

# Modelleren van mobiliteitsbeprijzing met meerdere actoren

**Erik-Sander Smits**

Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek, Transport & Planning<sup>1</sup>

**Adam Pel**

Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek, Transport & Planning<sup>2</sup>

**Rob van Nes**

Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek, Transport & Planning<sup>3</sup>

**Bart van Arem**

Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek, Transport & Planning<sup>4</sup>

---

Bij mobiliteitsbeprijzing zijn meerdere actoren, zoals verschillende overheden en de spoorwegen, betrokken. In dit paper wordt een model gepresenteerd op basis van speltheorie dat de voorkeuren en interactie van deze actoren analyseert. Zo een model kan tijdens het planningsproces gebruikt worden om conflicterende belangen te identificeren en er worden daarnaast verschillende oplossingen voorgedragen. We gebruiken de aanpak van Transferable Utility games (TU-spellen), waarbij de resultaten van de best mogelijke strategie voor iedere mogelijke coalitie als bouwstenen gelden. Niet eerder werden deze bouwstenen voor een soortgelijke setting gedefinieerd. Vervolgens worden drie bekende oplossingsconcepten voor TU-spellen uit de literatuur toegepast, namelijk de kern, de Shapley-waarde en de compromis-waarde. Om de relevantie van een dergelijke aanpak aan te tonen wordt een casestudie van de Randstad gebruikt. Hierbij wordt naar een kilometerheffing, een cordontolheffing en de tarieven van de trein gekeken; deze worden elk door een andere actor bestuurd. Het onderliggende transportmodel van deze casestudie maakt gebruik van recente methodologische ontwikkelingen, en heeft daardoor een goede balans tussen efficiëntie en realisme. Tevens zijn de reistijdwinsten en emissievermindering in kaart gebracht. De resultaten laten zien dat in de oplossing bij samenwerking tussen de actoren, er geen cordontolheffing hoeft te worden ingevoerd, omdat de kilometerheffing – die wordt ingezet om de sociale welvaart te verbeteren – een betere maatregel is om het achterliggende doel van de cordontolheffing, de economische positie van de stad, te bereiken.

*Trefwoorden:* mobiliteitsbeprijzing, multi-actor, Nash-evenwicht, speltheorie, transferable utility game, transportmodellen.

---

<sup>1</sup> Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek, Transport & Planning, E: [e.smits@tudelft.nl](mailto:e.smits@tudelft.nl)

<sup>2</sup> Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek, Transport & Planning, E: [a.j.pel@tudelft.nl](mailto:a.j.pel@tudelft.nl)

<sup>3</sup> Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek, Transport & Planning, E: [r.vannes@tudelft.nl](mailto:r.vannes@tudelft.nl)

<sup>4</sup> Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek, Transport & Planning, E: [b.vanarem@tudelft.nl](mailto:b.vanarem@tudelft.nl)

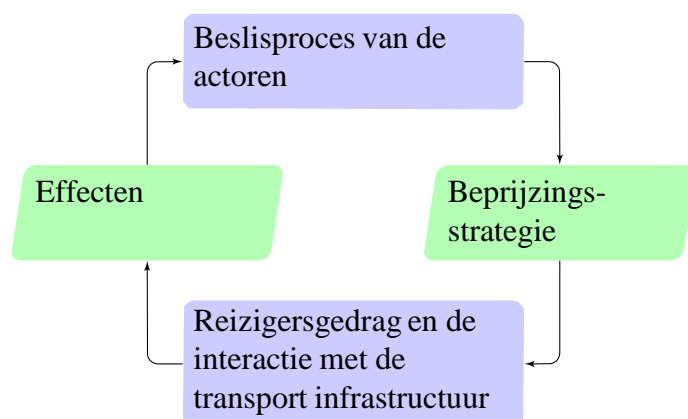
## 1. Inleiding

Innovatieve beprijzingsmaatregelen voor mobiliteit, zoals bijvoorbeeld een kilometerheffing, zijn in Nederland al decennia lang onderwerp van discussie. Het is algemeen bekend dat een heffing volgens het 'de gebruiker betaalt' principe een reductie van congestie en emissies kan opleveren. Door gebruik te maken van het transportsysteem leggen reizigers namelijk negatieve effecten op aan anderen. Mensen die later aansluiten in de file, of geen zitplek meer in het OV kunnen verkrijgen, zijn benadeeld door de keuzes van andere reizigers. Beprijzingsmaatregelen kunnen een aansporing zijn om deze keuzes omtrent het consumeren van mobiliteit te veranderen, wat uiteindelijk kan leiden tot een vermindering van de last van externe effecten.

Afgezien van een aantal spitsmijden projecten – welke de potentie van innovatief prijzen aan hebben getoond (Knockaert et al., 2010) – is in Nederland de grootschalige invoer van innovatieve beprijzingsmaatregelen nooit van de grond gekomen. Vonk Noordegraaf (2014), Smaal (2012) en van der Sar en Baggen (2005) beschrijven hoe een gebrek aan politiek draagvlak hieraan ter grondslag ligt. Ook het lage publieke draagvlak – bijvoorbeeld geuit via de ANWB – hebben bijgedragen aan het negatieve besluit. Een belangrijke factor hierbij is dat conflicterende belangen van actoren niet direct in het planningsproces zijn meegenomen. Dit artikel laat met behulp van een planningsmodel zien hoe meerdere actoren in de analyse meegenomen kunnen worden; hierin worden hun voorkeuren en invloeden expliciet gemodelleerd. Conflicterende belangen kunnen daarmee worden geïdentificeerd en worden opgelost. Dit laat ook zien wat de toegevoegde waarde van samenwerking ten opzichte van competitie is.

Andere studies met meerdere actoren richten zich niet zozeer op het planningsproces, maar onderzoeken de eigenschappen van economische modellen onder competitie. Zulke modellen kunnen analytisch worden 'opgelost' en zijn vaak gebaseerd op eenvoudige representaties van transportverbindingen zonder expliciete weergave van het transportsysteem en -netwerk. Voor een overzicht van deze literatuur verwijzen wij naar de Borger en Proost (2012) en Ubbels en Verhoef (2008). Een uitzondering hierop is de aanpak van Proost en Sen (2006), waarbij het economisch model voor Brussel gesimuleerd wordt onder verschillende types gedrag van de regionale en lokale overheden; het transportnetwerk wordt daarin echter vereenvoudigd tot één link. Deze studie gebruikt gedetailleerdere verkeerskundige netwerkmodellen in plaats van de economische modellen voor het transportsysteem, waardoor analytische oplossingen niet mogelijk zijn. Dit verhoogde detailniveau geeft aan de andere kant wel de mogelijkheid de resultaten in het planningsproces te gebruiken.

Het model in dit artikel heeft twee lagen; in de bovenste laag worden de voorkeuren en invloeden van de actoren gemodelleerd, en in de onderste laag wordt het transportsysteem gemodelleerd. De bovenste laag bepaalt de optimale beprijzingsstrategie voor het gehele systeem, alsmede de winstverdeling tussen actoren met behulp van een speltheoretisch *transferable utility game* (TU-spel). Hierin wordt naar de beste strategie van verschillende coalities gekeken om een uiteindelijke winstverdeling te bewerkstelligen waarmee alle actoren tevreden zijn. In de onderste laag wordt gezocht naar een gebruikers-/reizigersevenwicht conditioneel aan een bepaalde beprijzingsstrategie. De interactie tussen vraag en aanbod staat hierin centraal. Figuur 1 laat de relatie tussen de twee lagen zien. In de bovenste laag wordt een beprijzingsstrategie bepaald, welke vervolgens wordt geëvalueerd in de onderste laag – het transportmodel. De uitkomst hiervan zijn de berekende effecten, welke door de actoren gebruikt worden in hun doelstellingen en dus bij de bepaling van de beprijzingsstrategie.



Figuur 1: Hoofdmodelstructuur met twee lagen.

Om het nut van een dergelijke aanpak aan te tonen gebruiken we een casestudie van de Randstad waarin een kilometerheffing op alle wegen, een cordontolheffing om Amsterdam, en de treintarieven worden onderzocht door middel van een transportmodel. Hierbij zijn respectievelijk de nationale overheid, de Amsterdamse lokale overheid en de spoorwegen als actoren geïdentificeerd die elk een van de drie prijsmaatregelen bepaalt. Verder hebben ze alle drie een andere doelstelling. Ten eerste is er de nationale overheid die door middel van een kilometerheffing op alle wegen de sociale welvaart wil verbeteren. Het gemeentebestuur van Amsterdam wil de economische positie van de stad verbeteren door een cordontol te heffen. Tenslotte willen de spoorwegen het bedrijfsresultaat maximaliseren door de treintarieven te verhogen of te verlagen.

Vanuit een economisch perspectief zou men uitkomen in een efficiënte uitkomst wanneer alle individuen meedoen aan de onderhandelingen en er onbeperkt onderlinge transacties mogelijk zijn. Met die aanname is het voldoende om één actor met één doelstelling (sociale welvaart) en alle macht te beschouwen. In werkelijkheid zit echter niet iedereen aan de onderhandeltafel en worden groepen individuen vaak door overheden gerepresenteerd. In dat geval is het niet zo dat wanneer iedereen samenwerkt men per definitie uitkomt in een systeem optimum – waarin de sociale welvaart optimaal is. Bovendien is sociale welvaart de objectieve som van de belangen van iedereen samen, dat wil niet zeggen dat individuen of stakeholders daarbinnen ook hun optimum beleven. De welvaart kan in het optimale geval zeer scheef verdeeld zijn. En aangezien er geen ‘grand leader’ is die alles bepaalt, maar er meerdere instanties en individuen met macht bestaan – welke allen hun doelstelling optimaliseren -- is het uiteindelijke ‘systeem’ een resultaat van onderhandelingen. Hierbij zijn niet alle individuen even sterk vertegenwoordigd aan de onderhandeltafel waardoor de economisch gezien meest efficiënte uitkomst niet gerealiseerd wordt. Dit artikel tracht onder andere inzicht te geven in de mechanismen aan de onderhandeltafel. Hiermee wordt het mogelijk verfijnder inzicht te verkrijgen in de effectiviteit van prijsbeleid dan wanneer er slecht één doelstelling (i.e., sociale welvaart) geldt. In andere woorden: er wordt een ‘second-best’ oplossing onderzocht waarin de ‘first-best’ aanname dat er één actor is met één doelstelling (vanuit het perspectief dat ieder individu onderhandelt en er onbeperkt onderlinge transacties mogelijk zijn) wordt losgelaten en er invulling wordt gegeven aan de aanwezigheid aan de onderhandeltafel.

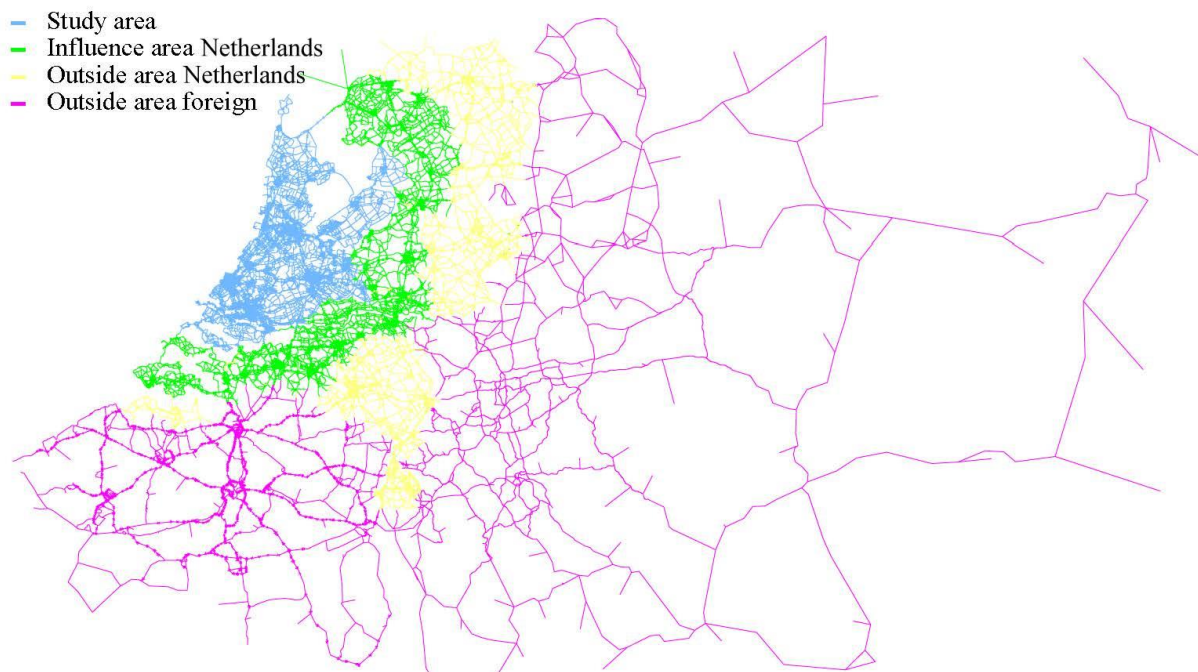
Dit artikel is als volgt opgebouwd. In sectie 2 beschrijven we de prijsmaatregelen en doelfuncties in detail. Een dergelijk complex modelsysteem vereist state-of-the-art methodes met een goede balans tussen realisme en (reken)efficiëntie. Het is bijvoorbeeld essentieel dat de reistijden en emissie-waardes die uit het transportmodel komen een plausibele weergave van de werkelijkheid geven. Aan de andere kant zijn er erg veel beprijzingsstrategieën mogelijk, waardoor er veel simulaties nodig zijn en korte rekentijden dus gewenst zijn. In sectie 3 wordt het onderliggende

transportmodel toegelicht waarin gebruik wordt gemaakt van recent ontwikkelde methodes.

De inleiding op de casestudie in sectie 2 geeft inzicht in wat we willen bereiken met de nieuwe speltheoretische aanpak. Sectie 4 bevat de grootste methodologische bijdrage van het paper, daarin wordt op generieke wijze een TU-spel opgezet voor mobiliteitsbeprijzingsvraagstukken met meerdere actoren. De basis hiervoor zijn mogelijke resultaten voor coalities (d.w.z., samenwerkingsverbanden tussen actoren). Er wordt een methode ontwikkeld op basis van Nash-evenwichten die leidt tot zogeheten coalitiewaardes; de uitdaging zit hier in het feit dat ook de actoren buiten de coalitie invloed uit kunnen oefenen. Met behulp van deze coalitiewaardes wordt er vervolgens gekeken naar de mogelijke winstverdelingen. Er worden drie verschillende bestaande oplossingsconcepten binnen TU-spellen gebruikt om zulke winstverdelingen te bepalen. Sectie 5 past deze theorie vervolgens toe op de casestudie en analyseert de resultaten van de drie prijsmaatregelen. Het artikel besluit met de conclusies in sectie 6.

## 2. Casestudie: Drie prijsmaatregelen in de Randstad

Zoals aangegeven in de inleiding richt deze studie zich op drie prijsmaatregelen in de Randstad. Het studiegebied wordt aangegeven in figuur 2.



*Figuur 2: Het studiegebied en het autonetwerk.*

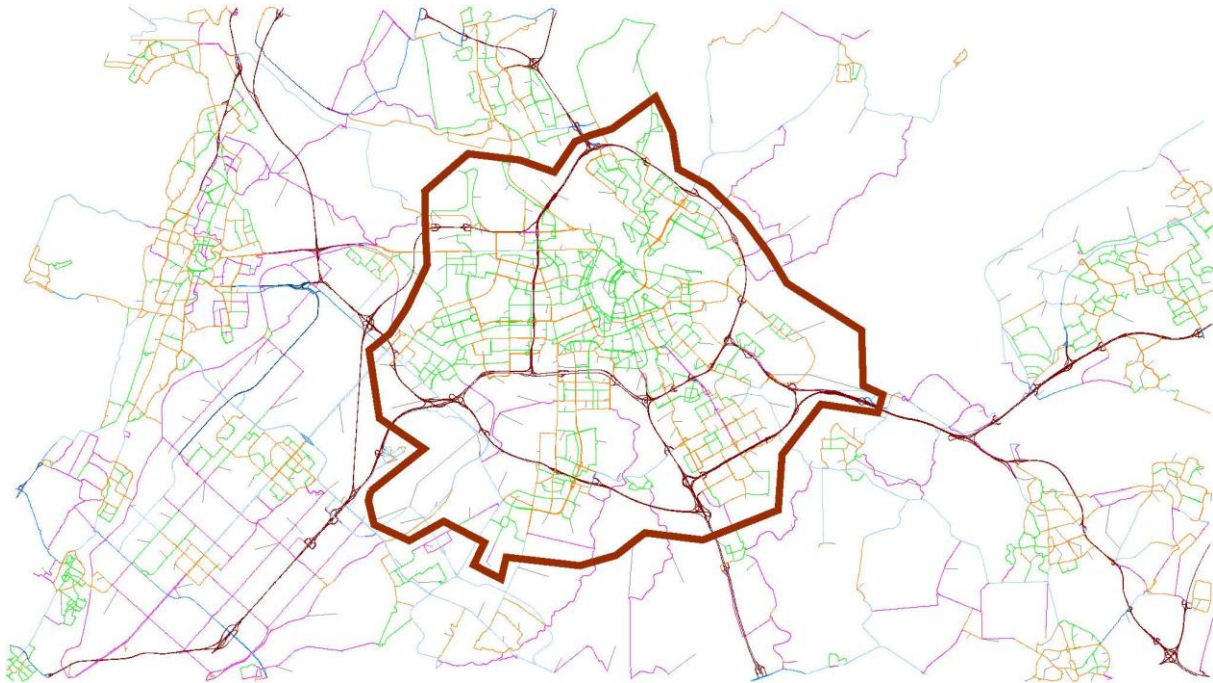
De casestudie richt zich op een ochtendspits in het jaar 2020. Onderscheid wordt gemaakt tussen de spits zelf en de schouder van de spits. Voor forenzen wordt de vervoerswijze, reisperiode (spits of schouder) en route gemodelleerd. Op het wegennetwerk worden de files en de zwaarte van de files nauwkeurig bepaald. Als basis zijn de gekalibreerde matrix en het wegennetwerk van het Nederlands Regionaal Model west (NRM-west) gebruikt; het blauwe gebied in figuur 2 is het studiegebied. Er zijn 3.608 zones, waarvan 2.122 zich binnen het studiegebied bevinden. In het gebruikte wegennetwerk zitten 87.504 links. Het treinnetwerk wordt enkel indirect meegenomen door de reistijden en -kosten uit het NRM-west over te nemen. De berekende effecten worden altijd bepaald op basis van reizen van en naar het studiegebied. We

onderscheiden drie vervoerswijzen: auto, trein en thuisblijven; waarbij het thuisblijfalternatief als een dummy-vervoerswijze moet worden beschouwd. Verder zijn er twee periodes waarbinnen gereisd kan worden: de spits en de schouder van de spits. De forenzen zijn opgedeeld in twee gebruikersklassen, de ene heeft een voorkeur om binnen de spits te reizen en de andere heeft geen voorkeur met betrekking tot het vertrektijdstip. Sectie 3 gaat nader in op hoe de vervoerswijze, reisperiode en route keuze gemodelleerd worden in combinatie met het verkeersafwikkelingsmodel.

De drie actoren hebben elk hun eigen prijsmaatregel om hun doelstelling te bereiken. Deze doelstelling wordt gemodelleerd met een doelfunctie die een gewogen combinatie van effecten is, welke uit het onderliggende transportmodel kunnen worden afgeleid. Om een TU-spel te kunnen definiëren, moet er worden aangenomen dat er onderlinge uitbetalingen mogelijk zijn, daarom is elk van de doelfuncties gemonetariseerd. Met onderlinge uitbetalingen wordt bedoeld dat financiële transacties tussen de actoren zijn toegestaan.

De nationale overheid beschouwt een kilometerheffing welke van toepassing is op alle wegen. Tijdens de spits en de schouder kunnen verschillende kilometertarieven gelden, waarbij het spitstarief altijd hoger is dan het schoudertarief. Het spitstarief, geschreven als KM-ON, en het schoudertarief, geschreven als KM-OFF, kunnen elk €0,00, €0,05 of €0,10 zijn. Er wordt vanuit gegaan dat er on-board technologie beschikbaar is om de heffing te innen. De doelfunctie van de nationale overheid is sociale welvaart  $f_{gov}$ , welke de volgende componenten bevat:

- **Het verwachte maximale nut van elke forens.** De nutsfunctie voor elk alternatief, zoals in de volgende sectie gedefinieerd, is geconverteerd zodat deze euro's als eenheid heeft. Deze omvat zowel normale reistijd, vertraging en reiskosten. Omdat reizen een disnut met zich meebrengt zal dit een negatieve waarde hebben. De baten van de verplaatsing worden overigens impliciet meegenomen omdat er een thuisblijfalternatief is waarvoor een sterk disnut geldt.
- **Opbrengst kilometerheffing.** Wij nemen aan dat de inkomsten uit de kilometerheffing hergebruikt wordt in het transportsysteem. Bijvoorbeeld door andere heffingen, zoals de wegenbelasting of accijns, te verlagen. Aangezien de heffing negatief bijdraagt aan het verwachte maximale nut, zal de totale heffing uiteindelijk een neutrale invloed op de sociale welvaart hebben. Er wordt verondersteld dat het hergebruik van de opbrengsten geen gedragsverandering van de forenzen teweeg brengt.
- **Opbrengst cordontolheffing.** Als hierboven. Ondanks dat in deze casestudie het gemeentebestuur beslist over de tol, worden de opbrengsten hergebruikt in het transportsysteem. Daarom is ook de opbrengst van de tol neutraal ten opzichte van de sociale welvaart.
- **Totale emissies in het studiegebied.** Binnen het studiegebied worden de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, en PM<sub>10</sub> emissies van het wegverkeer gemodelleerd met het ARTEMIS model (zie Wismans (2012) voor meer informatie over dit emissiemodel). De schade per emissietype is als volgt: €26,6/ton CO; €25,-/ton CO<sub>2</sub>; €10,60/kg NO<sub>x</sub>; en €64,80/kg PM<sub>10</sub> (volgens de Bruyn et al., 2010, Tabel 50).
- **Totale waarde van verliezen voor overige reizigers.** Het keuzegedrag van niet-forenzen wordt buiten beschouwing gelaten. Dit is een kleine groep die exogeen is aan de keuzemodellen, maar die wel reistijd ervaart. Deze groep wordt echter niet meegenomen in het verwachte maximale nut zoals hierboven beschreven. Om dit te compenseren wordt de waarde van deze reistijden via deze aparte component meegenomen in de sociale welvaart (waardering conform Tabel 1).



Figuur 3: Locatie van het cordon om Amsterdam (in rood)

De lokale overheid in Amsterdam beschouwt een cordontol om de economische positie van de stad te verbeteren. Figuur 3 laat de locatie van het cordon zien. Er moet tol betaald worden bij het binnengaan van het cordon, bijvoorbeeld via elektronische tolpoortjes. De spitsol, geschreven als TOLL-ON, en de schouderol, geschreven als TOLL-OFF, kunnen elk €0, €4 of €8 zijn, waarbij hier ook geldt dat de prijs in de schouder niet hoger kan zijn dan in de spits. De doelfunctie, de economische positie  $f_{ams}$ , is bewust anders dan de sociale welvaart om een verschil in doelen tussen de nationale overheid en Amsterdam te creëren, en is opgebouwd uit de volgende componenten:

- **Bereikbaarheid: waarde van verliezen van verkeer richting Amsterdam.** Voor al het verkeer met een bestemming binnen Amsterdam wordt de vertraging gemonetariseerd. Aangezien de ochtendspits beschouwd wordt, is dit een goede indicatie voor de bereikbaarheid van de stad.
- **Schade van €15,- voor gemiste economische activiteit.** Wanneer forenzen besluiten thuis te werken betekent dit dat er minder activiteit in de stad is. Er zijn minder kantoren in gebruik en er worden geen uitgaven gedaan binnen de stad. De waarde van deze schade (€15,-) is een door de auteurs gemaakte grove schatting van dagelijkse lokale uitgaven. De schade wordt alleen gerekend voor reizigers met Amsterdam als bestemming.
- **Totale emissies binnen Amsterdam.** Er wordt €26,6/ton CO; €25,-/ton CO<sub>2</sub>; €10,60/kg NO<sub>x</sub>; en €64,80/kg PM<sub>10</sub> aan schade door emissies van het wegverkeer binnen Amsterdam gerekend (volgens de Bruyn et al., 2010, Tabel 50).

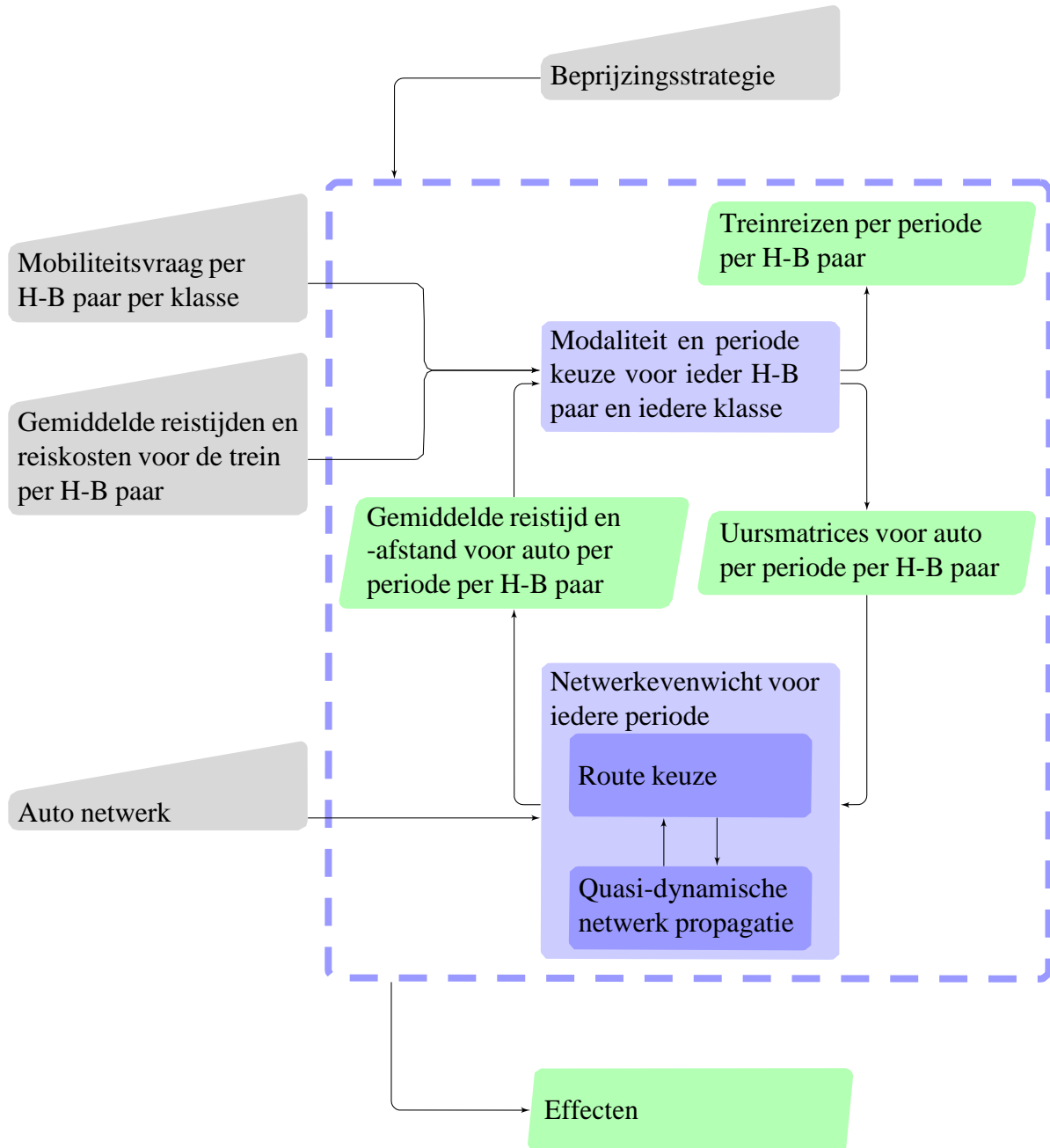
De spoorwegen beschouwen de treintarieven om het bedrijfsresultaat te verhogen. Het spitsstarief (FARE-ON) en het schouderstarief (FARE-OFF) kunnen elk met 20% verhoogd, dan wel verlaagd worden of gelijk blijven. Ook hier geldt dat het schouderstarief niet hoger kan zijn dan het spitsstarief. Het bedrijfsresultaat,  $f_{trein}$ , is opgebouwd uit de inkomsten uit kaartverkoop en de kosten per gereisde kilometer. Vanuit de aanname dat er restcapaciteit is in de schouder en dat het creëren van capaciteit in de spits erg kostbaar is, zijn de marginale kosten per reizigerskilometer in de spits €0,14 en in de schouder €0,04.

### 3. Onderliggend transportmodel

Het doel van het onderliggende transportmodel is het berekenen van de effecten – die genoemd zijn binnen doelfuncties in de vorige sectie – op basis van een bepaalde beprijzingsstrategie. Zo'n strategie is gedefinieerd als het beprijzingschema dat een combinatie van prijsniveaus voor elk van de drie prijsmaatregelen is. Zoals eerder genoemd, zijn er drie vervoerswijze (auto, trein, thuisblijven), twee periodes (spits (07u00-09u00), schouder (04u00-07u00 & 09u00-12u00)), twee gebruikersklassen (voorkeur voor spits, geen voorkeur). De nadruk ligt op de consumptie van mobiliteit van de forenzen, daarom is er gekozen om bestemmingskeuze buiten beschouwing te laten. Dat betekent dat de focus op de korte-termijn keuzes voor vervoerswijze, periode (d.w.z., vertrektijdstip) en route ligt. Ondanks dat er geen bestemmingskeuze is, wordt met het thuisblijfalternatief wel de ritkeuze impliciet meegenomen. Omdat het model met kansen rekent, is het keuzemodel in staat om de situatie te modelleren dat reizigers ervoor kiezen om minder vaak naar Amsterdam te reizen, wat tot uitdrukking zou komen in een verhoogde kans op het kiezen van het thuisblijfalternatief. Grofweg bestaat het model uit twee iteratieve processen; het buitenste proces past een genest multiplicatief logit model toe voor de vervoerswijze en periode keuze, en het binnenste model bepaalt een netwerkevenwicht met routekeuze en verkeersafwikkeling. Figuur 4 geeft een overzicht van dit proces en toont ook de invoer en tussenliggende resultaten.

De mobiliteitsvraag is een matrix per gebruikersklasse en beschrijft de vervoersvraag van forenzen per periode per herkomst-bestemmingspaar (H-B paar). Deze zijn gebaseerd op de NRM-west spits matrix. Er wordt aangenomen dat tijdens de spits alle reizigers forenzen zijn. Buiten de spits is er ook restverkeer aanwezig. Om de matrices beter hanteerbaar te maken, zijn cellen met minder dan twee reizen per uur in de spits samengevoegd dusdanig dat de ruimtelijke structuur zo goed mogelijk behouden blijft. Daarnaast zijn de reizen met zowel hun herkomst als bestemming in het buitenland verwijderd.

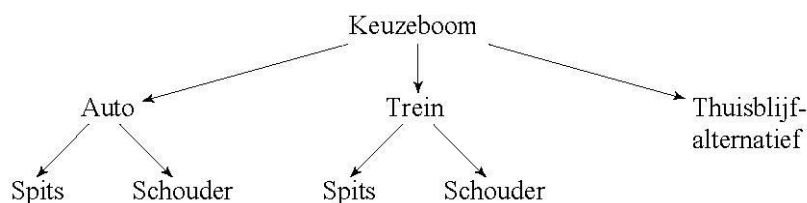
De weerstanden van de treinreizen zijn direct overgenomen uit het NRM-west. Dit zijn de voor- en natransporttijden, de wachttijd, de in-voertuigtijd en treinkosten. De invloed van de bezettingsgraad en andere aspecten van vraag-aanbod interactie wordt niet meegenomen. Dit betekent ook dat de routekeuze vast staat voor treinreizigers.



Figuur 4: Stroomschema onderliggend transportmodel

De vervoerswijze en periode keuze wordt simultaan gedaan met behulp van een genest multiplicatief logit discrete keuzemodel. Dit betekent dat in de nutsspecificatie het systematisch nut en de foutterm met elkaar vermenigvuldigd worden in plaats van opgeteld. Fosgerau en Bierlaire (2008) en Smits et al. (2014) bespreken deze modellen in detail. Het voordeel ten opzichte van traditionele (additieve) modellen is dat de spreiding van het nut (d.w.z., de standaard deviatie) afhangt van het systematische nut. Deze eigenschap is wenselijk bij netwerkmodellen waarin zowel korte als lange H-B paren voorkomen. Figuur 5 laat de neststructuur van het model zien, dat er voor zorgt dat de twee alternatieven (i.e., periodes) binnen een vervoerswijze aan elkaar gecorreleerd zijn. Merk op dat bij het thuisblijfalternatief geen periodekeuze mogelijk is en dat de routekeuze apart wordt gesimuleerd binnen het netwerkevenwicht model.





Figuur 5: Neststructuur van de simultane vervoerswijze- en periodekeuze.

Het systematisch nut is een lineaire combinatie van de verschillende reistijdcomponenten per alternatief, de reiskosten, en periode en/of vervoerswijze specifieke constanten. Zoals beschreven door Fosgerau en Bierlaire (2008) is het logisch om de parameter van reiskosten te normaliseren in multiplicatieve modellen zodat alle andere parameters interpreteerbaar zijn als 'willingness-to-pay'. Tabel 1 geeft de gebruikte reistijdwaarderingen aan per vorm van reistijd zoals deze terugkomen in de nutfuncties van de reizigers. Er zijn specifieke constanten (penalty's) gebruikt voor reizen met de auto, het thuisblijfalternatief, en voor reizen in de schouder. Er zijn geen penalty's voor reizen met de trein of binnen de spits. Deze penalty's zijn samen met de schaalparameters gekalibreerd met marktaandeelen voor de gebruikersklasse met een voorkeur voor de spits binnen het nul-scenario (i.e., zonder prijsmaatregelen). Dit heeft geleid tot een penalty van €1,51 voor het reizen met de auto; we hebben getest op een penalty voor de trein i.p.v. auto, maar dit werd - waarschijnlijk door de hogere reistijdwaarderingen voor de trein - verworpen. De penalty voor het thuisblijfalternatief is €29,91. De penalty voor reizen in de schouder is €3,21, deze geldt enkel voor de gebruikersklasse met een voorkeur voor de spits. De vaste kosten voor reizen met de auto zijn €0,0797 per kilometer. De basiskosten voor de trein zijn uit het NRM-west afgeleid.

Tabel 1: Gebruikte reistijdwaarderingen (in € per uur)

Waardering	Beschrijving
9,25	Reistijd in de auto tijdens free-flow verkeer (uit Warffemius, 2013).
14,25	Reistijd in de auto tijdens congestie. Op basis van factor 1,54 t.o.v. free-flow reistijd (Abrantes, 2011, Tabel 13).
11,50	In-voertuigtijd in de trein (uit Warffemius, 2013).
26,74	Wachttijd voor de trein. Op basis van factor 2,32 t.o.v. in-voertuigtijd (Abrantes, 2011, Tabel 14)
16,45	Reistijd van het voor- en natransport van de trein. Op basis van factor 1,43 t.o.v. in-voertuigtijd (Abrantes, 2011, Tabel 13)

Het netwerkevenwicht wordt voor elke periode bereikt door te itereren tussen routekeuze en zogenoemde quasi-dynamische netwerkpropagatie. Tussen deze modellen worden de vraag per route en de reistijd per route uitgewisseld. Voor de routekeuze wordt een standaard multinomiaal logit model gebruikt, in totaal worden er 839.138 routes gebruikt. De quasi-dynamische netwerkpropagatie is het recent ontwikkelde STAQ model (Bliemer et al., 2012; Bliemer et al., 2014) dat is gekozen vanwege de balans tussen realisme en efficiëntie. Knelpunten worden op kruispunten geïdentificeerd waar het aanbod niet aan de vraag kan voldoen, en files vormen zich volgens eerste orde verkeersstroomtheorie achter deze punten. In tegenstelling tot een volledig dynamisch model, wordt de gemiddelde situatie per periode berekend in plaats van de volledige fileopbouw en -afbouw en de daarbij behorende dynamische reistijden. Voor onze toepassing is dit voldoende nauwkeurig omdat de files voor de knelpunten worden geplaatst en de snelheid binnen de files varieert. Hierdoor zullen de gerapporteerde emissies en reistijden realistischer zijn dan bij het gebruik van statische toedelingsmodellen, waarbij de files in de knelpunten staan en dus onmogelijk de juiste ruimtelijke dimensie hebben.

## 4. Speltheoretische aanpak voor meerdere actoren

In deze sectie introduceren we de theorie die gebruikt wordt om de interactie tussen verschillende actoren te analyseren. De basis hiervoor is coöperatieve speltheorie en in het bijzonder transferable utility games (TU-spellen), zie Peters (2008) en Branzei et al. (2008) voor meer uitgebreide inleidingen op dit onderwerp. We definiëren een coalitie als een verzameling actoren die samenwerken; in de casestudie zijn acht coalities mogelijk. De *grote coalitie*  $N = \{\text{gov}, \text{ams}, \text{trein}\}$  met daarin alle actoren, drie coalities met twee actoren, drie 'coalities' met één actor, en de lege coalitie. (De lege coalitie is in de casestudie niet relevant, maar dient formeel te worden meegenomen voor het TU-spel.) In een TU-spel wordt aan elke coalitie een bepaalde waarde – het hoogst haalbare gecombineerde resultaat – toegekend; de waarde voor coalitie  $C \subseteq N$  wordt gedefinieerd door functie  $v(C)$ . Een standaardvoorbeeld ter illustratie van deze waarde zijn twee koopmannen die ieder een partij linker respectievelijk rechter handschoenen hebben. Een 'coalitie' met één koopman heeft waarde nul omdat hij niets kan verkopen, maar de coalitie met beide koopmannen heeft een waarde gelijk aan de verkoopwaarde van de handschoenen, omdat ze deze als coalitie nu in paren kunnen verkopen. Het bepalen van de waarde van een coalitie bij het beprijzingsvraagstuk met meerdere actoren is een stuk minder triviaal. In deze sectie beschrijven we eerst hoe met behulp van Nash evenwichten de waarde van een coalitie kan worden bepaald, en vervolgens bespreken we oplossingen van het hiermee gedefinieerde TU-spel.

### 4.1 De waarde van een coalitie

De waarde van een coalitie in dit paper is gebaseerd op de haalbare waarden van de doelstellingsfuncties van de actoren bij het invoeren van beprijzingsmaatregelen. Bij de bepaling van de waarde van een coalitie wordt de 'onderhandelingspositie' van alle actoren meegenomen. Een aantal schijnbaar-haalbare doelwaardes voor een coalitie kan namelijk niet in de praktijk gerealiseerd worden omdat de actoren buiten de coalitie deze kan beïnvloeden. Hieronder bespreken we hoe hier mee omgegaan dient te worden.

In het vervolg korten we de actoren af met gov, ams en trein. In de vorige sectie is voor elke actor een monetaire doelfunctie gedefinieerd, en in deze studie gebruiken we het verschil in waarde t.o.v. het nul-scenario:  $f_{\text{gov}}, f_{\text{ams}}, f_{\text{trein}}$  zijn ieder nul wanneer er geen prijsmaatregelen zijn. De prijsmaatregelen hebben elk een eindig aantal mogelijke prijsniveaus. Noteer de verzameling van alle mogelijke combinaties van KM-ON, KM-OFF, TOLL-ON, TOLL-OFF, FARE-ON, FARE-OFF met  $\Pi$ ; dan is  $\pi \in \Pi$  een beprijzingsschema. In de casestudie zijn er 216 mogelijke beprijzingsschema's. Merk op dat het onderliggende transportmodel een schema  $\pi$  uitzet naar  $f_{\text{gov}}, f_{\text{ams}}, f_{\text{trein}}$ . Het resultaat van een coalitie  $C$  is de som van de doelfuncties  $\sum_{a \in C} f_a$  en verschilt dus per beprijzingsschema. Bijvoorbeeld, het resultaat voor de coalitie {gov,trein} bij invoering van een hoge kilometerheffing en verlaging van de treintarieven is de som van de (naar zal blijken) toename in sociale welvaart en het sterke verlies van de spoorwegen. De uiteindelijke waarde  $v(C)$  die aan een coalitie  $C$  wordt toegekend, is het minimaal haalbare resultaat over alle beprijzingsschema's waarbij aan een aantal condities is voldaan. Er moet namelijk gelden dat geen enkele (buitenstaande) actor het resultaat van een coalitie kan voorkomen; dat betekent dat de coalitie uit een partitie  $P$  van alle actoren moet komen waarbij er een evenwicht is. Hierbij is een partitie  $P$  van alle actoren een opdeling van de actoren in een of meerdere coalities, bijvoorbeeld  $\{\{\text{gov}, \text{trein}\}, \{\text{ams}\}\}$  waarin gov en trein samenwerken, maar ams niet; in dit voorbeeld zetten gov en trein gezamenlijk maatregelen in ten behoeve van hun beide doelfuncties (i.e., ze optimaliseren  $f_{\text{gov}} + f_{\text{trein}}$ ), terwijl ams enkel maatregelen inzet gericht op de

eigen doelfunctie. Wanneer we hierbij een waarde voor coalitie  $\{gov,trein\}$  bepalen moet er rekening worden gehouden met het feit dat ams de sociale welvaart en het bedrijfsresultaat van de spoorwegen kan beïnvloeden met de cordonheffing. Daarom definiëren we nu stabiliteit en het Nash-evenwicht waaruit vervolgens de waarde van een coalitie bepaald kan worden.

Definitie (*stabiliteit*): Een beprijzingsschema  $\pi$  is *stabil* voor coalitie  $C$  wanneer de gecombineerde doelfunctie van  $C$  niet verbeterd kan worden door de prijsniveaus van een of meerdere maatregelen van actoren binnen  $C$  te veranderen.

Een stabiel beprijzingsschema voor een coalitie  $C$  kan ook (lokaal) optimaal genoemd worden. Bij stabiliteit wordt er enkel naar de actoren binnen  $C$  gekeken, maar zoals hiervoor beschreven heeft een actor buiten de coalitie ook invloed op de doelwaardes van de actoren binnen de coalitie. De definitie van het Nash-evenwicht zorgt ervoor dat er binnen het 'hele systeem' geen actor meer is die zijn prijsbeleid wil aanpassen.

Definitie (*Nash-evenwicht*): Een beprijzingsschema  $\pi$  is een *Nash-evenwicht* voor partitie van actoren  $P$  wanneer  $\pi$  stabiel is voor alle coalities  $C \in P$ .

Merk op dat er meerdere Nash-evenwichten kunnen zijn. Voor elke partitie is er minimaal één Nash-evenwicht. Daarnaast zijn er meerdere partities mogelijk welke ieder weer meerdere Nash-evenwichten kunnen bevatten. Om een goede definitie van een waarde van een coalitie te definiëren dient er uit alle Nash-evenwichten binnen én tussen partities gekozen te worden. Het ligt voor de hand om binnen een partitie voor de waarde van een coalitie het minimum over alle Nash-evenwichten te gebruiken, omdat de actoren buiten de coalitie naar dit evenwicht kunnen sturen met behulp van hun maatregelen. Ook tussen partities wordt het minimum genomen omdat de coalitie geen invloed uit kan oefenen op de coalitievorming van de overige partijen. (e.g., voor het bepalen van  $v(\{gov\})$  dient zowel partitie  $\{\{gov\},\{ams\},\{trein\}\}$  als  $\{\{gov\},\{ams,trein\}\}$  beschouwd te worden). Dit leidt tot de volgende definitie van de waarde van een coalitie  $C$ :

$$v(C) = \min_{\{P|C \in P \wedge P \text{ is een partitie van } N\}} \min_{\pi \in \Pi} \sum_{a \in C} f_a \quad (1)$$

dusdanig dat  $\pi$  een Nash-evenwicht is voor  $P$

Merk op dat de waarde van de lege coalitie nul is, en dat de waarde van de grote coalitie  $v(N)$  gelijk is aan de maximale som van alle doelfuncties over beprijzingsschema's.

Merk op dat het huidige raamwerk werkt met discrete prijsniveaus en dat continue prijsniveaus niet direct kunnen worden ingevoerd. Het is echter wel mogelijk definitie (1) toe te passen op continue prijsniveaus, maar aangezien het onderliggende transportmodel een simulatiemodel is, en dus geen analytisch model, zal het gedefinieerde wiskundige probleem praktisch onoplosbaar zijn. Er kan derhalve ook niet worden bepaald hoe dicht de oplossing tegen een continue analyse aanligt; dat kan enkel door de discretisatie fijnmaziger te maken.

## 4.2 Oplossingsconcepten

Met de coalitiewaardes van vergelijking (1) is een compleet TU-spel gedefinieerd, dit zijn de bouwstenen van een generiek TU-spel waarvoor een breed scala aan literatuur bestaat. Alhoewel de Nash-evenwichten die leiden tot coalitiewaardes houvast biedt voor realistische beprijzingsschema's, is hiermee niet direct een unieke oplossing voor een TU-spel vast te stellen. Zo'n oplossing wordt gegeven door een winstverdeling, waarbij  $x_a$  de winst is voor actor  $a$  (in het Engels wordt hiervoor de term *payoff* gebruikt). Hiervoor zijn meerdere oplossingen mogelijk. Bij een TU-spel wordt altijd het beprijzingsschema  $\pi^*$  'uitgespeeld' dat  $v(N)$  bepaalt, dat is het prijsbeleid wat bepaald wordt door samenwerking tussen alle actoren. Hierbij is  $v(N)$  de hoogst mogelijke som van alle doelfuncties. Bij de uiteindelijke uitbetaling betaalt of ontvangt

actor  $a$  een bedrag van  $x_a - f_a^*$  van/aan de andere actoren, waarbij  $f_a^*$  bepaalt wordt door de doelfuncties horend bij beprijzingsschema  $\pi^*$ , zodat elke actor een dusdanig bedrag betaalt of ontvangt zodat de winstverdeling wordt bereikt. In andere woorden, een oplossingsconcept bepaalt hoe 'taart'  $v(N)$  verdeelt wordt onder de actoren (waarbij  $v(N)$  overigens altijd gebruikt wordt omdat dat per definitie de grootste totale waarde(/taart) is). Bij TU-spellen bestaat dé oplossing (i.e., dé winstverdeling) niet; dit komt door de interactie tussen de actoren en de verschillende waarden van de coalities. Bovendien is het mogelijk dat er geen enkele winstverdeling is waarbij alle actoren akkoord kunnen gaan.

We bespreken hier drie verschillende oplossingsconcepten voor TU-spellen om zodoende richting te geven aan een oplossing voor het beprijzingsvraagstuk. We beschouwen de *kern*, de *Shapley-waarde*, en de *compromis-waarde*. De kern is een breed oplossingsconcept omdat deze een verzameling winstverdelingen die aan een aantal basiseigenschappen voldoet definieert (en hier dus geen keuze uit maakt). De overige twee oplossingsconcepten bepalen de waarden van specifieke winstverdelingen. De *nucleolus* is een ander oplossingsconcept voor TU-spellen. Echter, de berekening ervan is erg lastig (zie Guajardo en Jornsten, 2014) en de interpretatie is abstract, daarom achten wij dit concept niet toepasbaar voor het beprijzingsvraagstuk.

- **Kern.** Wanneer een winstverdeling in de kern van een TU-spel zit, betekent het min of meer dat deze winstverdeling 'realiseerbaar' is omdat er geen eenvoudige argumenten zijn voor een actor of coalitie om bezwaar te maken. Een winstverdeling behoort tot de kern van een TU-spel wanneer deze efficiënt is en stabiel is ten opzichte van coalitie-dissidentie (dit is een andere stabiliteit dan de eerder gedefinieerde stabiliteit van beprijzingsschema's). Hierbij betekent efficiëntie dat de som van opbrengsten gelijk is aan de waarde van de grote coalitie (d.w.z.,  $\pi^*$  wordt uitgespeeld; de hele taart wordt verdeeld), en de stabiliteit ten opzichte van coalitie-dissidentie dat er geen coalitie is die bezwaar maakt tegen de winstverdeling (i.e., geen enkele coalitie kan uit de grote coalitie stappen omdat de winst toegekend aan deze coalitie lager is dan ze gezamenlijk kunnen bereiken). De kern is

$$\left\{ \{x_a\}_{a \in N} \mid \sum_{a \in N} x_a = v(N), \sum_{a \in C} x_a \geq v(C), \forall C \subset N \right\}. \quad (2)$$

- **Shapley-waarde.** De Shapley waarde is een winstverdeling op basis van wat een actor aan al bestaande coalities kan toevoegen. Het is dus een concept dat tot één enkele oplossing leidt. Aan elke actor wordt het gemiddelde van de marginale bijdrages, over verschillende volgordes waarin actoren toetreden tot de coalitie, toegekend. De marginale bijdrage is de extra waarde die een actor meebrengt wanneer deze aan een coalitie toegevoegd wordt, i.e.,  $v(C) - v(C \setminus \{a\})$  is de marginale bijdrage van actor  $a$  aan coalitie  $C$ . Voor de Shapley-waarde wordt de gemiddelde marginale bijdrage bepaald voor elke permutatie van alle actoren. Permutaties zijn unieke volgordes waarbij actoren één voor één worden toegevoegd aan een coalitie. Op deze manier kan op  $|N|!$  verschillende manieren de grote coalitie worden gevormd. De Shapley-waarde is uniek.

Bij het beprijzingsvraagstuk is de marginale bijdrage van een actor aan een coalitie niet direct intuïtief omdat de waarde van een coalitie van een Nash-evenwicht afkomstig is waar per definitie alle actoren reeds bij betrokken zijn. Wanneer men de marginale bijdrage verbindt aan de definitie in vergelijking (1), valt ten eerste op dat de marginale bijdrage van een actor afhangt van de orde van grootte van zijn doelstelling. Ten tweede kan men inzien dat de marginale waarde van een actor ook versholven zit in de externe invloed die deze kan uitoefenen. Door een actor toe te voegen aan een coalitie vervalt potentieel de partitie waarin deze actor de coalitie naar de minimale doelwaarde(s) dwong.

- **Compromis-waarde.** De compromis-waarde is een winstverdeling waarbij elke actor het binnen zijn eigen referentiekader even 'goed' doet – dat wil zeggen dat binnen de verdeling

iedere actor dezelfde positie t.o.v. het zijn best en slechts haalbare resultaat heeft. Hiervoor wordt voor elke actor een boven- en ondergrens bepaald voor een winsttoekenning die logischerwijs onderhandelbaar is. De bovengrens voor actor  $a$  wordt bepaald door naar de marginale bijdrage te kijken wanneer deze als laatste toegevoegd wordt aan de grote coalitie, i.e.,  $v(N) - v(N \setminus \{a\})$ ; dit is het best mogelijke resultaat omdat wanneer de actor  $a$  meer eist, coalitie  $N \setminus \{a\}$  zich af kan scheiden. Voor de ondergrens wordt voor elke mogelijke coalitie gekeken hoeveel er voor een actor over is als alle andere spelers het hoogst haalbare - hun bovengrens - hebben geclaimd. Het maximum hierover is de ondergrens. Ter intuïtie: stel bij deze ondergrens voor dat een actor kiest met wie hij aan tafel gaat zitten, ze samen bekijken hoeveel er te verdelen is, dat de overige partijen hun maximale portie (op basis van hun bovengrens) krijgen, en dat de actor de rest neemt. Die 'rest' is dus altijd haalbaar door middel van onderhandeling voor de actor omdat de overige partijen 100% tevreden zijn. Tenslotte is de compromiswaarde de unieke en gelijke convexe combinatie van de boven- en ondergrenzen voor iedere actor dusdanig dat de winstverdeling efficiënt is. Wanneer bijvoorbeeld het bereik van actor A en actor B respectievelijk  $[0,10]$  en  $[10,20]$  zijn en het budget is 14, dan komen beide partijen op 20% van hun bereik uit: actor A krijgt 2; actor B krijgt 12. De compromiswaarde is uniek. In de literatuur is de compromis-waarde ook bekend als de  $\tau$ -waarde (Tijs, 1981; Tijs en Otten, 1993).

## 5. Analyse casestudie

Voor alle 216 mogelijke beprijzingsschema's is het onderliggende transportmodel gesimuleerd; de rekentijd om tot een gebruikersevenwicht te komen was ongeveer 23 uur per schema (drie schema's parallel mogelijk op: Intel i5 3.2 GHz, 16GB RAM). Ten eerste kijken we naar de resultaten wanneer slechts één van de actoren actief is. Tabellen 2 t/m 4 laten voor elk van de actoren zien wat het effect van hun prijsmaatregel op de doelfunctie is. Merk nogmaals op dat de getoonde resultaten relatief aan het nul-scenario zijn.

Tabel 2: Sociale welvaartswinst studiegebied bij invoering kilometerheffing (in k€)

KM-ON→ KM-OFF↓	€0,00	€0,05	€0,10
€0,00	0	901	1.161
€0,05	-	572	1.202
€0,10	-	-	795

Tabel 3. Verbetering economische positie Amsterdam bij invoering cordonheffing (in k€)

TOLL-ON→ TOLL-OFF↓	€0,00	€4,00	€8,00
€0,00	0	68	47
€4,00	-	47	69
€8,00	-	-	51

Tabel 4. Bedrijfsresultaat spoorwegen bij aanpassing prijzen (in k€)

FARE-ON→ FARE-OFF↓	-20%	+0%	+20%
-20%	-174	2	130
+0%	-	0	139
+20%	-	-	135

Voor elk van de actoren is het gunstig om een tijd-gedifferentieerde prijsmaatregel in te voeren. De nationale overheid kan het beste een kilometerheffing van 10 eurocent in de spits en 5 eurocent in de schouder heffen. Voor Amsterdam geldt dat 8 euro tol in de spits en 4 euro in de schouder de grootste verbetering in de economische positie oplevert. Tenslotte kunnen de spoorwegen hun bedrijfsresultaat maximaliseren door de prijs met 20% te verhogen in de spits. Over het algemeen kan dus worden geconcludeerd dat een tijd gedifferentieerde prijs beter is dan een constante prijs. De voornaamste reden hiervan is dat de restcapaciteit in de schouder benut wordt door zulke maatregelen. Deze resultaten laten echter niet zien wat de resultaten zijn wanneer de maatregelen naast elkaar worden ingevoerd.

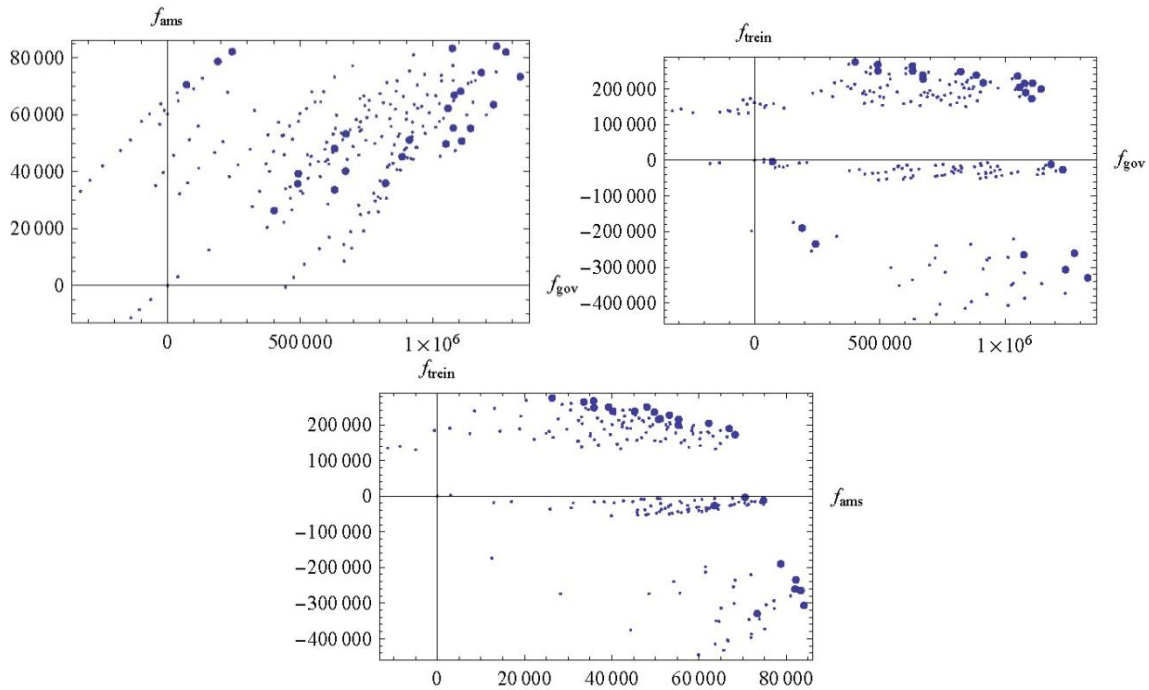
In tabel 5 staat een overzicht van interessante beprijzingsschema's, hierin zijn alle schema's opgetekend waarin het maximum van een van de doelfuncties wordt behaald of waarin Nash-evenwicht is. Horizontaal staan achtereenvolgens de instellingen van de beprijzingsschema's (kolommen 1 t/m 6), de waarden van de (gecombineerde) doelstellingsfuncties (kolommen 7 t/m 13) en de stabiliteit per coalitie. Op de eerste rij staat het schema  $\pi^*$  dat wordt uitgevoerd wanneer er samenwerking is - het Nash-evenwicht van de grote coalitie - en de totale winst wanneer er een efficiënte winstverdeling plaatsvindt (i.e., dan wordt er 1.397 k€ verdeeld); in de volgende sectie gaan we verder in op de mogelijkheden voor de winstverdeling. Op de tweede rij staat onder andere het Nash-evenwicht waarbij er competitie is tussen alle actoren; wanneer er dus geen enkel overleg of geen enkele samenwerking plaatsvindt (i.e., wanneer TU-speltheorie volledig buiten beschouwing gelaten wordt) is deze beprijzingsstrategie het resultaat. Het valt op dat (1) het enige strategische verschil tussen deze twee oplossingen het treintarief in de schouder is en (2) dat er geen cordonheffing rondom Amsterdam is. Dit laatste komt doordat er al een grote verbetering wordt gemaakt in de economische positie met enkel een kilometerheffing; met een aanvullende cordontol is de verdere reistijdverbetering niet rendabel ten opzichte van het economische verlies door een toename aan thuisblijvers.

Tabel 5 laat zien dat enkel de beprijzingsschema's beschreven in de eerste vier rijen voor het TU-spel worden gebruikt, omdat alleen daarin Nash-evenwichten voorkomen die noodzakelijk zijn en bepalend zijn voor de waarde van een coalitie. Merk op dat het minimum in vergelijking (1) alleen over de (onderstreepte) Nash-evenwichten gaat, en dat in dit geval alleen voor coalities {gov} en {ams} het minimum over partities daadwerkelijk verschillende beprijzingsschema's betreft (respectievelijk over rij 2&4 en rij 2&3); voor coalitie {trein} is rij 2 voor beide mogelijke partities het Nash-evenwicht en de andere coalities komen slechts in één partitie voor.

Tabel 5: Overzicht van belangrijke beprijzingsschema's met doelfuncties en indicatie van stabiliteit per coalitie d.m.v. vinkjes. Groene cellen geven het maximum over alle beprijzingsschema's aan per doelfunctie. Onderstreepte coalities geven schema's in Nash-evenwicht voor bepaalde partities aan. Blauwe cellen zijn de waardes van de coalities (welke dikgedrukt zijn en bepaald zijn door het minst voordelige Nash-evenwicht van die coalitie via vergelijking (1)) voor het TU-spel. \*: zowel voor partitie {{gov},{ams},{trein}} als {{gov,ams},{trein}} geldt hier een Nash-evenwicht.

KM-ON (in €)	KM-OFF (in €)	TOLL-ON (in €)	TOLL-OFF (in €)	FARE-ON (factor)	FARE-OFF (factor)	Sociale welvaart (in k€)	Economische positie Amsterdam (in k€)	Bedrijfsresultaat spoorwegen (in k€)	Welvaart + Econ. pos. (in k€)	Welvaart + Bedr.res. (in k€)	Econ. pos. + Bedr.res. (in k€)	Grote Totaal (in k€)	Schema stabiel voor coalitie?						
													{gov}	{ams}	{trein}	{gov,ams}	{ams,trein}	{gov,trein}	{gov,ams,trein}
0.1	0.05	0	0	1.2	0.8	1143	55	199	1198	1342	254	1397	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓
0.1	0.05	0	0	1.2	1	1109	<u>51</u>	<u>216</u>	<u>1160</u>	1325	266	1376	✓*	✓*	✓*	✓*	✗	✗	✗
0.1	0.05	4	4	1.2	0.8	1077	55	215	1132	<u>1292</u>	270	1347	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗
0.1	0	4	4	1.2	1	<u>1057</u>	62	204	1119	1261	<u>267</u>	1324	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗
0.1	0.05	0	0	0.8	0.8	1330	73	-330	1403	1000	-256	1074	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗
0.1	0	4	4	0.8	0.8	1240	84	-307	1324	934	-223	1018	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
0.1	0.1	8	4	1.2	1	491	36	267	527	758	303	794	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗
0.1	0.1	8	8	1.2	1	402	26	275	428	677	302	703	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗

In figuur 6 worden de doelfuncties voor alle beprijzingsschema's afgebeeld met spreidingsdiagrammen van steeds twee doelfuncties (merk op dat deze analyse los staat van het TU-spel). Ook zijn hierin de Pareto-optimale oplossingen getoond welke punten zijn waarin geen enkele actor beter af kan zijn zonder dat een andere actor slechter af is. Dit zogeheten Pareto-front houdt - in tegenstelling tot het Nash-evenwicht - geen rekening met op welke prijsmaatregelen de actoren invloed hebben. Het schetst echter wel een beeld van 'goede' oplossingen. Bij drie variabelen is het Pareto-front een 'vlak' in de drie-dimensionale ruimte; figuur 6 biedt hier het voor-, zij-, en bovenaanzicht van. Merk op dat voor  $f_{trein}$  er steeds drie groepen van punten geïdentificeerd kunnen worden, deze worden bepaald door de drie verschillende treintarieven in de spits. Verder zijn  $f_{gov}$  en  $f_{ams}$  positief gecorreleerd met elkaar, terwijl  $f_{trein}$  negatief is gecorreleerd met beide andere doelfuncties. Een negatieve correlatie wijst op conflicterende belangen. Dit is ook duidelijk in tabel 5 waar het schema met de maximale sociale welvaart een zwaar verlies voor de spoorwegen betekent en vice versa.

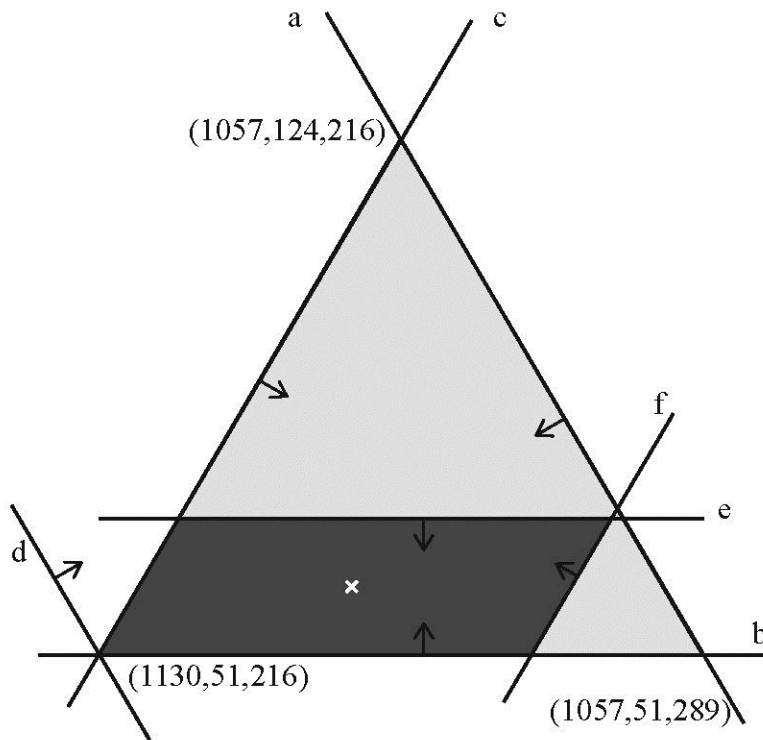


Figuur 6: Verband tussen doelfuncties van steeds twee actoren. Grote stippen zitten in het Pareto-front (op basis van alle drie de actoren). Er zijn in totaal 26 Pareto-optimale oplossingen.

### 5.1 Coöperatieve oplossingsconcepten voor de casestudie

Zoals eerder genoemd is een oplossing van een TU-spel een (beprijzingsstrategie met bijbehorende) winstverdeling  $(x_{gov}, x_{ams}, x_{trein}) \in \mathbb{R}^3$ . Bij exact drie actoren kan de kern elegant in een vlak worden weergegeven. Hiervoor wordt de doorsnede van  $\mathbb{R}^3$  bekeken met efficiënte winstverdelingen. Dit is gedaan in figuur 7, daarin zijn de ‘coalitie-dissidentie-constraints’ die elk  $\mathbb{R}^3$  in tweeën verdelen (zie vergelijking (2)) aangegeven met gelabelde lijnen. De lichtgrijze driehoek, bepaald door lijnen a, b en c, wordt ook wel de verzameling imputaties genoemd, in elk van de hoekpunten hiervan heeft steeds één actor de maximale winst en de andere twee actoren hun minimale winst; die winstverdelingen worden weergegeven met  $(x_{gov}, x_{ams}, x_{trein})$ . In deze casestudie hebben we dus te maken met een niet-lege kern, wat betekent dat er stabiele winstverdelingen zijn. De Shapley-waarde  $(x_{gov}, x_{ams}, x_{trein}) = (1.093 \frac{1}{6}, 77 \frac{2}{3}, 226 \frac{1}{6})$  en de compromis-waarde  $(x_{gov}, x_{ams}, x_{trein}) \approx (1.093, 01; 77, 64; 226, 36)$  zijn bijna gelijk en ook weergegeven in de plot.





*Figuur 7: Doorsnede van  $\mathbb{R}^3$  van efficiënte winstverdelingen (waarvoor dus geldt  $x_{gov} + x_{ams} + x_{trein} = v(N)$ ), met daarin beperkingen voor de kern (gelabelde lijnen), de kern zelf (donkergrijs parallellogram), Shapley-waarde en compromis-waarde (witte kruis). De lichtgrijze driehoek is de zogenoemde verzameling imputaties, de winstverdeling van elk van de hoekpunten wordt weergegeven met  $(x_{gov}, x_{ams}, x_{trein})$ . De letters komen overeen met de volgende coalities:  $a=\{gov\}$ ,  $b=\{ams\}$ ,  $c=\{trein\}$ ,  $d=\{ams, trein\}$ ,  $e=\{gov, trein\}$ , en  $f=\{gov, ams\}$ .*

Zowel de Shapley-waarde als de compromis-waarde zijn afgeleid van axioma's of redeneringen waarbij een zo eerlijk mogelijke winstverdeling centraal staat. Voor de casestudie ligt de Shapley-waarde binnen de kern, dat is niet noodzakelijk voor algemene TU-spellen, maar wel wenselijk. Het feit dat de twee winstverdelingen zo dicht bij elkaar liggen, maakt deze winstverdeling erg sterk. Ze zijn respectievelijk op marginale bijdrages en gelijke positie ten opzicht van onder- en bovengrenzen bepaald. Wanneer we deze winstverdeling vergelijken met de werkelijk verkregen resultaten via de doelstellingen (Tabel 5, eerste rij) dan zien we dat dit betekent dat gov in totaal bijna 50 k€ per ochtendspits moet uitbetalen aan de andere actoren (23 k€ aan ams; 27 k€ aan trein). Een aantal andere eigenschappen voor dit beprijzingsschema t.o.v. het nul-scenario is dat het aantal verliesuren met 60% in de spits en met 45% overall is afgenomen, de totale emissies in het studiegebied met ongeveer 6% zijn afgenomen, dat thuisblijven met 60% toeneemt, en dat er 58% meer forenzen met de trein reizen.

## Conclusies

In deze studie hebben we gekeken hoe het beprijzen van mobiliteit door meerdere actoren gemodelleerd kan worden. De haalbaarheid en toegevoegde waarde hiervan is aangetoond met een uitgebreide casestudie van de Randstad met drie actoren, met elk een andere prijsmaatregel (kilometerheffing, cordontol om Amsterdam en wijziging treintarieven). We hebben de resultaten gepresenteerd met slechts één prijsmaatregel, en voor de combinaties van prijsmaatregelen hebben we met behulp van speltheorie naar verschillende oplossingen gekeken.

Met behulp van coalities en de definities van stabiliteit en het Nash-evenwicht is een TU-spel opgebouwd. Hierbij is een nieuwe methode ontwikkeld om de coalitiewaardes te bepalen, welke de basis voor elk TU-spel zijn. De uitdaging hierin was om door middel van de definitie van Nash-evenwichten de invloed van actoren buiten de coalitie mee te nemen. De kern, de Shapley-waarde en de compromis-waarde zijn onderzocht als coöperatieve oplossingsconcepten. De twee waardes liggen beide in de kern (i.e., deze winstverdelingen worden niet direct door een coalitie of actor verworpen) en leveren bijna dezelfde winstverdeling op, welke daarom op basis van twee argumenten eerlijk zijn. Het Nash-evenwicht waarbij geen coalities worden gevormd, is de uitkomst wanneer er geen samenwerking maar competitie is.

De uitkomsten onder samenwerking en competitie liggen in de casestudie niet ver uit elkaar. Wel is duidelijk dat de nationale overheid en de spoorwegen conflicterende belangen hebben. Hierbij willen we nog opmerken dat de som van beide in de coöperatieve oplossing gemaximaliseerd is. Voor nieuwe studies van innovatief prijsbeleid kan de speltheoretische aanpak in dit artikel gebruikt worden om verschillende oplossingen te bekijken, en potentiële conflicten te identificeren en suggesties te doen voor winstverdelingen. Ten opzichte van de standaard 'sociale welvaart optimalisatie aanpak' kan een verfijnder beeld van de mogelijke winsten en verliezen van iedere actor ten opzichte van het nul-scenario, onder competitie, en onder samenwerking verkregen worden. De aanname van 'first-best pricing' en sociale welvaarsoptimalisatie dat ieder individu meedoet aan de onderhandelingen en er onbeperkt onderlinge transacties mogelijk zijn wordt losgelaten door de onderhandeltafel concreet invulling te geven. De daaraan toegevoegde speltheoretische aanpak resulteert in een reëler haalbaar 'maximum' dan wanneer enkel sociale welvaart optimalisatie beschouwd wordt.

De gepresenteerde casestudie is realistisch met betrekking tot het simuleren van congestie, het berekenen van vertraging en emissies, en het modelleren van keuzes van forenzen. Verder is veel data uit het NRM-west gebruikt om een zo realistisch mogelijk beeld te schetsen. Deze casestudie beperkte zich tot twee gebruikersklassen; hierdoor is er weinig smaakheterogeniteit tussen forenzen. In vervolgstudies kan er een keuzemodel geschat met een groter aantal verschillende gebruikersklassen meer realisme toevoegen. Daarnaast zou in een toekomstige studie een terugkoppeling in het openbaar vervoer, bijvoorbeeld in de vorm van voertuigbezetting, kunnen worden toegevoegd. Tenslotte is het een punt van aandacht om de winstberekening van de spoorwegen gedetailleerder te specificeren.

## Dankbetuiging

Deze studie is uitgevoerd als onderdeel van het 'Innovative Pricing for Sustainable Mobility' (iPriSM) project van het Duurzame Bereikbaarheid van de Randstad (DBR) programma van het Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO).

## Referenties

- Abrantes, P. A. & Wardman, M. R. (2011), 'Meta-analysis of UK values of travel time: An update', *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **45**(1), 1--17.
- Bliemer, M. C.; Brederode, L.; Wismans, L. & Smits, E.-S. (2012), Quasi-dynamic traffic assignment: static traffic assignment with queueing and spillback., in sn, ed., 'The Transportation Research Board (TRB) 91st Annual Meeting, Washington DC, January 22-26, 2012 (paper no 12-0358).', TRB, , pp. 1 -- 24.
- Bliemer, M. C.; Raadsen, M. P.; Smits, E.-S.; Zhou, B. & Bell, M. G. (2014), 'Quasi-dynamic traffic assignment with residual point queues incorporating a first order node model ', *Transportation Research Part B: Methodological* **68**(0), 363 - 384.
- de Borger, B. D. & Proost, S. (2012), 'Transport policy competition between governments: A selective survey of the literature ', *Economics of Transportation* **1**(1-2), 35 - 48.
- Branzei, R.; Dimitrov, D.; Tijs, S.; Dimitrov, D. & Tijs, S. (2008), *Models in cooperative game theory*, Vol. 556, Springer.
- de Bruyn, S.; Korteland, M. & Markowska, A. (2010), 'Bijlagen - Handboek Schaduwprijzen', Technical report, CE Delft.
- Fosgerau, M. & Bierlaire, M. (2009), 'Discrete choice models with multiplicative error terms ', *Transportation Research Part B: Methodological* **43**(5), 494 - 505.
- Guajardo, M. & Jornsten, K. (2014), 'Common Mistakes in Computing the Nucleolus', *NHH Dept. of Business and Management Science Discussion Paper*(2014/15).
- Knockaert, J.; Bakens, J.; Ettema, D. & Verhoef, E. (2010), 'Spitsmijden: een beloning als middel tegen congestie', *Tijdschrift Vervoerswetenschap* **46**, 166-175.
- Peters, H. (2008), *Game Theory: A Multi-Leveled Approach*, Springer-Verlag.
- Proost, S. & Sen, A. (2006), 'Urban transport pricing reform with two levels of government: a case study of Brussels', *Transport Policy* **13**(2), 127--139.
- van der Sar, J. & Baggen, J. (2005), Prijsbeleid op de weg in Nederland. Een historisch overzicht, in 'Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk'.
- Smaal, M. (2012), 'Politieke strijd om de prijs van automobilititeit', PhD thesis, Tilburg University.
- Smits, E.-S.; Bliemer, M.; Pel, A. & van Arem, B. (2014), On Route Choice Models with Closed-Form Probability Expressions, in sn, ed., 'The Transportation Research Board (TRB) 93rd Annual Meeting, Washington DC, January 12-16, 2014 (paper no 14-3733).', TRB, , pp. 1 -- 24.
- Tijs, S. & Otten, G.-J. (1993), 'Compromise values in cooperative game theory', *Top* **1**(1), 1--36.
- Tijs, S. H. (1981), 'Bounds for the core and the t-value', *Game Theory and Mathematical Economics, North-Holland, Amsterdam*, 123--132.
- Ubbels, B. & Verhoef, E. T. (2008), 'Governmental competition in road charging and capacity choice ', *Regional Science and Urban Economics* **38**(2), 174 - 190.
- Vonk Noordegraaf, D. V.; Annema, J. A. & van Wee, B. (2014), 'Policy implementation lessons from six road pricing cases', *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **59**(0), 172 - 191.
- Warffemius, P. M. J. (2013), *De maatschappelijke waarde van kortere en betrouwbaardere reistijden*, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
- Wismans, L. J. J. (2012), *Towards sustainable dynamic traffic management*, University of Twente.