen over het aanbod zoals de dienstregeling worden veelal voor de middellange termijn genomen, gebaseerd op historische data en of ruwe of modelgebaseerde voorspellingen over de toekomstige vraag. Normaliter wordt getracht de kwaliteit van OV te verbeteren door middel van (management)interventies in het aanbod. Deze interventies zijn echter vaak weinig flexibel en reageren relatief traag op veranderende omstandigheden of nieuwe informatie. Veelal staat een concessieovereenkomst of een OV-autoriteit tussentijdse veranderingen ook niet toe, onder meer om de regulariteit en daarmee de communiceerbaarheid van de dienstregeling te kunnen garanderen.

Naast de interventies in het aanbod kunnen ook vraaggestuurde maatregelen worden genomen waarbij de OV-vraag *binnen* het systeem wordt herverdeeld om de bestaande capaciteit als volgt beter te benutten. Een OV-reiziger maakt veelal egoïstische keuzes op basis van reistijd, maar ook comfort en veiligheid speelt een rol in het keuzegedrag. Als gevolg van de individuele keuzes wordt het comfort, de veiligheid en de reistijd van andere reizigers beïnvloed. Waar de individuele reiziger geïnteresseerd is in de eigen reisweerstand, zijn OV-aanbieders en overheden en autoriteiten met name geïnteresseerd in het collectief. Het doel van *sociaal reisadvies* als sturingsmaatregel in het OV is om gemiddeld gezien de reistijd, het comfort en de veiligheid van *alle* reizigers (op netwerkniveau) te verbeteren door een kleine groep reizigers te verleiden een alternatief vervoermiddel, lijn en of vertrektijd te kiezen. Zeker in de huidige context, waarbij de capaciteit van het OV is afgenomen door minder inzet van materieel (veroorzaakt door personeelstekort) en een naar aanleiding van COVID-19 gewijzigde perceptie van reizigers op drukte, kan sociaal reisadvies een effectieve maatregel zijn om de capaciteit beter te benutten.

Sociaal reisadvies is een vorm van *travel demand management*, waarbij vaak wordt getracht de vraag gelijkjer te verdelen over de capaciteit of de spits 'af te vlakken'. Een ander voorbeeld van een

vraaggestuurde maatregel is het aanpassen van de colletijden om zo studenten buiten de spits te laten reizen (o.a. Daniels & Mulley, 2013). Dergelijke maatregelen kunnen zowel los als in aanvulling op aanbod gestuurde interventies worden ingezet. Duidelijke voordelen van sturingsmaatregelen op operationeel niveau, zoals het sociaal reisadvies, zijn de hoge mate van flexibiliteit, de relatief lage kosten in vergelijking met conventionele sturingsmethoden, en er kan zowel dynamisch als gepersonaliseerd advies worden gegeven, in het bijzonder effectief in het geval van incidenten of na verstoringen. Dit kan betekenen dat een reiziger wordt gevraagd af te wijken van zijn gebruikelijke keuze, en de effectiviteit van sociaal reisadvies in het OV hangt dus in hoge mate af van de bereidheid van reizigers om (incidenteel) dit advies op te volgen. Aangezien het individuele belang kan conflicteren met het collectieve belang is het mogelijk dat de reiziger wordt geadviseerd om een individueel *sub-optimale* keuze te maken die bevorderlijk is voor het systeem als geheel, bijvoorbeeld door eerder of later te vertrekken. Hierbij dient er expliciet rekening te worden gehouden met het opvolgedrag van individuen. Het is immers aannemelijk dat advies enkel wordt opgevolgd als het verschil in reisweerstand binnen de perken blijft, zowel in vergelijking met de gebruikelijke keuze als met het beste alternatief. Aangezien de reisweerstand van een alternatief afhangt van de keuzes van alle reizigers, inclusief diegenen die geen advies ontvangen maar wel hun keuze her-evalueren in reactie op het opvolgedrag van anderen, moet er *a priori* worden geanticipeerd op deze terugkoppelingen (*feedback*) om slechte ervaringen te voorkomen. Anders zou de sturingsmaatregel zijn effectiviteit op de lange termijn kunnen verliezen.

Dit artikel presenteert een model raamwerk voor de inzet van sociaal reisadvies als sturingsmaatregel in het OV. Dit paper is gebaseerd op een meer methodologische paper (Luan et al., 2023). De genoemde paper introduceert een optimaliseringsprobleem voor het bepalen van een systeem-optimaal maar gepersonaliseerd reisadvies en anticipeert op het keuze- en opvolgedrag van individuele reizigers. Door middel van een toedelingsmodel houdt het raamwerk aan de voorkant rekening met de netwerk-brede terugkoppelleffecten en zorgt er daarmee voor dat de inzet van de sturingsmaatregel het gewenste effect sorteert. Een centraal-gecoördineerd informatiesysteem kan deze strategie vervolgens gebruiken en enkele reizigers verleiden om een suboptimale route (in termen van individueel nut) te kiezen en daarmee op netwerkniveau de kwaliteit van OV te verbeteren. De eerdergenoemde paper richt zich voornamelijk op de methodologische uitdagingen. In dit artikel presenteren we een numerieke casestudy in het OV-stelsel van Regio Twente en presenteren we een eerste verkenning van de potentie van de sturingsmaatregel in een Nederlandse context. De resultaten laten zien dat sociaal reisadvies zelfs op lijnniveau kan worden ingezet om de efficiëntie te verbeteren, en de evaluatie van de casestudy richt zich met name op de drempels en daarmee dus de haalbaarheid voor een eventuele inzet in de praktijk.

Hoofdstuk 2 beschrijft de essentiële componenten van sociaal reisadvies. Het bijbehorende model raamwerk wordt geïntroduceerd in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt vervolgens de resultaten gepresenteerd van de numerieke casestudy, en de conclusies, discussie en suggesties voor verder onderzoek volgen in hoofdstuk 5.

## 2. Sociaal reisadvies en terugkoppelleffecten

De potentie en uitdagingen van sociaal reisadvies als sturingsmaatregel in het OV wordt geïllustreerd aan de hand van speltheorie, welbekend voor het op strategisch niveau ontwerpen of aanpassen van verkeersnetwerken (*network design problem*), waarbij er wordt geanticipeerd op de

effecten van de ontwerpkeuzes op de toedeling (zie, onder andere, Josefsson & Patriksson, 2007; Sheffi, 1985). We nemen aan dat de weerstand van een reis (combinatie van vervoermiddel, lijn en vertrektijdkeuze) wordt uitgedrukt in gegeneraliseerde reiskosten (of *disnut*). In dit geval zijn de gegeneraliseerde reiskosten afhankelijk van de reistijd en de bezettingsgraden, en daardoor dus afhankelijk van het keuzegedrag van alle reizigers. We nemen aan dat reizigers hun gegeneraliseerde reiskosten willen minimaliseren, resulterend in een gebruikersevenwicht waarin individuele reizigers geen prikkel hebben om eenzijdig hun reis aan te passen.

Het gebruikersevenwicht komt vaak niet overeen met het *systeem optimum*, de meest efficiënte toedeling op netwerkniveau in termen van totale of gemiddelde gegeneraliseerde reiskosten. Dit systeem optimum is echter slechts een theoretische staat dat enkel gebruikt wordt om andere toedelingen tegen af te zetten, onder meer aan de hand van de *Price of Anarchy* dat de kosten van egoïstisch keuzegedrag uitdrukt (Roughgarden, 2005). Het sociale optimum vraagt een significant offer van een groep reizigers, zowel in vergelijking met de snelste of kortste route (de *intra-state* verschillen) als in vergelijking met de gegeneraliseerde reiskosten in het gebruikersevenwicht (de *inter-state* verschillen) (zie onder meer Van Essen et al., 2019; Jahn et al., 2015). Over het algemeen kan er dus geconcludeerd worden dat er een wisselwerking is tussen eerlijkheid en netwerkefficiëntie.

Het is hoogst onwaarschijnlijk dat reizigers een advies opvolgen als een gesuggereerde reis veel slechter is dan de beste of de huidige keuze. Gedurende het ontwerpproces van de sturingsmaatregel dient er dus expliciet rekening te worden gehouden met het opvolgedrag van reizigers. Tegelijkertijd is er bewijs dat een groep reizigers *wel* bereid is sociaal advies op te volgen zolang het offer maar redelijk of acceptabel is (Simon, 1997; Szep et al., 2023; Vreeswijk, 2015): het kan worden aangenomen dat reizigers onverschillig of ongevoelig zijn voor kleine verschillen in de reisweerstand. Problematisch is echter dat de reisweerstand in hoge mate afhangt van de keuzes van *alle* reizigers. In de context van sociaal reisadvies: niet alleen reizigers die advies ontvangen passen eventueel hun reis aan, maar ook de reizigers die geen advies ontvangen her-evalueren hun keuze in reactie op de veranderingen in de gegeneraliseerde reiskosten (Eikenbroek et al., 2022). Het aan de voorkant negeren van deze effecten van feedback heeft als risico dat er een overreactie kan ontstaan (in een extreem geval: het verschuiven in plaats van het afvlakken van de spits) (Ben-Akiva et al., 1991) of dat het advies genegeerd wordt, en dat de geprojecteerde doelen dus niet behaald worden. Resumé: om de effectiviteit van sociaal reisadvies als sturingsmaatregel in het OV te maximaliseren, is er behoefte aan een centraal-georganiseerde strategie waarbij gepersonaliseerd reisadvies wordt bepaald terwijl er rekening wordt gehouden met terugkoppel-effecten. Voor het modelleren van deze effecten is een toedelingsmodel noodzakelijk.

Een *Stackelberg* spel modelleert het mechanisme van sociaal reisadvies in het OV waarbij er geanticipeerd wordt op de reacties van reizigers. De leider van het spel maakt eerst een keuze door het reisadvies te bepalen, en de volger (de reizigers) reageert door de toedeling te bepalen op basis van de gedragskeuzes in reactie op het advies. We veronderstellen dat een groep *sociale reizigers* bereid is het advies op te volgen als de gerealiseerde (*a posteriori*) omweg (ten opzichte van het beste alternatief in termen van gegeneraliseerde kosten) begrensd is. Er is ook een groep egoïstische reizigers die het advies niet opvolgt of geen advies ontvangt. Ook deze laatste groep evalueert op de langere termijn hun keuzes aangezien de reiservaring wordt beïnvloed door de keuze van alle reizigers. Zoals gezegd wordt het effect van drukte op het nut (utiliteit) uitgedrukt met een gegeneraliseerde kostenfunctie, en de leider gebruikt een OV-toedeling om te anticiperen op de gedragsreactie en daarmee het optimale advies te bepalen.

Op het gebied van (weg)verkeersmanagement zijn er in de literatuur meerdere strategieën ontwikkeld om reizigers te verleiden sociaal gewenste routes te gebruiken (o.a., Angelelli et al., 2021; Eikenbroek et al., 2022; Jahn et al., 2005). Veel strategieën zijn reactief van aard, d.w.z., houden niet expliciet rekening met de terugkoppel-effecten, en zijn ontwikkeld in de context van autoverkeer met een strategische verkeerstoedeling waarbij de capaciteit geen expliciete rol speelt. In de praktijk zijn er verschillende pilotprojecten uitgevoerd om reizigers te verleiden om sociaal reisadvies op te volgen, onder meer met 'softe' of financiële prikkels, zoals het Spitsmijden project (Ettema et al., 2010). Ook in het OV zijn er vergelijkbare initiatieven (geweest) om de belasting op enkele trajecten en de 'hyperspits' te verlichten (Rijkswaterstaat, z.d.). Ondanks de positieve effecten is het gecompliceerd initiële gedragsveranderingen te bestendigen (Ettema et al. 2010) en er is vaak maar beperkt aandacht voor de effecten van terugkoppelingen. Dit paper introduceert een model raamwerk dat expliciet rekening houdt met deze effecten, en bestudeert de potentie van sociaal reisadvies als sturingsmaatregel in een Nederlandse context middels een casestudy.

Het inzetten van sociaal reisadvies (*social routing* of *network load balancing*) als maatregel heeft als doel de vraag efficiënter over het netwerk te verdelen en tegelijkertijd rekening te houden met de voorwaarden van de reizigers. Dat wil zeggen dat deelnemers bereid zijn om een sociale keuze te maken als dit gevraagd of geadviseerd wordt - of ze ervaren het niet als een slechter alternatief ten opzichte van hun gebruikelijke keuze (Djavadian et al., 2014; Vreeswijk et al., 2015). Hierdoor is in tegenstelling tot het systeem optimum deze toedeling *haalbaar* en *handhaafbaar*. Waar (auto)bestuurders vaak relatief flexibel zijn in termen van route- en vertrektijdkeuze, wordt in het OV de keuzevrijheid van reizigers grotendeels bepaald door de dienstregeling en de (reserve)capaciteit van voertuigen. Keuzegedrag is niettemin veelal egoïstisch, d.w.z., passagiers proberen hun nut te maximaliseren (o.a. Goerigk & Schmidt, 2017). Het nut is niet alleen afhankelijk van min of meer statische attributen zoals reistijd en het aantal keer tussentijds overstappen, maar wordt ook beïnvloed door de drukte of congestie (o.a. Luan & Corman, 2022). Zoals gezegd, voor het modelleren van de terugkoppel-effecten nemen we aan dat reizigers hun disnut of gegeneraliseerde kosten minimaliseren. De gegeneraliseerde kosten van een alternatief hangen af van de reistijd, vertrektijd (ten opzichte van het gewenste tijdstip van vertrek) en de drukte *in* de voertuigen (de bezettingsgraad). Op een netwerk-breed of maatschappelijk niveau is het doel om een efficiënte toedeling in termen van totale of gemiddelde nut te realiseren.

Drukke wordt in toenemende mate gezien als een probleem in het OV (Luan & Corman, 2022) en zeker sinds het uitbreken van de pandemie speelt drukke een belangrijke factor bij het afwegen van alternatieven (Das et al. 2021). Dit geldt in het bijzonder gedurende lockdowns met reisbeperkende maatregelen, onder meer door de angst voor besmetting en omdat een *social-distancing* capaciteit ervoor kan zorgen dat reizigers geweigerd worden. Tegelijkertijd worden er meer en meer systemen geïntroduceerd die real-time informatie geven over de drukte (Jenelius 2020), zoals de Treinwijzer van NS (NS, 2021). De drukte wordt expliciet meegenomen in de nutsfunctie, en hangt af van zowel de maatregel als van de keuzes van alle reizigers (in reactie op het sociaal reisadvies). In het anticiperen op het opvolgedrag en de gedragsreactie van alle reizigers in reactie op sociaal reisadvies dient dit dus expliciet te worden meegenomen in een model zodat de inzet van de maatregel het gewenste effect heeft. In dit onderzoek wordt het effect van drukke als volgt gemodelleerd. Ten eerste, voertuigen hebben een (fysieke) capaciteit die niet overschreden kan worden, en een passagier kan niet instappen bij een voertuig zonder reservecapaciteit. Daarnaast wordt de invloed van de drukte op het nut van alternatieven beschreven door gebruik te maken van gegeneraliseerde kosten, waarbij een toename van de bezettingsgraad in een voertuig leidt tot hogere gegeneraliseerde kosten.

Om inzicht te krijgen in de effecten van het sociaal reisadvies als sturingsmaatregel in het OV, introduceren we in het vervolg van dit paper een model raamwerk. Een groep (sociale) reizigers ontvangt individueel (OV-modaliteit-, vertrektijd- en lijn-) advies ver voor vertrek, en dit reisadvies is potentieel maar niet noodzakelijkerwijs een omweg. In het ontwerp van deze strategie wordt geanticipeerd op het opvolgedrag van alle reizigers door middel van een toedelingsmodel, aangezien het aannemelijk is dat de sturingsmaatregel meer effect heeft wanneer de geanticipeerde en eventueel gecommuniceerde bezettingsgraden overeenkomt met de werkelijke drukte.

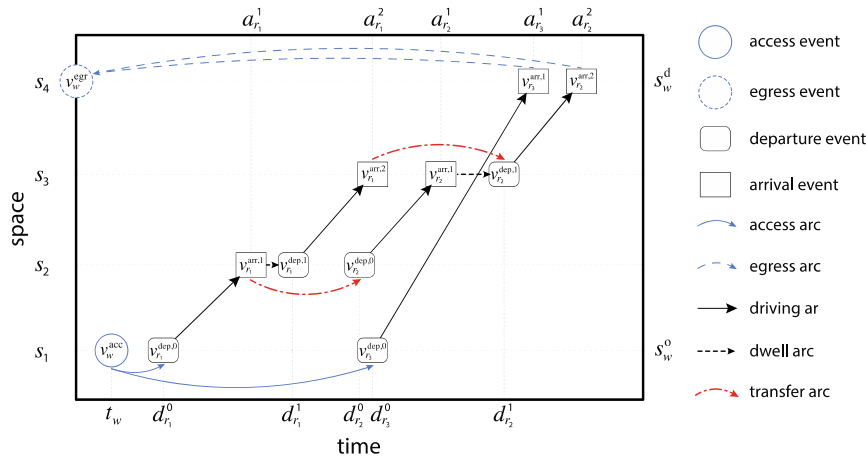
### 3. Model raamwerk

In dit hoofdstuk beschrijven we het model raamwerk voor het bepalen van het optimale sociale reisadvies. Hoofdstuk 3.1 presenteert een toedelingstechniek, die vervolgens in hoofdstuk 3.2 wordt gebruikt voor het formuleren van een optimaliseringsprobleem voor het bepalen van optimaal reisadvies.

#### 3.1 Een toedelingsmodel met capaciteitsrandvoorwaarden

Uitgangspunt van het model is een bestaand OV-netwerk inclusief de dienstregeling, gemodelleerd in een zogenaamd gebeurtenis-activiteit netwerk (event-activity based network). Dit netwerk wordt gerepresenteerd middels een gerichte graaf  $G = (V, E)$ , met  $V$  de verzameling knopen en  $E$  de verzameling (gerichte) zijden, takken, lijnstukken of links  $e = (i, j)$  waarbij  $i, j \in V$ . In tegenstelling tot standaard graven representeert elke knoop een tijd-station of tijd-halte combinatie. Bijvoorbeeld: een knoop representeert een vertrekkende bus om 08:00 uur van station A (een event) terwijl een andere knoop de aankomst van dezelfde bus bij station B om 08:04 uur representeert. Door deze twee knopen te verbinden met een zijde wordt een rit (activity) in de graaf opgenomen. Hiermee wordt de tijdsdimensie geïntroduceerd, en kan de dienstregeling worden gerepresenteerd, terwijl standaard graaf bewerkingen en algoritmes (o.a. het kortste pad algoritme van Dijkstra) kunnen worden toegepast.

Zoals gezegd representeert een deel van de knopen de aankomsten en vertrekken van bussen bij stations en haltes. De herkomst-bestemmingsmatrix geeft per tijdsinterval het aantal verplaatsingen per HB-paar. Generatie en attractie van deze verplaatsingen gebeurt in knopen, die door middel van zijdes zijn verbonden met stations en haltes. De lijnstukken in de graaf komen overeen met het rijden en halteren van voertuigen, en het in-, over- en uitstappen van de reizigers. De lijnstukken die corresponderen met het rijden en halteren van voertuigen kennen dan ook een capaciteit, namelijk het maximaal aantal passagiers van een bus. De overige lijnstukken hebben een capaciteit van 'oneindig'. Figuur 1 geeft een illustratie van een event-activity graaf, waarbij passagiers van station  $s_1$  naar  $s_4$  reizen, met gewenste vertrektijd  $t_w$ . Op het station  $s_1$  hebben ze de mogelijkheid om op bus  $r_1$  of  $r_3$  te stappen. Als er voor bus  $r_1$  wordt gekozen, wordt de vertrektijd aangepast tot  $d_{r_1}^0$ . Reizigers vertrekken om  $d_{r_3}^0$  als ze met bus  $r_3$  reizen. Waarbij  $r_3$  een directe verbinding met  $s_4$  heeft, is eenmaal overstappen benodigd is als reizigers voor lijn  $r_1$  kiezen.



Figuur 1: Voorbeeld van een event-activity based netwerk met passagiers die reizen van station  $s_1$  naar  $s_4$  (figuur uit Luan et al., 2023).

Formeel gezien kent het netwerk een verzameling HB-paren  $\mathcal{K} \subseteq V \times V$ , met een bijbehorende vraag (uitgedrukt in units of flow). Elk HB-paar  $k$  is verbonden via een verzameling van gerichte paden  $\mathcal{P}_k$ , waarbij elk pad bestaat uit een reeks gerichte takken. In dit geval representeert een pad een vertrektijdkeuze en de ritketen inclusief het voor- en natransport (zie ook Figuur 1). Een (toegelaten) toedeling is een tweetal vectoren (de path en link flow) in de reële vectorruimte, waarbij alle vraag wordt toebedeeld, de path flows niet-negatief zijn, en de link flow (of load) correspondeert met de som van de path flows van de paden waarvan de zijde een onderdeel is.

We introduceren een gegeneraliseerde kostenfunctie voor elke link (als functie van de link flow). De hoogte van de kosten voor een pad bestaande uit een reeks activiteiten wordt volledig bepaald door de kosten van de bijbehorende lijnstukken. De kostenfunctie beschrijft het toenemende disnut als functie van de flow in relatie tot de capaciteit (bezettingsgraad). De reizigers vinden de beste route in termen van gegeneraliseerde kosten. Vaak wordt aangenomen dat de resulterende toedeling in evenwicht is zoals beschreven door Wardrop (1952). In het Wardrop evenwicht zijn de kosten voor alle gebruikte routes voor een gegeven HB-paar gelijk en de kosten voor ongebruikte routes minstens zo hoog. Echter, het beginsel van Wardrop houdt alleen impliciet rekening met de capaciteit. Oftewel, het kan voorkomen dat het systeem in evenwicht is, maar dat een link flow de capaciteit van een lijnstuk overschrijdt. Sterker, een (Wardrop) evenwichtssituatie die voldoet aan de capaciteitsrandvoorwaarde hoeft in beginsel niet te bestaan. Voor een realistische toedeling van de vraag, nodig om te anticiperen op het effect van de terugkoppelingen, dient er dus expliciet rekening te worden gehouden met de capaciteit en moet het beginsel zoals gedefinieerd door Wardrop worden verfijnd.

We ontwikkelen een toedelingsmodel voor het OV dat expliciet rekening houdt met de toenemende reisweerstand als de bezettingsgraad toeneemt. Hiervoor gaan we uit van een alternatieve interpretatie van het gebruikersevenwicht, zoals eerder geformuleerd door Nash (1950) en Bernstein & Smith (1994): in een evenwichtssituatie kunnen reizigers zich niet verbeteren door eenzijdig van route te veranderen. Ondanks dat de twee interpretaties equivalent zijn in het geval dat de capaciteiten 'oneindig' zijn, is er een belangrijk verschil als de capaciteit van een link wel expliciet wordt meegenomen. In het tweede geval kan het namelijk zo zijn dat een alternatief voor een HB-paar met minimale gegeneraliseerde kosten als 'niet beschikbaar' wordt beoordeeld. Dat wil zeggen, als de voertuigcapaciteit wordt bereikt, 'springt' de kostenfunctie naar oneindig (Correa et al., 2004). Hierbij is het overigens goed om op te merken dat de eerdergenoemde beoordeling van een alternatief zonder reservecapaciteit (d.w.z: het verschil tussen de capaciteit en

de load) op het moment van instappen alleen geldt voor reizigers die deze keuze overwegen. Immers, de passagiers van een voertuig zonder reservecapaciteit kunnen daar blijven, terwijl andere reizigers kunnen overwegen om bij een eerdere halte in of over te stappen om er zeker van te zijn dat er plek is. Daarnaast wordt er aangenomen dat het ongemak aan boord van een voertuig wordt beïnvloed door andere reizigers, en daarvoor wordt een Bureau of Public Roads weerstandsfunctie gebruikt (zie o.a. Gentile & Nökel, 2016). In de evenwichtssituatie die wiskundig wordt geïntroduceerd in Luan et al. (2023) wordt er aan de capaciteitsvoorwaarde voldaan en kan geen reiziger zijn gegeneraliseerde kosten verminderen door eenzijdig de reis aan te passen: óf het alternatief is niet beschikbaar (er is geen reservecapaciteit) óf de gegeneraliseerde kosten van het alternatief zijn hoger of gelijk aan de kosten van de huidige keuze.

### 3.2 Optimaliseringsprobleem

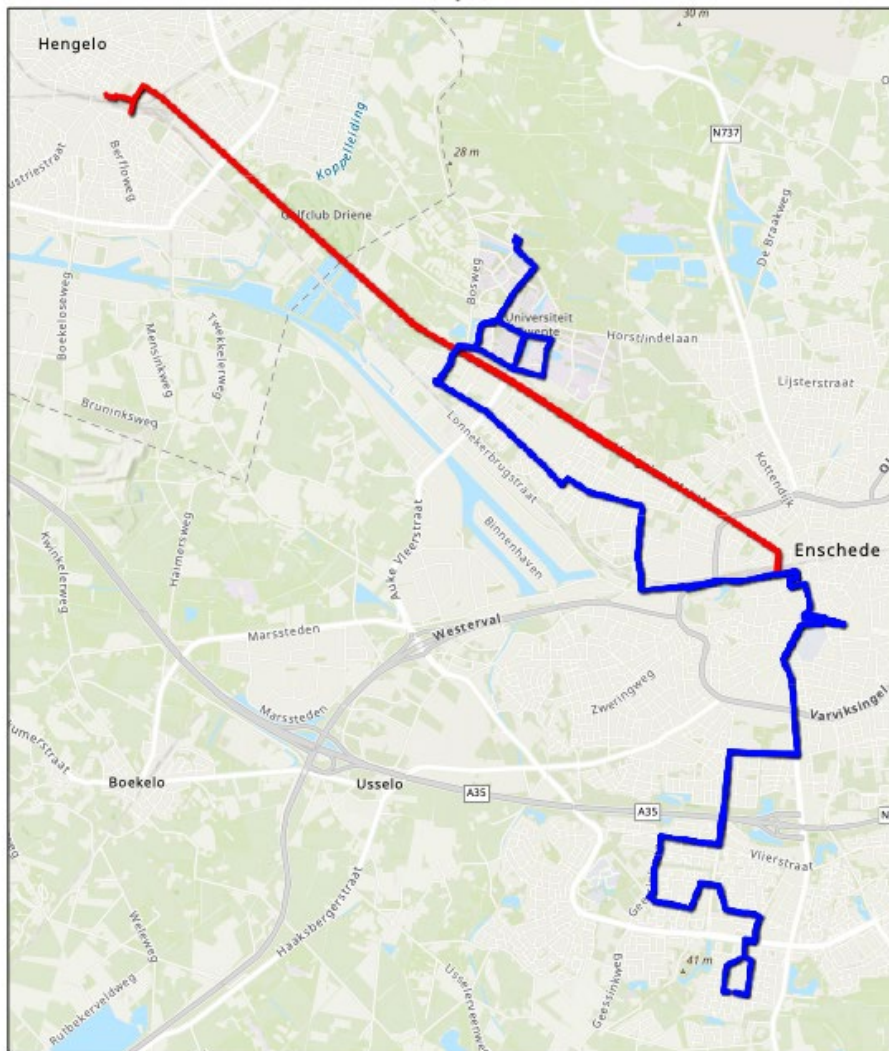
Sociale reizigers krijgen een advies met betrekking tot hun reis en in het model volgen ze dit advies alleen op als de a-posteriori gegeneraliseerde reiskosten niet significant slechter zijn dan de kosten voor het best beschikbare (d.w.z., met reservecapaciteit) alternatief (voor hetzelfde HB-paar). Sociale reizigers accepteren dus suboptimaal reisadvies als de hoogte van de gegeneraliseerde kosten maximaal  $\varepsilon \cdot 100\%$  ( $\varepsilon \geq 0$  is de onverschilligheids- of ongevoeligheidsband) slechter is dan het best beschikbare alternatief (zie hoofdstuk 2). Formeel betekent dit, voor een gegeven toedeling  $\bar{f}$ , dat sociale reizigers van HB-paar  $k$  pad  $p \in \mathcal{P}_k$  acceptabel vinden zolang aan  $c_p(\bar{f}) \leq c_{p \rightarrow q}^+(\bar{f})(1 + \varepsilon)$  voor alle  $q \in \mathcal{P}_k$  wordt voldaan. Hierbij geeft  $c_p(\bar{f})$  de gegeneraliseerde kosten voor pad  $p$ , en  $c_{p \rightarrow q}^+(\bar{f})$  de geanticipeerde kosten wanneer er een eenzijdige verandering van pad  $p$  naar  $q$  plaatsvindt. De geanticipeerde kosten zijn oneindig als er geen reservecapaciteit is op het moment instappen en gelijk aan  $c_q(f)$  als die er wel is. De overige reizigers krijgen geen advies of nemen niet deel, in ieder geval updaten zij hun keuzes volgens het gebruikersevenwicht: zij reizen via een pad  $p$  waarvoor  $c_p(\bar{f}) \leq c_{p \rightarrow q}^+(\bar{f})$  geldt. We nemen aan dat deze groepen vooraf geïdentificeerd kunnen worden - maar in de praktijk kan dit betekenen dat reizigers incidenteel (bijvoorbeeld één keer per week) reisadvies ontvangen.

Doordat een groep reizigers bereid is eventueel een sociale omweg te nemen, geeft dit - in vergelijking met het gebruikersevenwicht - een vrijheidsgraad om de vraag zo te (her)verdelen zodat een doel behaald kan worden. Een optimaliseringsprobleem volgt, waarbij het doel is om in dit geval totale of gemiddelde gegeneraliseerde reiskosten te minimaliseren met behoud van de vervoersvraag en inachtneming van de doelstellingen van individuen. Ter ondersteuning van de leesbaarheid neemt het probleem hieronder aan dat alle reizigers bereid zijn om sociaal reisadvies op te volgen. Het sociale reisadvies is dan impliciet onderdeel van de oplossing van optimaliseringsprobleem

$$(P) : \quad \min_{(f,x) \in F} z(f) \quad \text{m.b.t.} \quad f_p > 0 \Rightarrow c_p(f) \leq c_{p \rightarrow q}^+(f)(1 + \varepsilon) \text{ voor alle } q \in \mathcal{P}_k, p \in \mathcal{P}_k, k \in \mathcal{K}.$$

$z(f) := \sum_{p \in \mathcal{P}} c_p(f) \cdot f_p$  is de doelfunctie (netwerkefficiëntie: totale gegeneraliseerde reiskosten) en  $(f, x)$  zijn de beslisvariabelen (path en link flows), en  $F$  is de verzameling van toegelaten toedelingen die voldoen aan de capaciteitsrandvoorwaarde. Het vinden van de optimale oplossing(en) in dit probleem is uiterst gecompliceerd mede omdat verschillende lokale minima co-existeren. Een herformulering van (P) als een gemengd-geheeltallig lineair programma (mixed integer linear programming) wordt numeriek opgelost met behulp van GUROBI.





Figuur 2: Routes van buslijn 1 (blauw) en buslijn 9 (rood).

## 4. Casestudy

Dit hoofdstuk beschrijft de casestudy (hoofdstuk 4.1), het referentiescenario en het toetsingskader (hoofdstuk 4.2) en evalueert de resultaten (hoofdstuk 4.3).

### 4.1 Beschrijving casestudy

Voor de casestudy beschouwen we het OV-stelsel van Regio Twente (Twents), en richten we ons met name op buslijn 1 (Universiteit-Wesslerbrink) en buslijn 9 (Hengelo - Enschede). Lijn 1 richting Wesslerbrink gaat van de halte Universiteit Twente/Langenkampenweg via Enschede, Centraal Station, naar Enschede, de Posten. Lijn 1 richting Universiteit volgt vrijwel dezelfde route in omgekeerde richting. Lijn 9 richting Hengelo gaat naar Hengelo, Centraal Station en vertrekt van Enschede, Centraal Station. Lijn 9 richting Enschede gaat in omgekeerde richting en halteert bij dezelfde haltes. Figuur 2 geeft de routes van buslijn 1 richting Wesslerbrink en buslijn 9 richting Enschede weer.

De casestudy beschouwt deze twee buslijnen die veelvuldig worden gebruikt door studenten om van en naar de Universiteit Twente te reizen en als gevolg zijn er incidenteel overvolle bussen. In

de casestudy wordt expliciet meegenomen dat reizigers vertrektijd en lijnkeuze hebben, en dus ook een reisadvies hierover kunnen krijgen. Bijvoorbeeld: vanaf Enschede Centraal Station kan men zowel lijn 1 als lijn 9 nemen om naar de campus van de universiteit te reizen. Ondanks dat beide lijnen bij verschillende haltes op en bij de campus halteren, worden beide lijnen vaak overwogen, zeker als men richting de universiteit reist sinds de afstand tussen de gebouwen op de campus lopend af te leggen is. Het is goed om op te merken dat ringlijn 8, die ook kan worden gebruikt om op de campus te geraken, voor deze casestudy buiten beschouwing is gelaten.

We bekijken een reguliere ochtendspits van 7:45 tot 8:45 uur volgens de geplande dienstregeling. Een HB-matrix met het aantal verplaatsingen tussen twee haltes per interval van 7,5 minuten is geschat op basis van door Keolis beschikbaar gestelde OV-chipkaart data van November 2019. We nemen aan dat reizigers van elk HB-paar een (gewenste) vertrektijd hebben, en dat de vertrektijd van deze reizigers uniform verdeeld is over het tijdsinterval. Zij zijn tot op zekere hoogte bereid om hun vertrektijd aan te passen. Dat wil zeggen dat alle bussen die in of na het HB-paar afhankelijke tijdsinterval vertrekken worden meegenomen in de keuzeset voor deze groep. Dit zorgt wel voor een toenemende weerstand als de vertrektijd gemiddeld gezien meer moet worden aangepast. Verder wordt aangenomen dat reizigers niet bereid zijn om halverwege hun rit uit te stappen en een latere bus van dezelfde lijn te nemen, en dat zowel de herkomst als de bestemmingshalte vast ligt. Voor haltes op de campus wordt aangenomen dat reizigers bereid zijn bij een andere halte in of uit te stappen en het eerste of laatste deel van de ritketen te voet af te leggen.

In totaal zijn er 462 HB-paren (een HB-paar is een combinatie van haltes en een gewenst vertrekinterval), en 21 busdiensten. De gegeneraliseerde kosten aan boord wordt uitgedrukt als functie van de bezettingsgraad (de link flow - zitplaatsen ratio) middels een Bureau of Public Roads weerstandsfunctie. Bij een bezettingsgraad van 0 zijn de gegeneraliseerde kosten gelijk aan de reistijd, terwijl de kosten als tweemaal zo hoog worden ervaren als de maximale capaciteit bereikt is. We nemen aan dat een bus 40 zitplaatsen heeft en een capaciteit van 80 passagiers. De gegeneraliseerde kosten voor de overige zijden in de graaf zijn constant en komen overeen met de reistijden.

## 4.2 Referentiescenario en toetsingskader

We evalueren de potentiële effecten van de inzet van sociaal reisadvies als sturingsmaatregel door middel van numerieke experimenten in de casestudy. De potentie van het reisadvies als sturingsmaatregel wordt geëvalueerd aan de hand van scenario's waarin de ratio  $\alpha$  (de fractie sociale reizigers per HB-paar) en de onverschilligheidsband  $\varepsilon$  (de acceptabele 'omweg' in termen van gegeneraliseerde kosten) varieert. Om de invloed van de variatie in de vraag mee te nemen, simuleren we de scenario's waarbij het aantal verplaatsingen in de HB-matrix is geschaald met een (schalings)factor  $\zeta$ , waarbij  $\zeta \in \{0.9, 1.0, 1.1, 1.2\}$ .

De resulterende toedeling, d.w.z. de oplossing van optimaliseringsprobleem  $(P)$ , wordt vergeleken met een referentiesituatie: het gebruikersevenwicht zoals geïntroduceerd in hoofdstuk 3.1. Het optimale scenario, het systeem optimum, is de best mogelijke situatie in termen van gemiddelde of totale gegeneraliseerde reiskosten. Hier wordt echter een substantieel en onrealistisch offer verwacht van enkele reizigers. Het sociaal reisadvies biedt een eerlijker of gelijkjer alternatief met van boven begrensde offers.

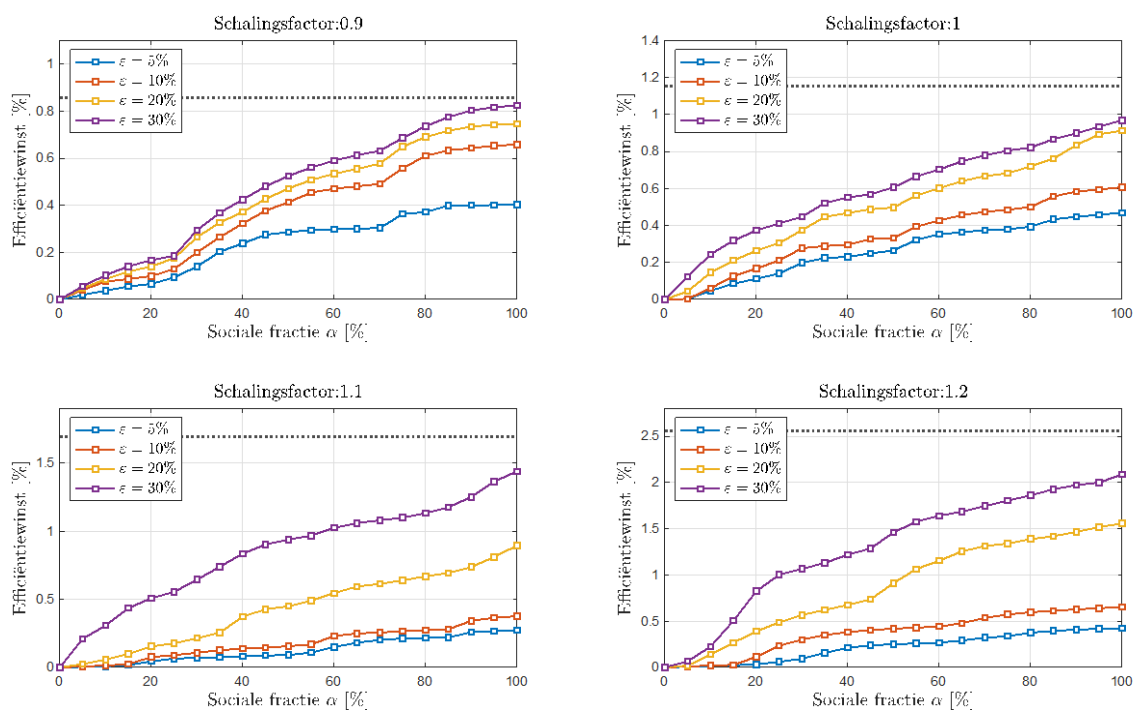
In het bijzonder analyseren we de wisselwerking tussen de efficiëntie op netwerkniveau (de gemiddelde gegeneraliseerde reiskosten van alle reizigers -  $z(f)$ ) en gelijkheid in de verdeling van individuele gegeneraliseerde reiskosten  $c_p(f)$ ,  $p \in \mathcal{P}$ . De definitie van netwerkefficiëntie staat toe

dat het 'verlies' van een groep reizigers wordt gecompenseerd door de winst van een andere groep reizigers. Het is echter de verdeling en de mate van de verliezen die een potentieel risico voor de acceptatie en dus de praktische haalbaarheid van de maatregel vormen. In hoofdstuk 4.3 bestuderen we deze wisselwerking tussen het individuele en het collectieve belang.

We gebruiken de volgende indicatoren voor de gelijkheid met betrekking tot de verdeling in intra-state en inter-state verschillen in gegeneraliseerde reiskosten. Ten eerste bekijken we het aandeel winnaar en verliezers: reizigers met respectievelijk een verbetering en verslechtering in de gegeneraliseerde kosten in de nieuwe situatie in vergelijking met het referentiescenario. De inter-state verdeling van gegeneraliseerde geeft een indicatie over de acceptatie van sociaal reisadvies, omdat reizigers waarschijnlijk ontevreden zijn over een implementatie als een groot deel van de reizigers er substantieel op achteruit gaat. Ten slotte bekijken we de intra-state verdeling van gegeneraliseerde reiskosten, relevant voor de handhaafbaarheid: het kan worden verondersteld dat reizigers alleen bereid zijn om een omweg te nemen als de beschikbare alternatieven niet veel beter zijn met betrekking de gegeneraliseerde reiskosten.

### 4.3 Resultaten casestudy

Figuur 3 zet de relatieve efficiëntiewinst ten opzichte van het referentiescenario ( $y$ -as) af tegen het aandeel sociale reizigers ( $x$ -as), de onverschilligheidsband (de verschillende lijnen) en het totaal aantal verplaatsingen (de verschillende figuren). De zwarte horizontale stippelijlijn illustreert de bovengrens in efficiëntiewinst, d.w.z., de winst in het geval van een toedeling volgens het systeem optimum.



Figuur 3: Efficiëntiewinst als functie van de onverschilligheidsband, fractie sociale passagiers en de schalingsfactor.

De maximale winst in de gemiddelde gegeneraliseerde reiskosten bij de inzet van sociaal reisadvies als sturingsmaatregel varieert tussen de 0,9% (schalingsfactor 0,9) en 2,6% (schalingsfactor 1,2),

aannemende dat alle reizigers binnen het netwerk bereid zijn elk mogelijk sociaal advies op te volgen. De toename in de potentiële winst bij meer verplaatsingen in het netwerk is te verklaren doordat een toename in de vraag bij een gelijkblijvend aanbod voor een groter capaciteitsprobleem zorgt. We zien de te verwachten effecten: een toename in de onverschilligheidsband en in het aandeel sociale reizigers zorgt voor meer besparing met betrekking tot de totale gegeneraliseerde reiskosten. Waar in het systeem optimum een significant offer wordt gevraagd van een groep passagiers (zie bijvoorbeeld Figuur 4), geven de resultaten in Figuur 3 aan dat een groot deel van de intra-state omwegen niet noodzakelijk is voor een substantiële verbetering van de efficiëntie.

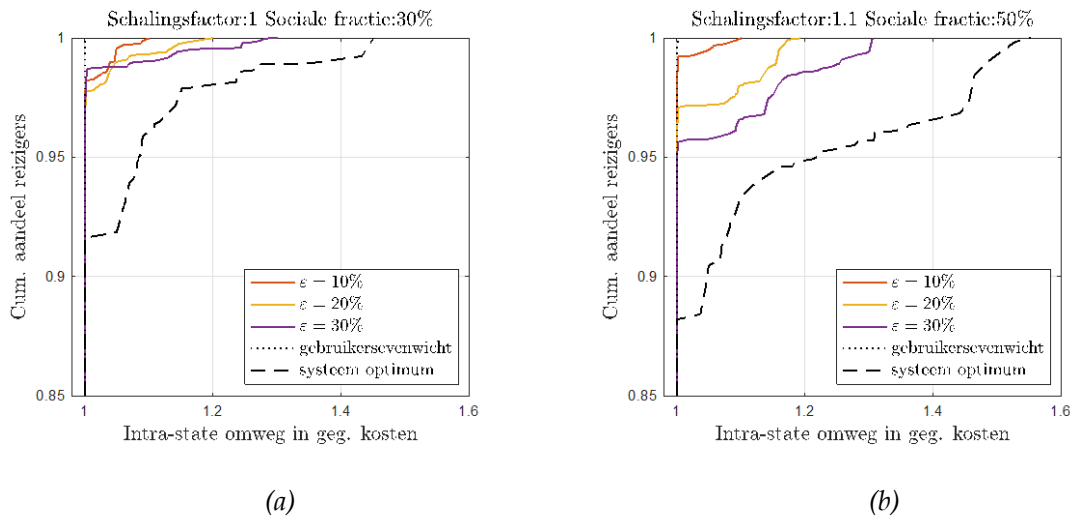
Impliciet in de winst in totale gegeneraliseerde reiskosten is dat door middel van de sturingsmaatregel de drukte op enkele zwaarbelaste trajecten substantieel minder wordt en dat capaciteitsknelpunten worden opgelost. Immers, een deel van de inefficiëntie van het referentiescenario komt door de hoge bezettingsgraden. Bijvoorbeeld: in een scenario met schalingsfactor van 1,1, is het bij zeven halteringen niet mogelijk om in te stappen vanwege een overvolle bus, terwijl in het systeem optimum – door een herverdeling van de vraag – dit slechts één keer het geval is. Problematisch is echter dat het her-routeren van de overige reizigers om de overbelasting te voorkomen een significant omweg van hen vraagt, en het is precies deze impact die het realiseren van het systeem optimum belemmert.

Bemoedigend is dat met een relatief klein marktaandeel sociale reizigers al substantiële winst op het gebied van gemiddelde gegeneraliseerde reiskosten te boeken is. Ter illustratie: als 20% van de passagiers (per HB-paar) bereid is om een andere route te nemen in plaats van de best-beschikbare route, kan in het algemeen al ruim een kwart van de maximaal haalbare winst geboekt worden. Niettemin laat Figuur 3 zien dat om het systeem optimum te benaderen de onverschilligheidsband relatief groot moet zijn.

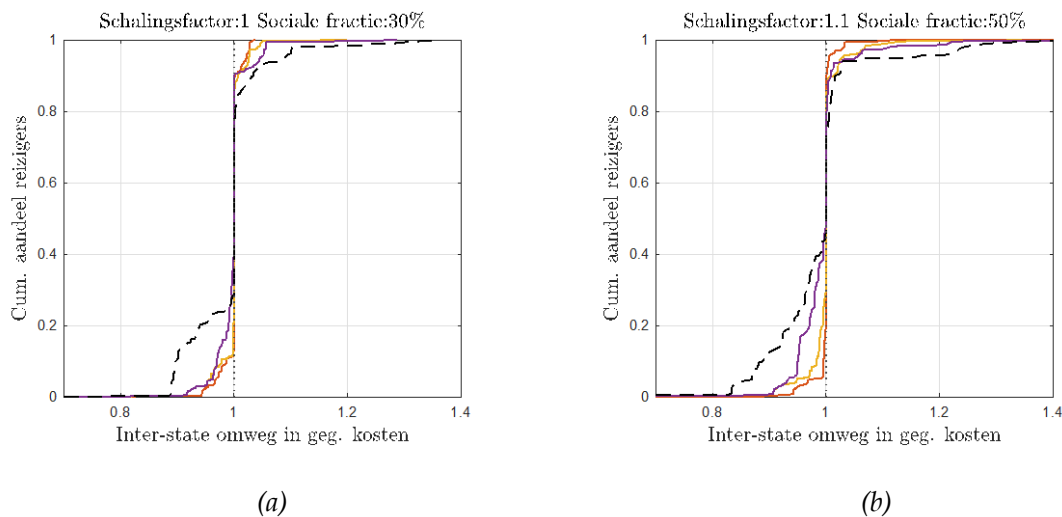
We illustreren de verschillen tussen het gebruikersevenwicht, de toedeling als resultaat van het sociaal reisadvies en het systeem optimum. Figuur 4a geeft de verdeling van de relatieve intra-state verschillen in gegeneraliseerde kosten in een scenario met een schalingsfactor van 1,0 en een sociale reizigersfractie van 30%. Figuur 4b plot de verdeling van intra-state omwegen in een scenario met een schalingsfactor van 1,1 en een fractie sociale reizigers van 50%. Het gebruikersevenwicht is een 'eerlijke' toedeling in de zin dat geen passagier van route wil veranderen. Toch kan het zijn dat niet alle reizigers de kortste route nemen doordat enkele trajecten geen reservecapaciteit hebben. In het systeem optimum zoals weergegeven in Figuur 4b wordt aan meer dan 10% van de reizigers gevraagd een omweg tot wel 55% te nemen in ruil voor een efficiëntiewinst van 1,7%. Ten opzichte van het systeem optimum begrenst het sociaal reisadvies het offer maar dit gaat ten koste van de efficiëntie. Het figuur beschouwt de scenario's met een onverschilligheidsband van 10, 20 en 30%, wat in dit geval leidt tot een efficiëntieverbetering van respectievelijk 0,2, 0,4 en 0,9%. De relatieve verschillen in gegeneraliseerde reiskosten laten zien dat ondanks dat 50% van de reizigers een sociaal reisadvies ontvangt, dat in de bekeken scenario's voor slechts 2-5% van de reizigers ook werkelijk een offer wordt gevraagd. In de praktijk zou dit kunnen inhouden dat deelnemers slechts eens per 10 tot 25 dagen een omweg moeten nemen. Figuur 3 laat echter zien dat er slechts beperkte efficiëntiewinst te boeken is als per HB-paar 5% van de reizigers openstaat voor sociaal reisadvies. Met andere woorden: de ruimtelijke en temporele concentratie van groepen sociale reizigers speelt een belangrijke rol voor de effectiviteit van de sturingsmaatregel.

Figuur 4a en 4b laten zien dat de reizigers die als gevolg van het opvolgen van sociaal reisadvies slechter af zijn ten opzichte van de andere reizigers (van hetzelfde HB-paar) veelal een omweg geadviseerd krijgen dat substantieel beter is dan hun onverschilligheidsband toestaat.

Bijvoorbeeld, in Figuur 4a met onverschilligheidsband van 30% is de gemiddelde intra-state omweg slechts 5%.



Figuur 4: Verdeling van intra-state verschillen in gegeneraliseerde reiskosten.



Figuur 5: Verdeling van inter-state verschillen in gegeneraliseerde reiskosten.

De inter-state verdeling van (relatieve) kostenverschillen in Figuur 5a en 5b geeft weer dat een grote groep reizigers baat heeft bij een systeem met sociaal reisadvies (zgn. ‘winnaars’). In vergelijking met het referentiescenario, kan voor de bekeken scenario’s tot wel 40% van de reizigers baat hebben bij het sociaal routeadvies. Daartegenover staat dat tot wel 30% van de reizigers als ‘verliezers’ kan worden aangemerkt: zij zijn tot wel 40% slechter af in vergelijking met het gebruikersevenwicht. Het moet worden opgemerkt dat niet enkel de sociale reizigers potentieel verliezen, ook passagiers die geen advies krijgen kunnen slechter uit zijn in vergelijking met het referentiescenario. Waarbij het aandeel verliezers substantieel kan zijn, laat de inter-state omweg zien dat het gegeneraliseerde reiskostenverschil van deze groep reizigers beperkt is. Zelfs in het systeemoptimum voor deze vervoersvraag is de gemiddelde omweg van de verliezers slechts rond de 5%. Daarnaast zien we over het algemeen geen duidelijk verband tussen het aantal winnaars en

verliezers en de efficiëntiewinst. Met andere woorden: een toenemende sociale fractie of onverschilligheidsband betekent niet automatisch dat het aantal verliezers of winnaars toe of afneemt.

De relatieve verschillen in de gegeneraliseerde kosten laten zien dat het belangrijk is om de verdeling hiervan in acht te nemen tijdens het ontwerpproces. Het is onwaarschijnlijk dat reizigers bereid zijn een omweg van 40-60% ten opzichte van het best beschikbare alternatief te nemen. Er is echter relatief weinig empirisch onderzoek beschikbaar over de mate waarin (openbaar vervoer) reizigers bereid zijn om sociaal reisadvies op te volgen. De paper van Van Essen et al. (2019) komt tot een schatting van 10 tot 30% op basis van een studie met 29 medewerkers van de Universiteit Twente en een stated preference survey. Op basis van twee vragenlijsten schatten Szep et al. (2023) het aantal deelnemers aan een social rerouting scheme tussen de 30 en 75%, waarbij het reistijdoffer een negatieve relatie heeft met het aantal potentiële deelnemers. Vreeswijk (2015) komt tot inertiegrenswaarden van rond de 10%. Deze bevindingen illustreren dat de essentiële parameters die de efficiëntie van sociaal reisadvies bepalen in hoge mate afhangen van de context waarin de sturingsmaatregel wordt toegepast.

## 5. Conclusies en discussie

Sociaal reisadvies als sturingsmaatregel kan worden ingezet om de kwaliteit van OV te verbeteren door de vervoersvraag te herverdelen. Door de flexibele inzet van de maatregel, waarbij een groep reizigers lijn-, vervoerswijze- en vertrektijdadvies krijgt, kan de bestaande capaciteit beter benut worden maar moet er worden geanticipeerd op de terugkoppelingen van reizigers zodat geprojecteerde doelen worden behaald. Dit onderzoek introduceert een model raamwerk en een optimaliseringsprobleem om het optimale reisadvies te bepalen, rekening houdend met zowel individuele als maatschappelijke of netwerk-brede doelstellingen. In de praktijk kan de sturingsmaatregel worden geïmplementeerd in bestaande gepersonaliseerde reisinformatiesystemen, bijvoorbeeld een smartphone applicatie. Een centraal systeem bepaalt dan een sociaal reisadvies door het optimaliseringsprobleem op te lossen, gegeven het (te verwachten) aandeel sociale reizigers en hun bereidheid om een eventuele omweg te nemen.

De numerieke experimenten in de casestudy laten zien dat sociaal reisadvies de potentie heeft om op netwerkniveau gegeneraliseerde reiskosten te verminderen, en vraagt hiervoor een offer van een kleine groep reizigers. Bemoedigend is dat de sociale OV-reizigers incidenteel een omweg in vergelijking met de beste route dient te nemen om significante verbeteringen in de netwerk-brede doelfunctie te realiseren. Als gevolg van dit sociale reisadvies kan er echter een relatief grote groep verliezers zijn: zij gaan er op achteruit ten opzichte van het referentiescenario. Waar dit onderzoek twee buslijnen in Regio Twente als casestudy gebruikt, waaruit blijkt dat zelfs op relatief beperkte schaal de maatregel netwerkefficiëntie kan verbeteren, is de mate waarin sociaal reisadvies effect heeft in hoge mate afhankelijk van het netwerk, de dienstregeling, de bereidheid van reizigers om een omweg te nemen en de verdeling van de vraag. Bijvoorbeeld: er is een afname in de maximale efficiëntiewinst in het netwerk van de casestudy als er een ander tijdsinterval wordt beschouwd. Dit komt onder meer omdat de bezettingsgraden dan een stuk lager liggen.

Naast het geïsoleerd inzetten van de sturingsmaatregel zou men aanvullend ook de capaciteit (het aanbod) dynamisch aan kunnen passen. Verder kan het in bijzonder interessant zijn om deze maatregel in te zetten in het licht van langere termijn bereikbaarheids- of duurzaamheidsdoelstellingen, d.w.z., om een modal shift van auto naar OV te bewerkstelligen. Tegelijkertijd is in dit paper geen rekening gehouden met het feit dat een deel van de

geprojecteerde effecten teniet kan worden gedaan door een toename in de OV-vraag als gevolg van een reductie in de vraag voor de initieel overbelaste onderdelen van het netwerk.

Dit artikel toont de potentie van sociaal reisadvies aan als sturingsmaatregel om OV-kwaliteit te verbeteren. Het bepalen van het optimale reisadvies is echter gecompliceerd omdat er rekening moet worden gehouden met het veranderende keuzegedrag van reizigers als het gevolg van het advies. Deze dynamiek wordt gevat in een Stackelberg model, waarbij we hebben verondersteld dat het toedelingsmodel een juiste voorspelling geeft van het keuzegedrag van de reizigers. Waar het doel van dit paper is om de potentie van de sturingsmaatregel in het OV te verkennen via een casestudy, is de praktijk is vanzelfsprekend weerbarstiger dan de geïdealiseerde omgeving van dit paper. Bij een praktische implementatie dient het raamwerk dan ook rekening te houden met een reeks (context-afhankelijke) onzekerheden. Verder is aangenomen dat de groep die open staat voor sociaal reisadvies vooraf bekend is, waarbij de vraag alleen binnen het OV-systeem kan worden herverdeeld. In de praktijk kunnen groepen sociale reizigers immers ruimtelijk of in de tijd geconcentreerd zijn, en conflicteren met de zwaarbelaste trajecten die een her-routing van een deel van de vraag verlangen. Daarnaast is de vraag in hoeverre reizigers bereid zijn of gemotiveerd kunnen worden om bijvoorbeeld wekelijks een omweg te blijven nemen. Veel van deze vraagstukken zijn empirisch van aard, en onderwerp van vervolgonderzoek.

## **Dankwoord**

We danken Keolis Nederland, in het bijzonder Sander Veldscholten, voor het beschikbaar stellen van de data. Deze publicatie maakt deel uit van het project MOCOLODO (MObilitéit tijdens en na COrona LOckDOwn) met projectnummer 10430032010024 van het onderzoeksprogramma COVID-19 (aandachtsgebied Maatschappelijke Dynamiek) dat (mede) is gefinancierd door de Nederlandse Organisatie voor Gezondheidsonderzoek en Zorginnovatie (ZonMw).

## Referenties

- Angelelli, E., Morandi, V., Savelsbergh, M., & Speranza, M. G. (2021). System optimal routing of traffic flows with user constraints using linear programming. *European Journal of Operational Research*, 293(3), 863-879.
- Ben-Akiva, M., De Palma, A., & Isam, K. (1991). Dynamic network models and driver information systems. *Transportation Research Part A: General*, 25(5), 251-266.
- Bernstein, D., & Smith, T. E. (1994). Equilibria for networks with lower semicontinuous costs: With an application to congestion pricing. *Transportation Science*, 28(3), 221-235.
- Correa, J. R., Schulz, A. S., & Stier-Moses, N. E. (2004). Selfish routing in capacitated networks. *Mathematics of Operations Research*, 29(4), 961-976.
- Das, S., Boruah, A., Banerjee, A., Raoniar, R., Nama, S., & Maurya, A. K. (2021). Impact of COVID-19: A radical modal shift from public to private transport mode. *Transport Policy*, 109, 1-11.
- Djavadian, S., Hoogendoorn, R. G., Van Arerm, B., & Chow, J. Y. (2014). Empirical evaluation of drivers' route choice behavioral responses to social navigation. *Transportation research record*, 2423(1), 52-60.
- Ettema, D., Knockaert, J., & Verhoef, E. (2010). Using incentives as traffic management tool: empirical results of the "peak avoidance" experiment. *Transportation Letters*, 2(1), 39-51.
- Eikenbroek, O. A. L., Still, G. J., & Van Berkum, E. C. (2022). Improving the performance of a traffic system by fair rerouting of travelers. *European Journal of Operational Research*, 299(1), 195-207.
- Van Essen, M., Eikenbroek, O. A. L., Thomas, T., & Van Berkum, E. C. (2019). Travelers' compliance with social routing advice: Impacts on road network performance and equity. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 21(3), 1180-1190.
- Gkiotsalitis, K., & Cats, O. (2021). Public transport planning adaption under the COVID-19 pandemic crisis: literature review of research needs and directions. *Transport Reviews*, 41(3), 374-392.
- Gentile, G., & Nökel, K. (2016). Modelling public transport passenger flows in the era of intelligent transport systems. *Springer Tracts on Transportation and Traffic*, 10, 641.
- Goerigk, M., & Schmidt, M. (2017). Line planning with user-optimal route choice. *European Journal of Operational Research*, 259(2), 424-436.
- van Hagen, M., van Oort, N., & Ton, D. (2021). Het gedrag van treinreizigers tijdens en na Covid: inzichten uit een longitudinaal onderzoek onder Nederlandse treinreizigers. *Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*. 25 en 26 november 2021, Utrecht
- Jahn, O., Möhring, R. H., Schulz, A. S., & Stier-Moses, N. E. (2005). System-optimal routing of traffic flows with user constraints in networks with congestion. *Operations research*, 53(4), 600-616.
- Jenelius, E. (2020). Personalized predictive public transport crowding information with automated data sources. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 117, 102647.
- Josefsson, M., & Patriksson, M. (2007). Sensitivity analysis of separable traffic equilibrium equilibria with application to bilevel optimization in network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(1), 4-31.



- Luan, X., & Corman, F. (2022). Passenger-oriented traffic control for rail networks: An optimization model considering crowding effects on passenger choices and train operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 158, 239-272.
- Luan, X., Eikenbroek, O.A.L., Corman F., & van Berkum, E.C. (2023). Passenger social rerouting strategies in capacitated public transport systems. Submitted.
- Nash Jr, J. F. (1950). Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the national academy of sciences*, 36(1), 48-49.
- Rover (2022). Rover wil dat Staatssecretaris ingrijpt in het OV. Online document at URL <https://www.rover.nl/nieuws/34-politiek-en-lobby/2157-rover-wil-dat-staatssecretaris-ingrijpt-in-het-ov>
- Peene, G. (2022). Ergernis over volle treinen groeit: 'Heel veel mensen moeten staan'. Online document at URL <https://nos.nl/artikel/2447093-ergernis-over-volle-treinen-groeit-heel-veel-mensen-moeten-staan>
- Rijkswaterstaat (z.d.). Factsheet Spitsmijden OV. Online document at URL <https://rwsduurzamemobiliteit.nl/slag/toolboxslimme-mobiliteit/openbaar-vervoer/factsheet-spitsmijden-ov/>
- Roughgarden, T. (2005). *Selfish routing and the price of anarchy*. MIT press.
- Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation networks* (Vol. 6). Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Simon, H. A. (1997). *Models of bounded rationality: Empirically grounded economic reason* (Vol. 3). MIT press.
- Szep, T., van den Berg, T., Cointe, N., Daniel, A. M., Martinho, A., Tang, T., & Chorus, C. (2023). Give and take: Moral aspects of travelers' intentions to participate in a hypothetical established social routing scheme. *Cities*, 133, 104132.
- Vreeswijk, J. D. (2015), *The dynamics of user perception, decision making and route choice*, University of Twente, Enschede.
- Vreeswijk, J. D., Landman, R. L., van Berkum, E. C., Hegyi, A., Hoogendoorn, S. P., & van Arem, B. (2015). Improving the road network performance with dynamic route guidance by considering the indifference band of road users. *IET intelligent transport systems*, 9(10), 897-906.
- Wardrop, J. G. (1952). Road paper. some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the institution of civil engineers*, 1(3), 325-362.
- Yap, M., Cats, O., & van Arem, B. (2020). Crowding valuation in urban tram and bus transportation based on smart card data. *Transportmetrica A: Transport Science*, 16(1), 23-42.