

Tijdschrift Vervoerswetenschap

Wisselwerking tussen bereikbaarheid en externe effecten bij de optimalisatie van DVM maatregelen in verkeersnetwerken / pagina 44

Het meten van concentratie in (luchtvaart)netwerken: Een analyse van alternatieve indices / pagina 55

Het leren van reistijden en reistijdonzekerheid: Modellen van een Bayesiaanse reiziger / pagina 63

Spijtminimalisatie: Een nieuwe modelvorm en een toepassing op vertrektijdstipkeuze-data / pagina 70

Inhoud

juni 2010

Redactionele signalen, pagina 43

Wismans, van Berkum en Bliemer

Wisselwerking tussen bereikbaarheid en externe effecten bij de optimalisatie van DVM maatregelen in verkeersnetwerken, pagina 44

Plasschaert, Derudder en Witlox

Het meten van concentratie in (luchtvaart)netwerken: Een analyse van alternatieve indices, pagina 55

Chorus, Arentze en Timmermans

Het leren van reistijden en reistijdonzekerheid: Modellen van een Bayesiaanse reiziger, pagina 63

Chorus en de Jong

Spijtminimalisatie: Een nieuwe modelvorm en een toepassing op vertrektijdstipkeuze-data, pagina 70

Recente dissertaties

Adaptatie aan klimaatverandering in de binnenvaart (Olaf Jonkeren), pagina 76

Verhoeven

Europarubriek, pagina 77

Colofon

Jaargang 46, nummer 2

Het Tijdschrift Vervoerswetenschap is een kwartaaluitgave van de Stichting Vervoerswetenschap.

Het tijdschrift is opgericht in 1960; oprichter prof. dr. H.C. Kuiler.

Sinds 1 januari 2007 wordt het Tijdschrift Vervoerswetenschap uitgegeven door de Stichting Vervoerswetenschap.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen of openbaar gemaakt zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

© Copyright 2010,
Stichting Vervoerswetenschap, Delft
ISSN 1571 - 9227

Uitgever

Stichting Vervoerswetenschap
Correspondentieadres:
TNO
Postbus 49
2600 AA Delft
Tel 015 269 6811
Fax 015 269 6050
c.g.chorus@tudelft.nl

Redactie

Prof. ir. L.H. Immers, voorzitter, Dr. ir. C. Chorus, secretaris, Prof. dr. ir. E.C. van Berkum, Prof. dr. M.J. Dijst, Prof. dr. G de Jong, Drs. W. Korver, Prof. dr. J. Oosterhaven, Prof. dr. P. Rietveld, Prof. dr. ir. L.A. Tavasszy, Prof. dr. ing. G.R. Teisman, Drs. D.M. van de Velde, Prof. dr. E. Van de Voorde, Ir. E.J. Verroen, Ir. J. van der Waard, Prof. drs. J.G. de Wit, Prof. dr. F. Witlox

Abonneeadministratie

Stichting Vervoerswetenschap
015 269 6811
c.g.chorus@tudelft.nl

Abonnement per jaar € 135,00 incl. BTW, incl. porto. Opzeggingen uitsluitend schriftelijk voor 1 november. Wijzigingen van tenaamstelling en/of adres zo spoedig mogelijk doorgeven.

Redactiesecretariaat

Stichting Vervoerswetenschap
L.H. Immers / 015 269 6811
stichting.vervoerswetenschap@gmail.com
Voor informatie over het aanbieden van artikelen waaronder aanwijzingen voor auteurs en alle andere vragen.

Ontwerp en realisatie

Argus, Rotterdam

Tijdschrift Vervoerswetenschap

Redactionele signalen

Transportsystemen en mobiliteitsgedrag zitten niet zo eenvoudig in elkaar als we misschien zouden willen. Die conclusie lijkt gerechtvaardigd op basis van de vier artikelen in dit bonte nummer. Twee artikelen richten zich op het beschrijven en optimaliseren van netwerken, en twee andere artikelen presenteren onderzoek gericht op de individuele reiziger en zijn leer- en keuzegedrag. In alle vier de artikelen komt het resultaat bovendien dat een te simplistische modelleer-benadering van netwerken en reizigers kan leiden tot over- dan wel onderschatting van fenomenen die van belang zijn voor een duurzaam transportbeleid.

Neem het artikel van Wismans, van Berkum en Bliemer. Zij laten zien dat de optimalisatie van transportnetwerken telkens zeer verschillende beleidsimplicaties geeft, afhankelijk van de te optimaliseren grootte: wil men verkeersmanagement inzetten om de doorstroming te bevorderen of emissies te reduceren, dan impliceert dit suboptimale prestaties op dimensies als verkeersveiligheid en geluidsoverlast. De auteurs laten zien dat er geen verkeersmanagement-strategie voorhanden is die al deze doelen simultaan helpt bereiken. Dit contrasteert uiteraard met de politieke wens om nieuwe technologieën in te zetten om al deze doelen (simultaan) te helpen bereiken. De enige juiste conclusie is dan ook dat beleidsmakers keuzes moeten maken en prioriteiten moeten stellen. Dit inzicht, hoewel ongetwijfeld enigszins ontvullend voor sommigen, wordt overtuigend gepresenteerd op basis van zorgvuldig uitgevoerde kwantitatieve analyses.

In hun artikel over het meten van concentratie in netwerken komen Plasschaert, Derudder en Witlox ook tot de conclusie dat er niet zoiets is als 'one size fits all'. De auteurs laten zien dat het begrip van netwerkconcentratie, alhoewel dit voor menigeen een intuïtieve connotatie heeft, niet eenduidig te conceptualiseren is. Afhankelijk van de gehanteerde maat (concentratieratio, Herfindahl-Hirschman index, Gini-index of de Theilindex) komen netwerken met een relatief sterk verschillende topologie uit op een soortgelijke mate van concentratie, en blijken netwerken die sterk op elkaar lijken toch zeer te verschillen in termen van de mate van concentratie. Gelukkig laten de auteurs het niet bij deze constatering en bespreken ze de merites van de verschillende maten, en hun onderlinge conceptuele verschillen en overeenkomsten. Elke context krijgt dan ook de concentratiemaat die ze verdient.

Anders dan de twee hierboven besproken artikelen, richten Chorus, Arentze en Timmermans zich op het modelleren van de individuele reiziger en zijn gedrag. Alhoewel het schaalniveau dus aanzienlijk verschilt van de netwerkbenadering uit de eerste twee artikelen, zijn er overeenkomsten: ook hier wordt benadrukt dat men voor een goed begrip van mobiliteit soms niet buiten relatief complexe modellen kan. De auteurs beargumenteren hoe bestaande modellen van de wijze waarop reizigers reistijden leren voorbij gaan aan de dagelijkse variatie aan reistijden. Deze in de praktijk veelgebruikte leermodellen impliceren namelijk dat wanneer een reiziger maar voldoende observaties doet van reistijden, de onzekerheid uiteindelijk verdwijnt. Deze implicatie is uiteraard niet houdbaar in een mobiliteitscontext, waarin reistijden immers altijd tot op zekere hoogte onzeker zijn ongeacht de mate van ervaring van de reiziger. De auteurs laten zien hoe, met behulp van een uitbreiding van het conventionele Bayesiaanse model, het leren van deze intrinsieke en niet te elimineren reistijd-onzekerheid meegenomen kunnen worden in een reizigersgedragsmodel.

In het laatste artikel van dit bonte nummer gaan Chorus en de Jong in op een ander, wezenlijk aspect van mobiliteitsgedrag: het maken van keuzes. Zij tonen aan hoe de notie dat reizigers hun keuzes mede af laten hangen van de mate waarin een keuzealternatief zorgt voor minimale spijt achteraf, kan worden gemodelleerd in een zogenaamd diskrete-keuzemodel. Het Random Regret Minimization-model dat de auteurs gebruiken is een verbeterde versie van het model dat in jaargang 2008 van dit tijdschrift is gepresenteerd door Chorus, Arentze en Timmermans. Het nieuwe model kan geschat worden met standaard-softwarepakketten en is daardoor ook buiten de muren van de universiteit goed hanteerbaar. Een analyse op basis van vertrektijdstipkeuze-data laat zien dat het nieuwe spijtmodel een goed en eenvoudig alternatief kan bieden voor het klassieke nutsgebaseerde Multinomiale Logit-model.

Kortom, al wijzen de auteurs van de in dit nummer gepresenteerde artikelen op de noodzaak tot het meenemen van subtiliteiten en nuances in onze modellen van netwerken en reizigers, ze bieden ook allemaal gereedschap om dit te doen. Hierdoor wordt ook een praktisch toekomstperspectief gepresenteerd voor binnen en buiten de universitaire campus. En het uiteindelijke doel is helder: beter transportbeleid, leidend tot duurzame mobiliteit. Uiteindelijk is het met het modelleren van al die nuances en subtiliteiten van netwerken en reizigers net als bij het pellen van een ui: je ogen gaan ervan trillen, maar je haring wordt er wel veel smakelijker van!

Wisselwerking tussen bereikbaarheid en externe effecten bij de optimalisatie van DVM maatregelen in verkeersnetwerken

*Luc Wismans, Goudappel Coffeng BV / Universiteit Twente,
Eric van Berkum, Universiteit Twente en
Michiel Bliemer, Goudappel Coffeng BV / TU Delft*

Samenvatting

Optimalisatie van een verkeerssysteem door het uitbreiden of verbeteren van het bestaande verkeersnetwerk wordt vaak het oplossen van het Network Design Problem (NDP) genoemd. Het optimaliseren door toepassing van dynamisch verkeersmanagement (DVM) maatregelen kan worden gezien als een variant van het NDP. Traditioneel is deze optimalisatie gericht op het verbeteren van de bereikbaarheid. Echter, de kwaliteit van het verkeerssysteem is niet enkel een zaak van bereikbaarheid, maar ook van externe effecten als verkeersveiligheid, luchtkwaliteit, klimaat en geluid. In dit artikel zijn de resultaten van onderzoek naar de optimalisatie van externe effecten met behulp van DVM maatregelen beschreven. De formulering en berekening van de doelfuncties zijn beschreven, waarbij gebruik is gemaakt van een macroscopisch dynamische verkeersstoedeling. Verder zijn drie aanpakken om deze optimalisaties uit te voeren vergeleken in een case studie. Deze drie aanpakken zijn gebaseerd op een Genetisch Algoritme. Daarnaast is een analyse gedaan om te bepalen of de doelen tegenstrijdig zijn of samengaan. De studie laat zien dat de optimalisatie van congestie, verkeersveiligheid, emissies en geluid steeds een verschillend optimale oplossing geeft. Individuele optimalisatie is mogelijk, maar in de case studie blijkt dat er geen toepassing van DVM maatregelen bestaat die optimaal is voor alle doelen. Echter, de doelen emissies en congestie blijken in dit voorbeeld grotendeels samen te gaan en tegenstrijdig te zijn met geluid en verkeersveiligheid. Het is dus zeker niet waar dat wat goed is voor bereikbaarheid ook goed is voor de externe effecten en de aanpak van verschillende externe effecten eenvoudig kan worden gecombineerd. Er is dus een politieke afweging noodzakelijk voor het kiezen van de uiteindelijke oplossing.

Summary

The optimization of traffic systems by expanding or improving an existing network is often referred to as a Network Design Problem (NDP). The optimization of dynamic traffic management (DTM) measures can be seen as a variant of the NDP. Traditionally, this type of optimization is focused on improving accessibility, given particular boundary conditions for traffic safety and livability (set by law). Yet, the quality of traffic systems is not only a matter of accessibility, but also of externalities such as traffic safety, air quality and climate. This paper describes the results of research on optimization of DTM measures to improve externalities. The formulation and calculation of the objective functions are described using a dynamic traffic assignment (DTA) model and three solution approaches are presented using genetic algorithms and compared in a case study. Fur-

thermore, an analysis of objectives being opposite or aligned when a traffic system is being optimized using these measures is presented. Within this research the NDP problem is formulated as a bi-level optimization problem. The objectives for congestion, traffic safety, emissions and noise show different optimal solutions, which means there is not a combination of measures resulting in an optimal situation for a combination of all objectives. However, it was found that the objectives concerning emissions and congestion are aligned and that these objectives are opposite to noise and traffic safety. This shows that it is not true that improving accessibility will also improve externalities and that finding solutions for decreasing of multiple externalities is not easy. A public policy decision is needed for choosing the solution.

1. Inleiding

Door de sterke samenhang tussen problemen en ook de sterke samenhang tussen oplossingen, volstaat de traditionele focus op het oplossen van individuele problemen niet meer. Afwikkelingsproblemen op snelwegen kunnen bijvoorbeeld leiden tot sluipverkeer door woonwijken met leefbaarheidsproblemen tot gevolg en daarom is er dan ook steeds meer aandacht voor het beschouwen van de problemen en zoeken van oplossingen op netwerkniveau. Daarnaast zien we veel aandacht voor beter benutten van de bestaande infrastructuur door toepassing verkeersmanagementmaatregelen. Deze benutting is (nog) met name gericht op het verbeteren van de bereikbaarheid. Echter, de kwaliteit van het verkeerssysteem is niet alleen afhankelijk van congestie, maar ook van andere externe effecten zoals verkeersveiligheid en luchtkwaliteit. De laatste jaren is een groeiende aandacht voor deze effecten te zien en daarbij ligt er ook een rol voor verkeersmanagementmaatregelen. Binnen de Nota Mobiliteit wordt gesproken over het faciliteren van de groei van de mobiliteit en het verminderen van de externe effecten (1). De vraag is of dit tegelijkertijd mogelijk is en daarmee in hoeverre de verschillende doelstellingen tegenstrijdig zijn (2). Indien het verbeteren van de bereikbaarheid en het verminderen van de externe effecten mogelijk is dan kan men volstaan met het optimaliseren van deze doorstroming. Echter, de verwachting is dat dit niet het geval is en dan zijn beleidskeuzes noodzakelijk waarbij informatie nodig is over de consequenties van deze keuzes. Met deze achtergrond is een studie gestart, waarin onderzocht wordt hoe regionale verkeerssystemen kunnen worden geoptimaliseerd met als doel het verminderen van de externe effecten met behulp van dynamische verkeersmanagement (DVM) maatregelen op strategisch niveau.

De meeste studies binnen verkeer en vervoer richten zich op de optimalisatie van enkelvoudige doelstellingen (al dan niet bestaande uit een combinatie van doelstellingen) gegeven een aantal randvoorwaarden zoals het beschikbare budget (3,4,5). Ook de optimalisatie van de externe effecten kan worden vereenvoudigd tot het optimaliseren van een enkele doelfunctie door het meenemen van

een compensatieprincipe. Dit betekent dat de doelfuncties met een bepaalde weging worden opgeteld tot een enkele doelfunctie. Echter, deze doelfuncties kunnen tegenstrijdig zijn en iedere wijze van compensatie tussen doelen is uiteindelijk een politieke keuze. Dit geldt ook voor de vaak toegepaste economische afweging waarbij de effecten worden gemonetariseerd en opgeteld. Bovendien introduceert dit nieuwe onzekerheden met betrekking tot de juiste monetaire waarde. Vanuit het oogpunt van wetenschappelijk onderzoek ligt het dan ook meer voor de hand een multicriteria optimalisatie uit te voeren. Een dergelijke optimalisatie resulteert in een Pareto optimale set van oplossingen. Een Pareto optimale set bestaat uit oplossingen die niet worden gedomineerd door een andere oplossing, dat wil zeggen, oplossingen die niet verbeterd kunnen worden op een doelstelling zonder een verslechtering op een andere doelstelling. Het voordeel van het bepalen van deze Pareto optimale set is dat deze zeer nuttige informatie levert voor de beleidsafweging waarbij de uiteindelijke keuze wordt gemaakt voor een oplossing. Op basis van deze set kan namelijk heel snel het optimum worden gevonden bij gegeven weegfactoren voor de doelstellingen. Tevens kan ook de gevoeligheid van de gebruikte weegfactoren op de optimale oplossing worden bepaald. Dit is mogelijk omdat ongeacht de gebruikte weging de optimale oplossing onderdeel is van deze Pareto optimale set (6).

Er zijn meerdere studies waarbij onderzoek is gedaan naar het optimaliseren van verkeersmanagementsystemen waarbij (een deel van de) externe effecten onderdeel vormen van de doelfunctie. Voorbeelden kunnen worden gevonden in (7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 en 14). Echter tot nog toe betrof dit veelal slechts een deel van de externe effecten, betrof dit een lokale optimalisatie op kruispunt- of wegvakniveau of is een statische toedeling gebruikt voor het bepalen van het effect van de inzet van maatregelen. Echter, de verkeersdynamiek die wordt gemodelleerd in een dynamische toedeling is niet alleen van belang voor het goed kunnen modelleren van DVM-maatregelen, maar uit diverse onderzoeken blijkt tevens dat dit een sterk verklarende variabele is voor het bepalen van de externe effecten van verkeer (zie bijvoorbeeld 15, 16, 17 en 18).

In dit artikel wordt een raamwerk gepresenteerd voor de optimalisatie van externe effecten met behulp van verkeersmanagement maatregelen waarbij enkelvoudige doelstellingen worden geoptimaliseerd en het effect op de overige doelstellingen kan worden geëvalueerd. Congestie wordt daarbij in termen van vertraging beschouwd als onderdeel van deze externe effecten. Binnen dit raamwerk wordt de verkeersdynamiek expliciet meegenomen. In het artikel wordt inzicht gegeven in de formulering van de doelfuncties en toont een toepassing. Belangrijke vraag daarbij is de

mate waarin de verschillende doelstellingen tegenstrijdig zijn of samen gaan. In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op het model raamwerk en de methoden voor het bepalen van de externe effecten op basis van een dynamische verkeerstoedeling. De aanpak waarmee het optimalisatieprobleem is opgelost wordt behandeld in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt vervolgens de resultaten gepresenteerd van een toepassing op een case studie. De discussie, conclusies en het verdere onderzoek volgt tenslotte in hoofdstuk 5.

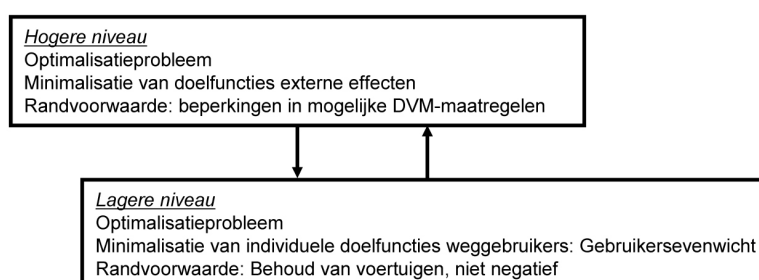
2. Model raamwerk en methodiek

Het optimaliseren van verkeerssystemen door het toevoegen van infrastructuur of aanpassen van bestaande infrastructuur wordt meestal een netwerk ontwerpprobleem (Network Design Problem (NDP)) genoemd. Het optimaliseren van een verkeerssysteem met behulp van verkeersmanagementmaatregelen is een variant op dit NDP. Vaak worden deze problemen geformuleerd als een bi-level optimalisatieprobleem, waarbij op het laagste niveau de weggebruikers hun routekeuze optimaliseren en gesimuleerd worden over het netwerk, terwijl op het hoogste niveau de maatregelen dusdanig worden ingezet dat de netwerkdoelen worden behaald.

Ook in dit onderzoek is dit optimalisatieprobleem geformuleerd als een bi-level optimalisatie probleem.

Het hogere niveau bestaat uit de optimalisatie van de doelen van de gezamenlijke wegbeheerders met betrekking tot congestie, luchtkwaliteit, geluidhinder, klimaat en verkeersveiligheid door het inzetten van beschikbare DVM maatregelen. In het lagere niveau optimaliseren weggebruikers haar eigen doelen (in deze situatie minimalisatie van individuele reistijden). Het daadwerkelijk oplossen van dit laatste optimalisatieprobleem is gelijk aan het berekenen van het welbekende gebruikersevenwicht in een netwerk. In een gebruikersevenwicht verdeelt het verkeer zich namelijk zodanig over de schakels van een netwerk dat een evenwicht ontstaat waarin geen individuele verkeersdeelnemer zich kan (deterministisch) of denkt te kunnen (stochastisch) verbeteren door het kiezen van een andere route. Door daarbij in het lagere niveau een gebruikersevenwicht uit te rekenen betreft het hier verkeersmanagement op het strategische niveau en dus niet het real-time optimaliseren van DVM-maatregelen waarbij gereageerd wordt op de actuele verkeerssituatie. Gegeven de optimalisatie van DVM-maatregelen en dat verkeersdynamiek een sterk bepalende verklarende variabele is voor de externe effecten wordt het lagere niveau in dit onderzoek geoperationaliseerd door het berekenen van een stochastisch dynamisch gebruikersevenwicht (DUE) met een macroscopisch dynamisch verkeersmodel. De optimalisatie van het hogere niveau is

Figuur 1: Illustratie bi-level probleem: Het lagere niveau is de randvoorwaarde voor het hogere niveau



daarmee afhankelijk van de optimalisatie in het lagere niveau. Aangezien het bi-level geformuleerde NDP een zeer complex, NP-hard probleem is, worden vaak heuristieken als Genetische Algoritmen of Simulated Annealing gebruikt. Heuristieken proberen slim te zoeken binnen de mogelijke oplossingen, maar bieden geen garantie voor het vinden van het daadwerkelijke optimum. Dergelijke heuristieken hebben nog wel veel functie-evaluaties nodig, wat in deze optimalisatie betekent dat er veel mogelijke oplossingen doorgerekend moeten worden met het dynamische verkeersmodel. Aangezien de rekestijd dan van belang wordt zijn er drie aanpakken

toegepast, waarbij onderzocht is of de rekestijd kan worden verminderd. Deze aanpakken zijn gebaseerd op een Genetisch Algoritme (GA) en worden beschreven in hoofdstuk 3.

2.1 Hogere niveau

In het hogere niveau worden de individuele doelfuncties z geoptimaliseerd (zie tabel 1). Ondanks het feit dat wegbeheerders verschillende mogelijk conflicterende doelen kunnen nastreven en de beschikbare maatregelen voor de diverse partijen kunnen verschil-

Tabel 1: Overzicht van indicatoren en doelfuncties

Doel	Indicator	Opmerking
Congestie	Totale reistijd (h)	Omdat vaste verkeersvraag is aangenomen, is het minimaliseren van totale reistijd gelijk aan het minimaliseren van het aantal voertuigverliesuren
$z_1 = \sum_a \sum_t \sum_m \frac{q_{am}(t) \ell_a}{v_{am}(t)} \quad [1]$		
Verkeersveiligheid	Totaal aantal letselongevallen	Berekening gebaseerd op de relatie tussen blootstelling en risico per wegtype.
$z_2 = \sum_a \sum_t \sum_m \sum_d q_{am}(t) \delta_{ad} R_{md} \ell_a \quad [2]$		
Klimaat	Totale hoeveelheid CO ₂ emissie (gram)	Berekening gebaseerd op gemiddelde snelheids gebaseerde discrete emissiefuncties per voertuig-categorie eerder gebruikt binnen de studie 'Effecten van snelheidshandhaving op CO ₂ emissies (20)'.
$z_3 = \sum_a \sum_t \sum_m q_{am}(t) E_m^{\text{CO}_2} (v_{am}(t)) \ell_a \quad [3]$		
Luchtqualiteit	Gewogen totale hoeveelheid NO _x emissie (gram) Gewogen totale hoeveelheid PM ₁₀ emissie (gram)	Berekening gebaseerd op aan verkeerssituatie gebaseerd emissiemodel, waarbij discrete emissie functies naar ontwikkelingsniveau per voertuigcategorie en per wegtype worden gebruikt. Emissiefactoren zijn afgeleid van het CAR emissiemodel en de studie 'Emissies en files (21)'.
$z_4^s = \sum_a \sum_t \sum_m \sum_d w_a q_{am}(t) \delta_{ad} E_{md}^s (v_{am}(t)) \ell_a, \quad s \in \{\text{NO}_x, \text{PM}_{10}\} \quad [4]$		
Geluid	Gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron (dB(A))	Berekening gebaseerd op het standaard rekenmethode 1 uit het reken- en meetvoorschrift.
$z_5 = 10 \log \left(\frac{\sum_a \sum_w \delta_{aw} \ell_a 10^{\frac{\bar{L}_w - \eta_w}{10}}}{\sum_a \sum_w \delta_{aw} \ell_a} \right), \quad \text{waarbij} \quad \bar{L}_w = 10 \log \left(\frac{\sum_a \sum_t \delta_{aw} \ell_a \sum_m 10^{\frac{L_m(v_{am}(t))}{10}}}{\sum_a \delta_{aw} \ell_a} \right), \quad \text{waarbij}$ $L_m(v_{am}(t)) = \alpha_m + \beta_m \log \left(\frac{v_{am}(t)}{v_m^{\text{ref}}} \right) + 10 \log \left(\frac{q_{am}(t)}{v_{am}(t)} \right) \quad [5]$		
Waarbij: z_1 : Doelfunctie congestie (= totale reistijd) (h) z_2 : Doelfunctie verkeersveiligheid (= aantal letselongevallen) z_3 : Doelfunctie klimaat (= totale hoeveelheid CO₂ emissie) (gram) z_4^s : Doelfunctie luchtqualiteit (= gewogen hoeveelheid emissie van stof s) (gram) z_5 : Doelfunctie geluid (= gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron) (dB(A)) $q_{am}(t)$: Voertuigcategorie m instroom naar wegvak a op tijdstip t (voertuigen) $v_{am}(t)$: Gemiddelde snelheid van voertuigcategorie m op wegvak a op tijdstip t (km/h) R_{md} : Risicocijfer van voertuigcategorie m voor wegtype d (letselongevallen/(vrt*km)) $E_m^{\text{CO}_2}(\cdot)$: CO₂ emissiefactor van voertuigcategorie m, afhankelijk van snelheid (gram/(vrt*km)) $E_{md}^s(\cdot)$: Emissiefactor stof s van voertuigcategorie m op wegtype d, afhankelijk van snelheid (gram/(vrt*km)) $L_m(\cdot)$: Gemiddelde geluidsemissie van voertuig categorie m, afhankelijk van snelheid (dB(A)) $\bar{L}_w$: Gewogen gemiddelde geluidsemissie op netwerkdeel met verstedelijkingsgraad w (dB(A)) ℓ_a : Lengte van wegvak a (km) δ_{ad} : Wegtype indicator, is 1 als wegvak a is wegtype d, anders 0 δ_{aw} : Verstedelijkingsgraad indicator, is 1 als wegvak a is van verstedelijkingsgraad w, anders 0 w_a : Verstedelijkingsgraad rond wegvak a η_w : Correctiefactor voor verstedelijkingsgraad w (dB(A)) α_m, β_m : Voertuigcategorie afhankelijke parameters berekening geluidsemissie v_m^{ref} : Voertuigcategorie specifieke referentiesnelheid.		

Tabel 2: Overzicht risicocijfers

Wegtype (Duurzaam Veilig definities)	Risico (Rmd) letselongevallen/miljoen voertuigkilometers
Stroomweg	0.07
Gebiedsontsluitingsweg BUBEKO	0.22
Gebiedsontsluitingsweg BIBEKO	1.10
Erftoegangsweg BUBEKO	0.43
Erftoegangsweg BIBEKO	0.57

len, gaan wij in dit onderzoek uit van een groep samenwerkende wegbeheerders. Dit kan gezien worden als één van de uitkomsten van een Gebiedsgericht Benutten (GGB) proces (19).

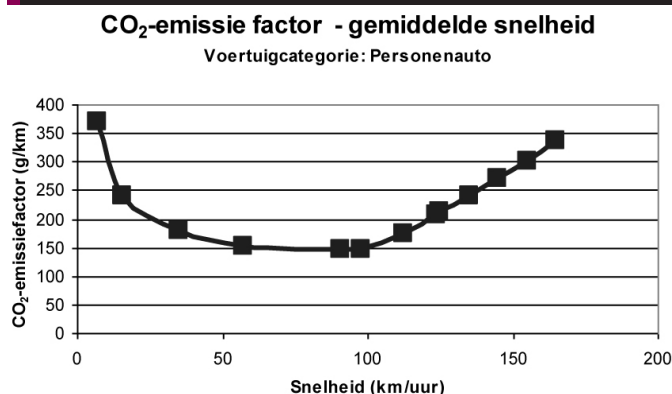
De gebruikte indicator voor congestie is de netwerkmaat totale reistijd. Het doel is om de som van de reistijden voor alle reistijden van alle ritten te minimaliseren. Omdat de verkeersvraag vast staat, is het minimaliseren van de totale reistijd gelijk aan het minimaliseren van het totaal aantal voertuigverliesuren.

De gebruikte indicator voor verkeersveiligheid is het totaal aantal letselongevallen. De rekenmethode is gebaseerd op de relatie tussen blootstelling (aantal voertuigkilometers) en het risico per wegtype (ratio van aantal letselongevallen per voertuigkilometer). Belangrijk aandachtspunt is dat deze rekenmethode enkel het effect van de dynamiek in routekeuze van weggebruikers (gebruik van verschillende wegtype) meeneemt, maar niet het effect van verkeersdynamiek op specifieke wegen (snelheid en snelheidsverschillen). Binnen een uitgebreid literatuuronderzoek naar de modellering van externe effecten is helaas geen geschikte methode gevonden voor het meenemen van deze effecten op basis van een macroscopische dynamische verkeerstoedeling (22). Het doel is om het totaal aantal letselongevallen te minimaliseren. In tabel 2 zijn de gebruikte risicocijfers (23) gepresenteerd.

De indicator voor klimaat is de totale CO₂ emissie. De berekeningsmethode is gebaseerd op de relatie tussen snelheid (discrete snelheid stappen van 5 km/h) en de emissiefactor (emissie van CO₂ per voertuigkilometer) per voertuigcategorie. Deze methode valt onder de categorie van emissiemodellering waarin gebruik wordt gemaakt van een gemiddelde snelheid gebaseerde discrete emissiefunctie. De getoonde emissiefunctie in figuur 2 is geschat in (20) waarbij gebruik is gemaakt van de emissiefactoren geschat in (21) en een natuurkundige berekening van de benodigde energie bij hoge snelheden om de weerstanden (rolweerstand, luchtweerstand en acceleratie) te overwinnen rekening houdend met de efficiency van de motor. Belangrijk aandachtspunt is dat de emissiefuncties zijn gebaseerd op snelwegdata en daardoor minder geschikt zijn voor niet-snelwegen, maar binnen dit onderzoek wel hiervoor zijn gebruikt. De mate van snelheidsverschillen tussen voertuigen en acceleratie en deceleratie van voertuigen zal namelijk bij eenzelfde gemiddelde snelheid verschillend zijn voor snelwegen en niet-snelwegen. Het doel is het minimaliseren van de totale CO₂.

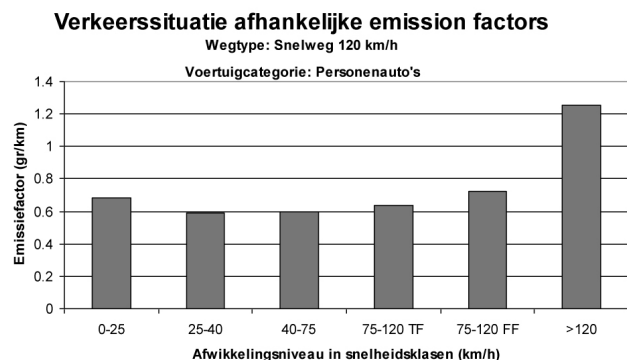
De gebruikte indicator voor luchtkwaliteit is de gewogen totale hoeveelheid NO_x en de gewogen totale hoeveelheid PM₁₀ emissie. Naast NO_x en PM₁₀ bestaan er ook andere stoffen die relevant zijn voor luchtkwaliteit. Echter, aangezien deze twee stoffen de meeste problemen opleveren in Nederland in relatie tot de EU-normen, zijn deze in dit onderzoek gekozen. De daadwerkelijke indicator voor luchtkwaliteit is de concentratie van deze stoffen op bepaalde loca-

Figuur 2: Voorbeeld emissiefunctie CO₂ personenauto



ties. Om deze concentraties te kunnen bepalen is een grote hoeveelheid extra gegevens nodig voor het berekenen van de verspreiding zoals weersomstandigheden, wegdektype en bebouwing. Deze informatie is niet standaard beschikbaar binnen een verkeersmodel. Bovendien kost het berekenen van de concentraties de nodige rekentijd, terwijl rekentijd een belangrijk aandachtspunt is binnen de optimalisatie als gevolg van het gebruik van heuristieken. Daarnaast grijpt de inzet van DVM-maatregelen direct in op de emissies en bestaat er uiteraard een directe relatie tussen de hoogte van de emissies en de concentratie van stoffen, waardoor bij evaluatie op emissies het belangrijkste effect wordt meegenomen. Het is echter een feit dat luchtkwaliteit is gerelateerd aan gezondheid en daarom zijn de concentraties op specifieke locaties van belang. Hoge concentraties in verblijfsgebieden zijn meer schadelijk dan hoge concentraties in het buitengebied. Bovendien zullen geëmitteerde stoffen in het buitengebied zich beter kunnen verspreiden en daardoor resulteren in lagere concentraties dan in sterk stedelijke gebieden. Daarom gebruiken wij wegingsfactoren per wegvak afhankelijk van de verstedelijkingsgraad. We onderscheiden drie niveaus, sterk verstedelijkt, verstedelijkt en buitengebied. De weegfactoren (w_a respectievelijk 3, 2 and 1) zijn gebaseerd op de verdunningsfactoren die gebruikt worden in het meet- en rekenvoorschrift bevoegdheden luchtkwaliteit. Deze hangt af van de afstand en de mate waarin bebouwing aanwezig is bij de weg.

De rekenmethode om de emissies te bepalen is gebaseerd op de relatie tussen afwikkelingsniveau en emissiefactoren (emissie per voertuigkilometer) per wegtype en voertuigcategorie. Deze methode valt onder de categorie van emissiemodellering waarin gebruik wordt gemaakt van verkeerssituatie afhankelijke emissiefactoren. Voor snelwegen is ook onderscheid gemaakt in 'traffic forced' (intensiteit > 1,000 voertuigen per rijstrook/uur) en 'free flow' verkeerssituaties (intensiteit < 1,000 voertuigen per rijstrook/uur). De emissiefactoren zijn afgeleid van het CAR emissiemodel en het onderzoek 'Emissies en files' (21). Een voorbeeld van de emissiefactoren voor personenauto's op snelwegen met een snelheidslimiet van 120 km/h wordt getoond in figuur 3. Het doel is het minimaliseren van de totale gewogen NO_x emissies en de totale gewogen PM₁₀ emissies.

Figuur 3: Voorbeeld emissiefactoren NO_x

De gebruikte indicator voor geluidhinder is de gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron. Net als bij luchtkwaliteit geldt ook voor geluidhinder dat de daadwerkelijke indicator de geluidsbelasting op specifieke locaties betreft. Hiervoor zijn een grote hoeveelheid extra gegevens nodig, zoals verharding, locatie van schermen en wegalignement om de propagatie van het geluid te berekenen. Ook hiervoor geldt dat deze informatie niet standaard beschikbaar is binnen een verkeersmodel, dit de nodige rekentijd kost en de inzet van DVM-maatregelen direct ingrijpt op de hoogte van de emissies en er een directe relatie is tussen de emissies en de geluidsbelasting op specifieke locaties. Voor geluidhinder geldt dat hoge geluidsemissies in verblijfsgebieden meer schadelijk of irriterend zijn dan in buitengebieden. Daarom is ook voor geluid gebruik gemaakt van correctiefactoren afhankelijk van verstedelijkingsgraad. Hierbij zijn dezelfde niveaus van verstedelijking, w_a , gebruikt. De correctiefactoren (η_w respectievelijk -7, -10, -13) zijn gebaseerd op de afstand correctiefactor uit standaard rekenmethode 1 uit het reken- en meetvoorschrift.

De rekenmethode om de geluidsemissie te berekenen is een regressiefunctie die is geschat en wordt gebruikt binnen rekenmethode 1 uit het reken- en meetvoorschrift. De voertuigcategorie afhankelijke parameters zijn α_m (76.0) en β_m (17.9) voor personenauto's (vrachtauto's). De referentiesnelheden v_m^{ref} zijn 80 en 70 km/h voor personenauto's en vrachtauto's.

Een belangrijk aandachtspunt is dat deze methode een combinatie is van rol- en motorgeluid en daarom met name gericht is op rolgeluid (welke dominant is bij hogere snelheden, typisch hoger dan 40 km/h voor personenauto's, afhankelijk van wegdekverharding) en niet op motorgeluid (welke van belang is bij lage snelheden, met name wanneer een voertuig accelereert). Er zijn geen correctiefactoren gebruikt voor acceleratie, deceleratie of wegdekverharding. Het doel is het minimaliseren van de gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron.

2.2 Lagere niveau

In het lagere niveau optimaliseren de weggebruikers hun eigen doelen. In dit onderzoek wordt verondersteld dat de nutsfunctie van de reiziger enkel bestaat uit reistijd, echter deze is binnen het raamwerk indien nodig eenvoudig uit te breiden met andere attributen. Dit lagere niveau is geoperationaliseerd met het dynamisch macroscopische simulatiemodel INDY (24,25). De inzet van DVM maatregelen is gemodelleerd door wegvak attributen (bijv. capaciteit en vrije snelheid) dynamisch te wijzigen met behulp van zogenoemde controls. Deze inzet resulteert in wijzigingen in verkeersafwikkeling

en daardoor ook routekeuze van het verkeer. INDY gebruikt een relatief multinomial logit model op een vooraf gegenereerde routeset om routekeuze te modelleren en dynamische horizontale wachtrijen om de propagatie van verkeersstromen te modelleren. De resulterende dynamische voertuigstromen en snelheden zijn gebruikt om de doelfuncties uit te rekenen (zie formules 1 tot en met 5) van de wegbeheerders op basis van de eerder beschreven methoden.

3. Aanpak oplossing optimalisatieprobleem

Het optimalisatie probleem kan als volgt worden geformuleerd:

$$P_i : \min_{S \in F} z_i(S) = f_i(q(S), v(S), k(S)), \quad i = 1, \dots, I \quad [6]$$

Waarbij: $F = \{S | S_b(t) \in \{1, \dots, M_b\}, \forall b, t\}$ en

$$(q(S), v(S), k(S)) \in \overset{DTA}{\Gamma}(G(N, A(X_a(S))), D)$$

Hierbij zijn de doelfuncties z een functie van de uitkomsten van een dynamische toedeling $\overset{DTA}{\Gamma}$ (temporele informatie over de intensiteiten q , dichtheden k en snelheden v op wegvakken) waarbij een dynamisch gebruikersevenwicht wordt berekend. Input voor deze toedeling is het aanbod van infrastructuur bestaand uit een netwerk G met de knopen N en wegvakken A waarvan de karakteristieken X anders kunnen zijn in de tijd en beïnvloed kunnen worden door de DVM-maatregelen gedefinieerd in S , en de vraag naar infrastructuur bestaande uit een dynamische verkeersvraag D . De DVM maatregelen S zijn dus de beslisvariabelen die het aanbod van infrastructuur kunnen beïnvloeden. Aangenomen wordt dat de verkeersvraag niet afhankelijk is van deze DVM-maatregelen en vast staat. De instellingen van de DVM-maatregelen dienen daarbij onderdeel te zijn van de toegestane instellingen gedefinieerd in F . Dit wil zeggen dat het optimalisatieprobleem zich richt op hoe de DVM-maatregelen, die het aanbod van infrastructuur beïnvloeden, dienen te worden ingezet zodat de doelfunctie z_i (doelfunctie van doelstelling i) wordt geoptimaliseerd gegeven een bepaalde vraag naar infrastructuur.

Het optimalisatieprobleem bestaat uit het vinden van de best mogelijke instelling van de beschikbare DVM-maatregelen in de tijd. Een mogelijke instelling van de beschikbare DVM-maatregelen in de tijd wordt daarbij een oplossing genoemd en alle mogelijke oplossingen tezamen vormt de oplossingsruimte. Dit optimalisatieprobleem is zeer complex (4,5,6) en het is daarnaast onmogelijk om alle mogelijke oplossingen te evalueren. De DVM maatregelen kunnen in principe continue in de tijd worden aangepast, wat resulteert in een oneindig aantal oplossingen. We hebben de oplossingsruimte gediscrèteerd in de tijd, door de tijd op te delen in vaste tijdsintervallen en in instelling door een gelimiteerd aantal mogelijke instellingen per maatregel. Voor het optimalisatie probleem gegeven in [1] betekent dit dat we een tijdsperiode beschouwen die bestaat uit T tijdsintervallen. Hierdoor wordt $t \in \{1, \dots, T\}$. De inzet van DVM-maatregelen wordt gemodelleerd door het wijzigen van de wegvak karakteristieken. Relevante karakteristieken die worden beïnvloed door DVM-maatregelen zijn daarbij de vrije snelheid v_{free} , de capaciteit q_{cap} en de uitstroomb capaciteit $q_{uitstroom}$. Dit betekent bijvoorbeeld dat bij het instellen van een dynamische snelheidsverlaging op een deel van de wegvakken de wegvak capaciteit q_{cap} en de vrije snelheid v_{free} wordt gewijzigd. De wegvak karakteristieken kunnen daardoor variëren in de tijd afhankelijk van de inzet van een set van DVM maatregelen. Aangenomen dat er B verschillende

DVM maatregelen aanwezig zijn in het netwerk, dan bestaat de inzet van een set van DVM maatregelen in tijdstap t uit $S(t) = (s_1(t), \dots, s_B(t))$. De verzameling van de inzet van de set van DVM maatregelen voor alle tijdsperioden $S = (S(1), \dots, S(T))$ geeft daarmee een mogelijke oplossing voor het optimalisatieprobleem. Laten we $X_a(s_b(t))$ definiëren als de karakteristieken van wegvak a als gevolg van instelling van maatregel s_b in tijdsinterval t . De instelling van de karakteristieken op wegvak a als gevolg van de maatregelencombinatie $S(t)$ in tijdsperiode t wordt dan gegeven door $X_a(S(t))$. Laten we daarnaast X_{a0} definiëren als de initiële instelling van de karakteristieken op wegvak a . Elke DVM maatregel kent M_b verschillende instellingen waardoor $S_b(t) \in \{1, \dots, M_b\}$, $b=1, \dots, B$ en de oplossingsruimte wordt gedefinieerd door $F = \{S | s_b(t) \in \{1, \dots, M_b\}, \forall b, t\}$, wat betekent dat er per tijdsinterval $\prod_b M_b$ mogelijke combinaties van DVM maatregelen zijn, en in het totaal er $(\prod_b M_b)^T$ mogelijke oplossingen zijn. De oplossing S_j^* representeert de optimale oplossing voor P_j .

Hoewel de oplossingsruimte nu eindig is, kan deze nog steeds zeer groot zijn. Indien bijvoorbeeld 3 maatregelen met ieder 11 mogelijke instellingen en 6 tijdsperioden worden onderscheiden dan resulteert dit reeds in 5.6×10^{18} mogelijke oplossingen. Aangezien elke evaluatie van een oplossing ook de berekening van een dynamisch gebruikersevenwicht vergt, is het evalueren van alle oplossingen niet praktisch haalbaar. Daarom kiezen wij, vergelijkbaar met ander onderzoek in dit kader, een heuristiek (in dit onderzoek een Genetisch Algoritme (GA), zie figuur 4) om binnen de oplossingsruimte te zoeken naar optima. Een GA is een zoekmethode gebaseerd op de evolutietheorie. Binnen een dergelijk algoritme wordt binnen de initialisatie gestart met een (al dan niet willekeurige) startpopulatie van oplossingen. Een oplossing wordt hierbij een chromosoom genoemd en bestaat uit een vector met getallen die de oplossing representeert. In het voorbeeld met 3 maatregelen met ieder 11 mogelijke instellingen en 6 tijdsperioden bestaat een chromosoom uit 18 getallen die variëren tussen 1 en 11, waarbij ieder getal een instelling van een DVM-maatregel in een bepaalde tijdsperiode weergeeft. Een individueel getal binnen dit chromosoom $s_b(t)$ is daarbij een gen. Voor deze startpopulatie wordt bepaald hoe goed deze scores op de doelfunctie en op basis van deze kennis worden uit deze populatie ouderparen geselecteerd waaruit nakomelingen worden geproduceerd (de volgende generatie). Deze nakomelingen ontstaan door een combinatie van de genen uit de oplossingsvectoren van de ouders en tevens door willekeurig mutatie van een deel van de

genen na de combinatie. Ook voor deze nakomelingen wordt vervolgens bepaald hoe goed deze scores op de doelfunctie. Vervolgens kan in de volgende iteratie de selectie van ouderparen weer plaatsvinden en daarmee de volgende generatie, waarbij net als in de evolutietheorie het idee is dat betere oplossingen overleven. Uiteindelijk zal het algoritme stoppen op basis van een vooraf vastgesteld stopcriterium (bijvoorbeeld een vast aantal generaties of mate van convergentie). Echter, ook deze globale aanpakken vereisen veel functie evaluaties om een optimum te vinden. Daarom hebben we drie aanpakken getest om te onderzoeken of de optimalisatie kan worden versneld.

Voor de oplossing van het probleem P_j wordt onderscheid gemaakt in drie verschillende aanpakken. Om de verschillen tussen deze aanpakken duidelijk te maken wordt optimalisatieprobleem P_j geïntroduceerd welke staat voor een statische versie van het originele optimalisatieprobleem P_j . Binnen het optimalisatieprobleem P_j zijn de maatregelen stationair en krijgen dus voor alle tijdsperioden dezelfde instelling, wat betekent dat $s_b(t) = s_b$, $\forall b$ en $S = (s_1, \dots, s_B)$. Dit optimalisatieprobleem is identiek aan P_j , echter nu wordt het toegestane gebied $F = \{S | s_b \in \{1, \dots, M_b\}, \forall b\}$. Dit betekent dat de oplossingsruimte en daarmee het aantal mogelijke oplossingen voor het probleem P_j vele malen kleiner is dan voor het probleem P_j . Aangenomen wordt dat S_j^* de optimale oplossing is voor P_j .

De optimale oplossing van zowel P_j als P_j wordt met behulp van een genetisch algoritme (GA) bepaald. Hiervoor definiëren we $GA(z_i, F, W_0)$, wat staat voor het uitvoeren van een optimalisatie met een GA voor doelfunctie z_i , met het toegestane gebied F en startoplossingen W_0 die allen liggen binnen dit toegestane gebied.

Eerste aanpak (GA1)

De eerste aanpak betreft $GA(z_i, F, W_0^1)$, waarbij $F = \{S | s_b(t) \in \{1, \dots, M_b\}, \forall b, t\}$ en W_0^1 bestaat uit een random gekozen verzameling van oplossingen, random set van S 'en, die liggen binnen het toegestane gebied en dus $W_0^1 = \{S | s_b(t) \in \{1, \dots, M_b\}, \forall b, t\}$ en resulteert in S_j^* .

Tweede aanpak (GA2)

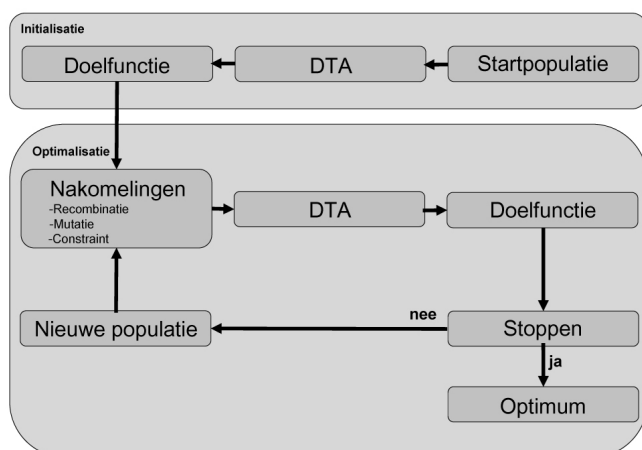
In de tweede aanpak trachten we de keuze voor startoplossingen te verbeteren door eerst het probleem P_j op te lossen, wat relatief snel kan doordat het toegestane gebied voor dit probleem veel kleiner is dan voor P_j . De gedachte daarbij is dat de optimale oplossing S_j^* zeer waarschijnlijk een goede oplossing is voor het probleem P_j en waarschijnlijk ook dicht ligt bij de optimale oplossing S_j^* van dit probleem. Door startoplossingen te kiezen voor het probleem P_j die dicht liggen bij de optimale oplossing S_j^* zou de optimale oplossing voor dit probleem sneller gevonden kunnen worden. Dit betekent dat in deze aanpak:

- eerste stap is $GA(z_i, F, W_0^2)$, waarbij W_0^2 bestaat uit een random gekozen verzameling van oplossingen, random set van S 'en waarvoor geldt dat $W_0^2 = \{S | S \in F\}$ en resulteert in S_j^* .
- tweede stap is $GA(z_i, F, W_0^2)$, waarbij $W_0^2 = \{S | d(s_b(t), s_b^*) < \epsilon, \forall b, t\}$ en d een afstandsmaat is en resulteert in S_j^* .

Derde aanpak (GA3)

De derde aanpak verschilt van de tweede aanpak omdat hierbij niet alleen de startoplossingen dicht bij de optimale oplossing S_j^* , maar ook het toegestane gebied wordt verkleind door alleen oplossingen op een beperkte afstand van deze optimale oplossing te accepteren.

Figuur 4: Aanpak oplossing optimalisatieprobleem via een GA



Echter de afstand met S_i^* is bij de keuze voor de startoplossingen kleiner dan de afstand die wordt gebruikt voor het verkleinen van het toegelaten gebied. Terwijl de tweede gericht is op een verbetering in de keuze van de startoplossingen, ligt in de derde aanpak nog sterker de nadruk op de verwachting dat de optimale oplossing S_i^* dichtbij S_i^* zal liggen. Het verkleinen van het toegestane gebied zou de zoektocht moeten versnellen, echter vergroot tevens de kans dat een suboptimale oplossing wordt gevonden. Dit betekent dat in deze aanpak.

- eerste stap is $GA(z_i, F, W_0^2)$, waarbij W_0^2 bestaat uit een random gekozen verzameling van oplossingen, random set van S 'en waarvoor geldt dat $W_0^2 = \{S | S \in F\}$ en resulteert in S_i^* .
- Tweede stap is $GA(z_i, F, W_0^2)$, waarbij $W_0^2 = \{S | d(s_b(t), s_b^*) < \varepsilon_1, \forall b, t\}, F = \{S | d(s_b(t), s_b^*) < \varepsilon_2, \forall b, t\}, d$ een afstandsmaat is en $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ en resulteert in S_i^* .

In de derde aanpak wordt zo oplossingsruimte verkleint tot minder dan 0.000001% van de originele oplossingsruimte, maar dan blijven in ons voorbeeld nog steeds 3.8×10^{12} oplossingen over.

4. Case studie: optimalisatie van externe effecten

Een case studie is gebruikt om de resultaten te laten zien van een toepassing van het raamwerk, de drie aanpakken te vergelijken, maar bovendien om te laten zien dat de verschillende doelen samen kunnen gaan of tegenstrijdig kunnen zijn.

4.1 Beschrijving case studie

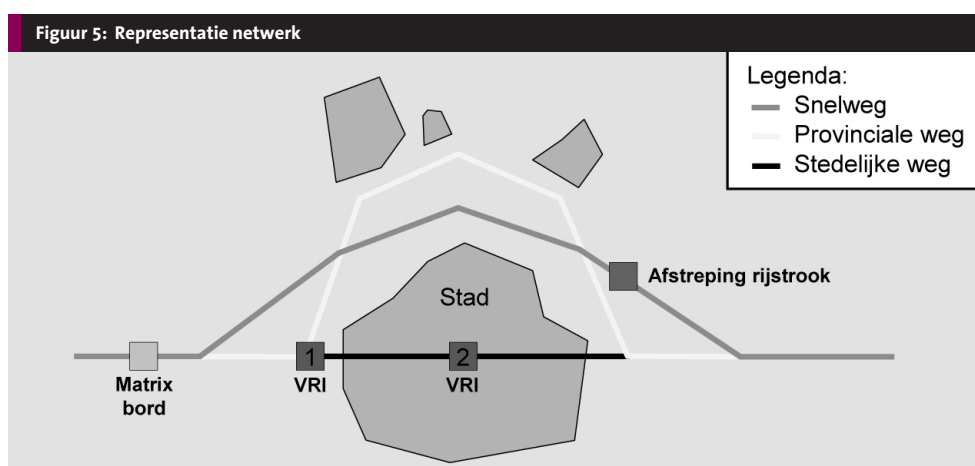
Een eenvoudig hypothetisch netwerk is gebruikt bestaande uit een enkele herkomst-bestemmingsrelatie met drie alternatieve routes (zie figuur 5). Een route gaat door de stad en maakt gebruik van ste-

delijke wegen (snelheidslimiet 50 km/h); de tweede route maakt gebruik van een ringweg bestaande uit een provinciale weg (snelheidslimiet van 80 km/h); de derde route is een andere ringweg bestaande uit een snelweg (snelheidslimiet van 120 km/h) waar een fysieke afstreping van drie naar twee rijstroken aanwezig is. De vervoersvraag varieert in de tijd (maximaal 6.300 pae/u) en bestaat uit personenauto's en vrachtauto's (10% van totale vervoersvraag) gedurende drie uren. Binnen het netwerk zijn drie maatregelen beschikbaar om de doelfuncties te optimaliseren: twee verkeerslichten en matrixborden boven de weg om de maximale snelheid aan te passen. In totaal worden er 6 tijdsintervallen onderscheiden, evenredig verdeeld in intervallen van 30 minuten. De mogelijke instellingen voor de verkeerslichten bestaat uit de capaciteit per richting, waarbij het eerste verkeerslicht bestaat uit twee richtingen waarvan de capaciteit onafhankelijk van elkaar kan worden gewijzigd en de mogelijke instellingen van de matrixborden bestaat uit de vrije snelheid voor de gehele snelweg. Bij een verlaging van de vrije snelheid wordt daarbij een homogeniserend effect meegenomen door verhoging van de capaciteit met 2,5% of 5% bij verlaging van de snelheidslimiet naar respectievelijk 100 km/h en 80 km/h, zie tabel 3.

Het gebruikersevenwicht in het lagere niveau is berekend uitgaande van een routekeuze tijdsinterval van een kwartier en een tijdstapgrootte van 5 seconden in de propagatieberekening.

4.2 Referentiesituatie

In de referentiesituatie is de snelheidslimiet op de snelweg 120 km/h en de capaciteit van alle verkeerslichten 1.000 pae/h/richting voor alle tijdsperioden. Bij vrije reistijd is de route via de snelweg (route 1) de snelste route en de route via de provinciale weg (route 3) de langzaamste, de route door de stad (route 2) ligt daartussen. In de



Tabel 3: Modelleren maatregelen¹

	$s_b(t)$	Karakteristiek	$X_a(s_b(t))$	X_{a0}
Verkeerslicht 1	$s_1(t) \in \{1, \dots, 11\}$	$q_{uitstroom}$	$X_a(s_1(t)) \in \{500, 600, \dots, 1400, 1500\}$	$X_{a0} = 1000$
	$s_2(t) \in \{1, \dots, 11\}$	$q_{uitstroom}$	$X_a(s_2(t)) \in \{500, 600, \dots, 1400, 1500\}$	$X_{a0} = 1000$
Verkeerslicht 2	$s_3(t) \in \{1, \dots, 11\}$	$q_{uitstroom}$	$X_a(s_3(t)) \in \{500, 600, \dots, 1400, 1500\}$	$X_{a0} = 1000$
Dynamische snelheidslimiet	$s_4(t) \in \{1, 2, 3\}$	v_{free} q_{cap}	$X_a(s_4(t)) \in \left\{ \begin{pmatrix} 80 \\ 1.050 X_{a0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 100 \\ 1.025 X_{a0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 120 \\ X_{a0} \end{pmatrix} \right\}$	$X_{a0} = \begin{pmatrix} 120 \\ q_{cap_{a0}} \end{pmatrix}$

ochtendspits ontstaat file op de snelweg als gevolg van de afstropping. Hierdoor nemen de reistijden van deze route toe, waardoor meer verkeer gebruik maakt van de route door de stad en de provinciale ringweg. In de referentie gebruikt 78% van de voertuigen de snelwegroute, 9% de provinciale route en 13% de route door de stad. Doordat meer verkeer kiest voor de niet-snelwegroutes ontstaat er een wachtrij voor VRI 1.

4.3 Resultaten case studie

Optimalisatie

Op basis van alle drie de aanpakken zijn de optima van de 5 doelstellingen geanalyseerd. In tabel 4 representeert iedere kolom een optimaal ontwerp voor een specifiek doel. Dit betekent dat voor het doel dat is geoptimaliseerd (z_i), aangegeven boven de kolom, wordt getoond hoe de overige doelstellingen (z_j) scoren indien deze optimale oplossing S_j^* wordt gekozen. Deze score is uitgedrukt als de relatieve verslechtering ten opzichte van het minimum van die specifieke doelstelling $z_j(S_j^*)$. In formulevorm betekent dit:

[7]

$$\Delta_{ji} = \frac{z_j(S_i^*) - z_j(S_j^*)}{z_j(S_j^*)} \times 100\%, \text{ waarbij } S_i^* = \arg \min_s z_i \text{ en } S_j^* = \arg \min_s z_j$$

Zo is in de eerste kolom in tabel 4 te zien dat wanneer congestie wordt geoptimaliseerd dit leidt tot 20% meer ongevallen dan wanneer veiligheid wordt geoptimaliseerd, 7% meer CO₂-emissie dan wanneer klimaat wordt geoptimaliseerd, 1% meer NO_x en PM₁₀ emissie dan wanneer luchtkwaliteit wordt geoptimaliseerd en 4% meer geluidsemissie dan wanneer geluid wordt geoptimaliseerd. Optimalisatie van verkeersveiligheid leidt met name tot een forse toename van de reistijden, maar ook in een toename voor emissies. Optimalisatie van emissies (klimaat en luchtkwaliteit) en optimalisatie van congestie leidt tot vergelijkbare situaties. Echter, uit de tabel blijkt ook dat bij de optimale situatie voor emissies (z_3 , z_4 en z_5), de totale reistijd tussen de 3-5% hoger ligt dan het optimum voor congestie (z_1). Terwijl bij optimalisatie van congestie de CO₂ emissie met 7% toeneemt en de gewogen NO_x en PM₁₀ emissies met 1%. Het doel dat het meeste tegenstrijdig lijkt met de andere doelen is geluid. De afwijking van de optimale situatie voor de andere doelen is namelijk relatief groot als geluid wordt geoptimaliseerd. Omdat het grootste gedeelte van het verkeer gebruik maakt van wegvakken in het buitengebied zijn de geoptimaliseerde ont-

werpen voor luchtkwaliteit en klimaat vergelijkbaar. Echter, in het algemeen zal dit niet het geval zijn, omdat in tegenstelling tot klimaat voor luchtkwaliteit de lokatie waar de stoffen worden uitgestoten van belang is en dit ook wordt meegenomen door weegfactoren in de doelfuncties.

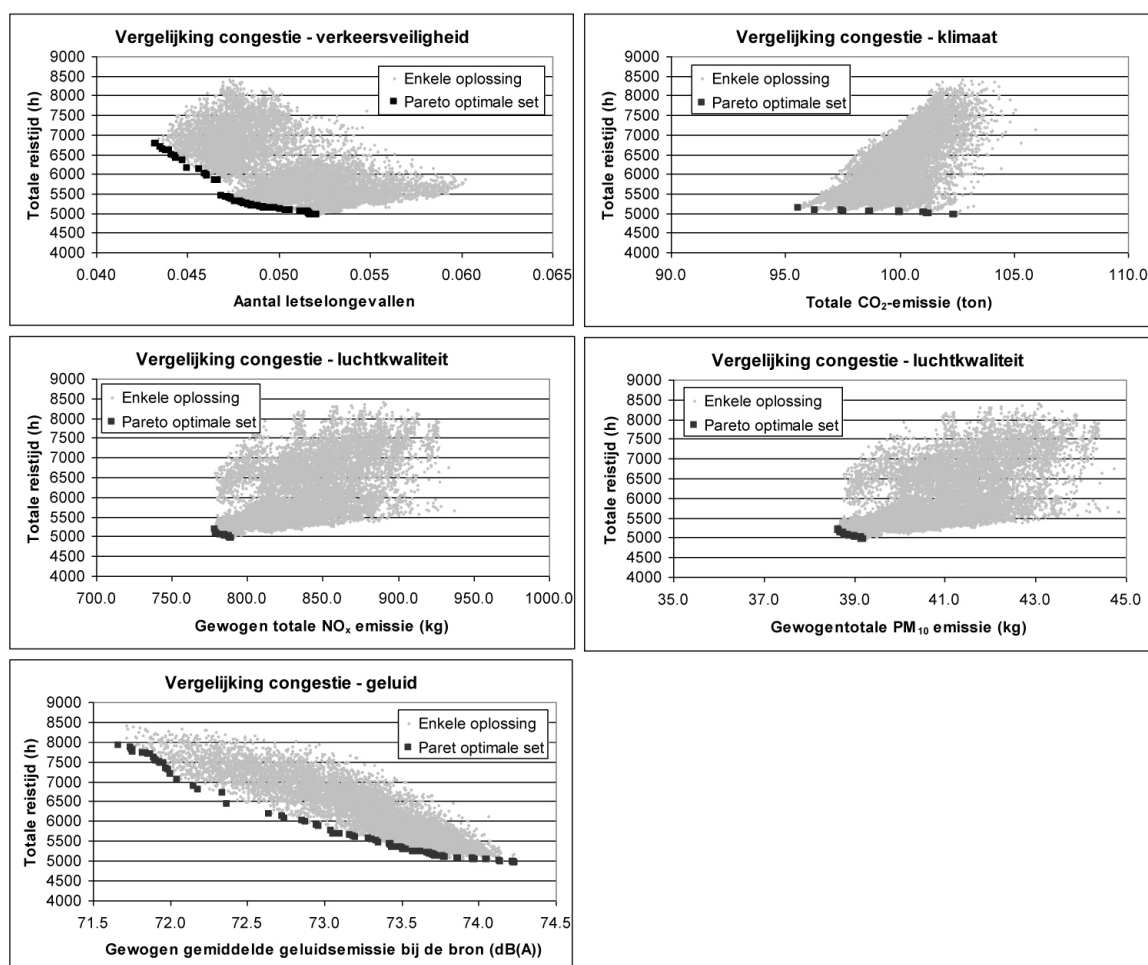
De doelen congestie, verkeersveiligheid, emissies en geluid tonen verschillende optimale oplossingen, wat betekent dat er geen van de doelstellingen perfect samen gaan. Het optimaliseren van congestie betekent het vermijden van congestie en het zo goed mogelijk gebruiken van de volledige capaciteit van de drie beschikbare routes. In de gevonden optimale oplossing ligt de maximum snelheid op de snelweg op 120 km/h en de capaciteiten bij de VRI's relatief hoog. Maximaliseren van verkeersveiligheid betekent het maximaliseren van het gebruik van de relatief veilige snelwegroute en het vermijden van de route door de stad. In deze oplossing zijn de capaciteiten bij de VRI's laag ingesteld om zo deze routes minder aantrekkelijk te maken en de maximum snelheid op de snelweg in de drukste periode verlaagd tot 80 km/h om hier zoveel mogelijk verkeer af te kunnen wikkelen. Minimaliseren emissies betekent het vermijden van congestie en hoge snelheden en zoekt naar de beste weging tussen het gebruik van de stedelijke wegen en de mate van congestie op de snelweg. In de optimale oplossing wordt de snelheid verlaagd tot 100 km/h en de capaciteit van de VRI's laag ingesteld. Minimaliseren van geluid betekent het zo veel mogelijk verlagen van de snelheid en het vermijden gebruik van de stedelijke route. Dit wordt gerealiseerd door de maximumsnelheid op de snelweg te verlagen tot 80 km/h en tegelijkertijd de capaciteiten van de VRI's te verlagen. Uiteindelijk resulteert dit in een vergelijkbare verdeling van het verkeer over de drie routes als voor de optimalisatie van congestie, echter de snelheid waarmee dit verkeer wordt afgewikkeld is veel lager.

In figuur 6 zijn alle ruim 13.000 unieke doorgerekende oplossingen met punten weergegeven uit de 18 optimalisaties (6 optimalisaties van individuele doelfuncties in 3 aanpakken) van het doel congestie gerelateerd aan de andere doelen. De Pareto optimale set, ook wel "efficiënt frontier" genoemd, wordt tevens getoond. De figuur verduidelijkt het principe van Pareto optimale oplossingen. Elk punt in de figuur geeft de uitkomst van een oplossing op de doelstellingen op de x- en y-as. De grijze punten die de uitkomst van de enkele oplossingen weergeven, worden gedomineerd door de zwarte punten die de Pareto optimale oplossingen weergeven. Voor deze grijze pun-

Tabel 4: Kruistabel optimalisatie externe effecten

	Geoptimaliseerd ontwerp voor elk doel (z_i)																	
	z_1			z_2			z_3			$z_4^{\text{NO}_x}$			$z_4^{\text{PM}_{10}}$			z_5		
Verdeling routes (%)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	77	13	10	85	8	7	80	9	10	79	11	10	79	11	10	77	13	9
Prestatie op doelen (z_i)																		
z_1 : Congestie	0			37			3			5			5			60		
z_2 : Verkeersveiligheid	20			0			20			12			13			13		
z_3 : Klimaat	7			5			0			1			1			7		
$z_4^{\text{NO}_x}$: Luchtkwaliteit NO _x	1			7			0			0			0			19		
$z_4^{\text{PM}_{10}}$: Luchtkwaliteit PM ₁₀	1			5			0			0			0			15		
z_5 : Geluid	4			2			3			3			3			0		

Figuur 6: Uitkomsten doelfuncties oplossingen gerelateerd aan congestie



ten geldt dat er oplossingen bestaan die voor beide doelstellingen tot een verbetering leidt, voor de zwarte punten geldt dit niet. Als de Pareto optimale set een grote spreiding laat zien in de figuur (de doelruimte), dan zijn de doelen voornamelijk tegenstrijdig. Deze figuur bevestigt dat in deze case de doelen congestie en luchtkwaliteit samen gaan en deze tegenstrijdig zijn met verkeersveiligheid en geluid. Dit betekent ook dat het tegelijkertijd optimaliseren van luchtkwaliteit en geluid geen eenvoudige opgave is, terwijl voor beide wel geldt dat hoge emissies in stedelijk gebied vermeden dienen te worden. De reden hiervan is dat lagere afwikkelnelheden voor luchtkwaliteit tot sterk hogere emissies leidt, terwijl dat voor geluid niet het geval is. Hoewel niet alle mogelijke oplossingen uit de totale oplossingsruimte zijn doorgerekend, is het toch mogelijk deze conclusie te trekken. Als bijvoorbeeld geluid en congestie niet tegenstrijdig zouden zijn geweest dan zouden de individuele optimalisaties niet hebben geresulteerd in een dergelijk gespreide Pareto optimale set. Bovendien zijn vergelijkbare resultaten gevonden in (26) waarbij een Grid Search is uitgevoerd. Voor klimaat is uit deze figuren niet te concluderen of deze samen gaan of tegenstrijdig zijn. Gezien de grote spreiding in de resultaten wanneer congestie en luchtkwaliteit tegen elkaar worden uitgezet, kan niet in het algemeen worden geconcludeerd dat wat goed is voor congestie ook goed is voor luchtkwaliteit. Echter, het is in deze testcase wel mogelijk om beide tegelijkertijd grotendeels te optimaliseren. Eenzelfde conclusie geldt voor congestie en klimaat.

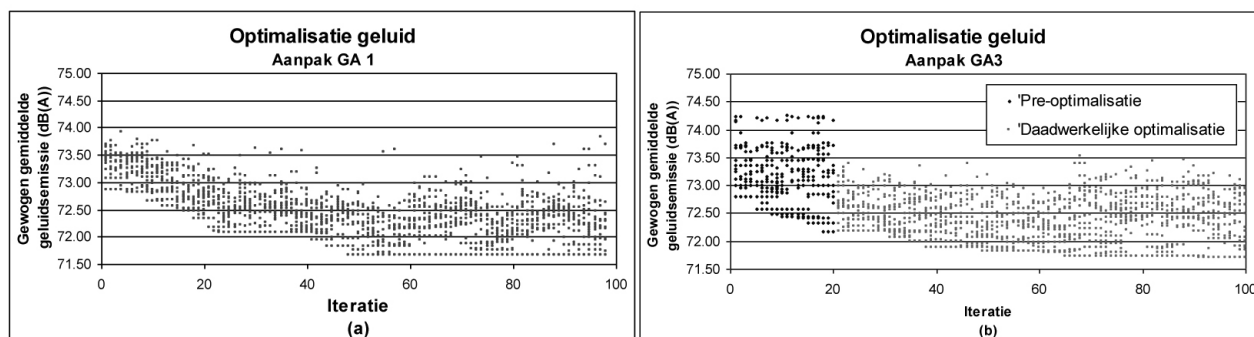
Vergelijking van aanpakken

Naast de toepassing van een Genetisch Algoritme is tevens een Grid Search uitgevoerd voor de pre-optimalisatie om te controleren of de resultaten van deze optimalisatie in de aanpakken die hiervan gebruik maken (aanpakken GA2 en GA3) leidt tot de optimale oplossing. De resultaten, gepresenteerd in tabel 6, tonen de gevonden minima en het aantal iteraties die daarvoor nodig zijn geweest. Het aantal iteraties geeft een indicatie van de benodigde rekentijd. Binnen een iteratie worden 10 nieuwe oplossingen geëvalueerd en het doorrekenen van een enkele oplossing kost circa 1 minuut op een snelle pc. Dit betekent bijvoorbeeld dat de optimalisatie van congestie in aanpak GA1 circa 12,5 uur heeft geduurd. De resultaten tonen dat de pre-optimalisatie voor alle doelen de optimale of bijna optimale oplossing vindt. De drie verschillende aanpakken vinden uiteindelijk in de optimalisatie allen vergelijkbare resultaten. Er kan niet worden geconcludeerd dat de pre-optimalisatie het aantal functie-evaluaties en daarmee de rekentijd vermindert waarmee de optima worden gevonden (het aantal iteraties getoond voor aanpak GA2 en GA3 is inclusief de twintig iteraties van de pre-optimalisatie). De aanpak die de optimale oplossing vindt, is verschillend voor de verschillende doelstellingen, waardoor geen van de aanpakken duidelijk als beter kan worden aangewezen. Er is dan ook geen reden om te veronderstellen dat aanpak GA3, waarbij de oplossingsruimte wordt verkleind, leidt tot het vinden van suboptimale oplossingen. Dit komt met name ook, omdat de verbeteringen ten opzichte van

Tabel 6: Resultaten optimalisatiebenaderingen

Pre-optimalisatie								
		Referentie	Grid Search		Aanpak GA2		Aanpak GA3	
Doel	Indicator		Min	-	Min	Iteraties	Min	Iteraties
Congestie	Totale reistijd (h)	5028.43	4963.95		4963.95	12	4963.95	3
Verkeers veiligheid	Totaal aantal letselongevallen	0.052	0.044		0.045	6	0.044	10
	Klimaat	Totale CO ₂ -emissie (Ton)	102.55	95.56	95.56	2	95.56	7
Lucht kwaliteit	Gewogen totale NO _x emissie(Kg)	789.43	781.81		782.04	20	781.81	20
	Gewogen totale PM ₁₀ emissie (Kg)	39.25	38.80		38.80	8	38.80	14
Geluid	Gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron (dB(A))	74.23	72.17		72.38	13	72.17	19
Optimalisatie								
		Referentie	Aanpak GA1		Aanpak GA2		Aanpak GA3	
Doel	Indicator		Min	Iteraties	Min	Iteraties	Min	Iteraties
Congestie	Totale reistijd (h)	5028.43	4952.23	75	4961.20	89	4963.95	20
Verkeers veiligheid	Totaal aantal letselongevallen	0.052	0.046	90	0.045	98	0.043	79
	Klimaat	Totale CO ₂ -emissie (Ton)	102.55	95.57	93	95.55	25	95.55
Lucht kwaliteit	Gewogen totale NO _x emissie(Kg)	789.43	779.19	66	779.68	97	780.66	83
	Gewogen totale PM ₁₀ emissie (Kg)	39.25	38.71	2	38.65	92	38.67	99
Geluid	Gewogen gemiddelde geluidsemissie bij de bron (dB(A))	74.23	71.66	49	71.92	85	71.71	92

Figuur 7: Resultaten optimalisatieproces aanpak GA1 en GA3



de referentie die worden gevonden in de uiteindelijke optimalisatie relatief klein zijn ten opzichte van de reeds gevonden verbeteringen in de pre-optimalisatie. Hoewel tests op basis van aanpak GA1 waarbij het aantal iteraties fors is uitgebreid (verviervoudigd) niet heeft geleid tot grote verbeteringen voor een van de doelen (kleiner dan 1%), blijft het onzeker of er veel betere oplossingen bestaan.

In figuur 7 zijn de resultaten voor het doel geluid per iteratie geplot voor aanpakken GA1 en GA3. Hier is te zien dat aanpak GA1 waarin er geen pre-optimalisatie plaats vindt, resulteert in een vergelijkbare figuur als aanpak GA3. De verwachte winst in de eerste iteraties door de pre-optimalisatie is daardoor verwaarloosbaar. Dit geldt tevens voor de andere doelen. Het Genetische Algoritme dat wordt gebruikt in aanpak 1 zoekt dusdanig effectief in de oplossingsruimte dat de pre-optimalisatie in dit geval geen meerwaarde heeft.

5. Discussie, conclusies en verder onderzoek

Dit onderzoek presenteert een raamwerk voor het optimaliseren van externe effecten met behulp van DVM maatregelen, geeft inzicht in de formulering van de doelfuncties en toont een toepassing waarbij drie aanpakken zijn gebruikt. De optimalisatie van de doelen voor congestie, verkeersveiligheid, emissies en geluid geven verschillende optimale oplossingen. Individuele optimalisatie is mogelijk, maar in het voorbeeld blijkt dat er geen toepassing van DVM maatregelen bestaat die optimaal is voor een combinatie van doelen. Er is dus een afweging noodzakelijk voor het kiezen van de uiteindelijke oplossing. De doelen emissies en congestie blijken samen te gaan en tegenstrijdig te zijn met geluid en verkeersveiligheid in de uitgevoerde case studie. Het is dus zeker niet waar dat wat goed is voor bereikbaarheid ook goed is voor externe effecten en de aanpak van verschillende externe effecten eenvoudig kan worden gecombineerd. Er is dus een politieke afweging noodzakelijk waarin het compensatieprincipe wordt vastgesteld voor het kiezen van de uiteindelijke oplossing. De Pareto optimale set van oplossingen kan daarbij be-

langrijke informatie verschaffen. Als deze Pareto optimale set voorhanden is kan in de beleidsafweging heel snel het optimum worden gevonden voor verschillende wegingen tussen doelen, maar tevens ook de gevoeligheid van het gebruikte compensatieprincipe op de optimale oplossing worden bepaald. Binnen dit onderzoek is geoptimaliseerd voor enkelvoudige doelstellingen en geëvalueerd wat het effect is op de overige doelstellingen. De tweede fase van ons onderzoek zal dan ook gericht zijn op het direct bepalen van Pareto optimale set voor de combinatie van de doelstellingen.

De drie aanpakken gebruiken allen een Genetisch Algoritme, maar kennen verschillen in de wijze waarop de startoplossingen zijn bepaald, random of op basis van een pre-optimalisatie, en of de oplossingsruimte is verkleind op basis van de resultaten van de pre-optimalisatie. De resultaten tonen dat er geen reden is om aan te nemen dat het verkleinen van de oplossingsruimte leidt tot sub-optimale oplossingen. Echter, de resultaten tonen ook dat de pre-optimalisatie niet leidt tot het vinden van betere oplossingen of het sneller vinden van de optimale oplossing. Het Genetische Algoritme is effectief genoeg en de pre-optimalisatie heeft in deze case studie geen meerwaarde. De optimalisatie op basis van de drie gepresenteerde aanpakken hebben veel rekentijd nodig (in de gebruikte case gemiddeld zo'n 12 uur per optimalisatie) die met name afhangt van de benodigde rekentijd voor het doorrekenen van een oplossing. Hoewel de algoritmes ook toepasbaar zijn voor grotere netwerken, zal de rekentijd fors toenemen als grotere netwerken en meer maatregelen worden geëvalueerd. Rekentijden van enkele uren voor een oplossing zijn daarbij goed mogelijk, wat kan leiden tot maanden rekentijd voor het uitvoeren van een optimalisatie. Het verdient daarom de aanbeveling om de aanpak verder te verbeteren. Deze verbetering kan gezocht worden in het versnellen van het doorrekenen van oplossingen bijvoorbeeld door parallelisatie of het verminderen van het aantal door te rekenen oplossingen door bijvoorbeeld verkleining van de oplossingsruimte op basis van verkeerskundige kennis.

Referenties

- Ministerie Verkeer en Waterstaat. Nota mobiliteit. Den Haag, 2004.
- AVV. Werkboek gebiedsgericht benutten. Met de Architectuur voor Verkeersbeheersing. Rotterdam, 2002.
- Gao, Z., Wu, J. and Sun, H. Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. *Transportation Research B*, Vol. 39, 2005, pp. 479-495.
- Chiou, S. Bilevel programming for the continuous transport network design problem. *Transportation Research B*, Vol. 39, 2005, pp. 361-383.
- Chiou, S. A subgradient optimization model for continuous road network design problem. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, 2009, pp. 1386-1396.
- Sharma, S., Ukkusuri, S.V. and Mathew, T. A Pareto optimal multi-objective optimization for the robust transportation Network Design Problem. Presented at the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, 2009.
- Gershwin, S.B., Ross, P., Garner, N. and Little, J.D.C. Optimization of large traffic systems. *Transportation Research Record* No. 682, 1978, pp. 8-15.
- Schmöcker, J.-D., Ahuja S. and Bell, M.G.H. Multi-objective signal control of urban junctions - Framework and a London case study. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 16(4) pp. 454-470, 2008.
- Anderson, J.M., Sayers, T.M. and Bell, M.G.H. Optimization of a fuzzy logic traffic signal controller by a multiobjective genetic algorithm. *Proceedings 9th International Conference Road Transport Information and Control*, 1998. pp. 186-190.
- Murat, Y. S. and Kikuchi, S. Fuzzy optimization approach: Comparison with the classical optimization method using the problem of timing a traffic signal. *Transportation Research Record*, No. 2024, 2007, pp. 82-91.
- Mathew, T. V. and Sharma, S. Continuous network design with emission pricing as a bi-level optimization problem. *Applications of Advanced Technology in Transportation - Proceedings of the Ninth International Conference on Applications of Advanced Technology in Transportation*, Chicago, IL, 2006.
- Zuurbier, F.S., Hoogendoorn, S.P. and Van Lint, H. van. Evaluating non trivial objective functions for traffic management by means of optimal prescriptive route guidance. 14th world congress on ITS, Beijing Exhibition Center, China, 2007.
- Ahn, K. and Rakha, H. The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. *Transportation research Part D*, Vol. 13, 2008, pp. 151-167.
- Taale, H. Integrated Anticipatory Control of Road Networks. A game theoretical approach. Proefschrift, TU Delft, TRAIL thesis series T2008/15, 2008.
- Rakha, H. and Ahn, K. Integration Modelling Framework for Estimating Mobile Source Emissions. *Journal of transportation engineering*, Vol. 130, 2003, pp. 183-193.
- Can, A., Leclercq, L., Lelong, J. and Defrance, J. Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: Experimental evidence. *Applied Acoustics*, Vol. 70, 2009, pp. 821-829.
- Barth, M. and Boriboonsomsin, K. Real-World CO2 Impacts of Traffic Congestion. Paper for the 87th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, D.C., 2008.
- Beek, W. Derriks, H., Wilbers, P., Morsink, P., Wismans, L. and Van Beek, P. The effects of speed measures on air pollution and traffic safety. *Conference Proceedings European Transport Conference*, 2007.
- AVV, 2002. Werkboek gebiedsgericht benutten. Met de Architectuur voor Verkeersbeheersing. Rotterdam.
- Goudappel Coffeng. Effecten versterkte snelheidshandhaving op CO2-emissies. Eindrapportage. Deventer. L.J.J., Wismans, P. van Beek and R.M.M. van den Brink, 2007.
- TNO. Emissies en files – Bepalen van emissiefactoren. Eindrapportage fase 2. TNO, Delft. Report No. 01.OR.VM.0441/NG, 2001.
- Wismans, L.J.J., Van Berkum E.C. en Bliemer, M.C.J. Modeling externalities using dynamic traffic assignment models: a review. Ingediend voor publicatie in *Transportation Reviews*, 2010.
- Jansen, S.T.M.C. De Verkeersveiligheidsverkenner gebruikt in de regio. De rekenmethode en de aannamen daarin. Leidschendam. SWOV-rapport R-2005-6, 2005
- Bliemer, M.C.J., Versteeg, H.H., Castenmiller, R.J. INDY: a new analytical multi-class dynamic traffic assignment model. *TRISTAN V Conference Proceedings*, Guadeloupe, France, 2004.
- Bliemer, M.C.J. Dynamic queuing and spillback in an analytical multiclass dynamic network loading model. *Transportation Research Record* 2029, 2007, pp. 14-21.
- Wismans, L.J.J., Van Berkum, E.C., Bliemer, M.C.J. Multi objective optimization of traffic systems using dynamic traffic management measures. In *proceedings Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems conference*, Rome, 22 – 23 June 2009.

Noten

- ⁱ Uit het oogpunt van overzichtelijkheid zijn enkel de wegvakken karakteristieken getoond die worden beïnvloed door de DVM-maatregelen. Aangezien de capaciteit q_{cap} voor maatregel 4 voor de diverse wegvakken verschil-lend kan zijn is een functie van de initiële capaciteit gegeven.

Het meten van concentratie in (luchtvaart)netwerken: een analyse van alternatieve indices

Katrien Plasschaert¹, Ben Derudder¹ en Frank Witlox¹

Samenvatting

In dit artikel wordt een kritische analyse gepresenteerd van de geschiktheid van verschillende indices voor het meten van concentratie in netwerken. In eerste instantie worden de theoretische eigenschappen van de concentratieratio, Herfindahl-Hirschman index, netwerkconcentratie-index en Theilindex geïllustreerd door ze toe te passen op fictieve netwerken met gekende parameters. In tweede instantie wordt de praktische toepasbaarheid van deze indices nagegaan door ze te berekenen voor drie nationale luchtvaartnetwerken (Frankrijk, Duitsland en de Verenigde Staten), als proxy voor het stedensysteem. De onderlinge verhoudingen in de mate van concentratie in deze drie netwerken zijn intuïtief duidelijk waardoor de resultaten een geschikte toetssteen vormen om de praktische voor- en nadelen van de verschillende indices aan te geven. Op basis van de analyses van zowel de ideaal-typische als de reëel bestaande netwerken worden de voornaamste implicaties voor toekomstig onderzoek naar het gebruik van concentratie-indices besproken.

Abstract

This paper analyzes to what extent different indices are able to measure the concentration in air transport networks. First, we illustrate the theoretical characteristics of the concentration ratio, Herfindahl-Hirschman index, network concentration index and Theilindex by applying these to so-called toy networks with known parameters. Second, the practical applicability of these indices is assessed by calculating them for three domestic airline networks (France, Germany and the United States). The dimensions of the concentration in each of these three networks as a proxy for the city systems are intuitively clear so that the results provide us with an appropriate touchstone for assessing the advantages and drawbacks of each of the indices. Based on the analyses of both the ideal-typical and the actually existing networks, the main implications for future research on concentration indices are discussed.

Trefwoorden

Luchtvaartnetwerken, concentratie-indices, MIDT 2001

1. Inleiding

Luchtvaartnetwerken worden opgebouwd uit een geheel van vluchten in een bepaalde regio. Ze zijn net als veel andere types transportnetwerken geconcentreerd in tijd en ruimte (Burghouwt et al., 2003). De mate van ruimtelijke concentratie in een netwerk bevindt zich steeds tussen de ideaaltypische extremen van volledige con-

centratie tot evenredige spreiding. In de eerste configuratie zijn alle passagiers verzameld in één knooppunt van het netwerk, in de tweede is er een gelijkmatige verdeling van alle passagiers over elk knooppunt in het netwerk (Hall & Tideman, 1967). De mate waarin een netwerk zich tussen beide extremen bevindt, kan berekend worden aan de hand van concentratie-indices. De doelstelling van dit artikel is om een kritische analyse te maken van de toepasbaarheid van enkele concentratie-indices. Zo kan worden aangegeven welke index best wordt gebruikt voor het onderzoeken van concentratie in een specifiek soort netwerk. In onze analyse beperken we ons tot volgende meest gebruikte indices:

- concentratieratio CR_x ;
- Herfindahl-Hirschman index HHI;
- Gini-index GI en de daarop gebaseerde netwerkconcentratie-index NCI;
- Theilindex TI.

Dergelijke indices worden in de literatuur vaak gebruikt om concentratie in luchtvaart- of andere netwerken te meten. De indices kunnen bijvoorbeeld worden berekend op het niveau van luchthavens om te kijken tot welke luchthaven passagiers zich specifiek richten binnen een bepaalde stad. Er kan worden berekend hoeveel goedkoper de gemiddelde ticket-prijs is in luchtvaartnetwerken die minder geconcentreerd zijn dan andere. Dresner et al. (1996) onderzoeken hoe de opkomst van lagekostenmaatschappijen de ticketprijs van de vluchten op bepaalde routes beïnvloedde. Sys (2009) analyseert in welke mate de container lijnvaartsector als een oligopolie benaderd kan worden. Andere concrete voorbeelden van dergelijke analyses worden verder in dit artikel gegeven (zie paragraaf 3 en 4).

Om de geschiktheid van de concentratie-indices na te gaan worden ze op twee verschillende manieren getest. In eerste instantie worden de indices theoretisch afgetoetst aan de hand van een set randvoorwaarden. Er wordt onderzocht of de indices voldoen aan deze voorwaarden door ze toe te passen op fictieve netwerken die ideaaltypische situaties voorstellen. In tweede instantie worden de indices ook berekend voor reëel bestaande transportnetwerken om hun praktische toepasbaarheid en beperkingen te illustreren. We gebruiken voor deze empirische toetsing de ruimtelijke structuur van de 'nationale luchtvaartnetwerken' (i.e. het geheel van binnenlandse vluchten) in Frankrijk, Duitsland en de Verenigde Staten. Het bestuderen van een transportnetwerk is een goede methode om het stedelijk systeem van een land na te gaan (Derudder, 2008). Een luchtvaartnetwerk is een onderdeel van het transportnetwerk van een land. Het is er een goede proxy voor, maar is niet altijd sluitend door het bestaan van andere transportmiddelen als trein, bus, en dergelijke. Toch is het luchtvaartnetwerk algemeen genomen een goede indicator voor het stedennetwerk. Aangezien de polarisatie in het stedensysteem van de datasets is gekend, kunnen er uitspraken worden gemaakt over het transport- en dus het luchtvaartnetwerk (Derudder, 2008).

In dit artikel wordt met het begrip “concentratie” verwezen naar de mate waarin er sprake is van hiërarchische differentiatie, dit wil zeggen de mate waarin een bepaalde stad of verbinding domineert in een netwerk (Van Nuffel et al., 2010a; 2010b). Alle gegevens (i.e. het aantal passagiers geassocieerd met knooppunten in een netwerk) worden hierbij gerangschikt van groot naar klein (Pumain, 2006), bijvoorbeeld aan de hand van een ‘rank size curve’. Hoe steiler de curve, hoe groter het aandeel passagiers van de dominerende steden in het netwerk en hoe sterker de concentratie. Hub-and-spoke netwerken zijn bijvoorbeeld meer geconcentreerd dan point-to-point netwerken aangezien er een centraal knooppunt in het netwerk aanwezig is. Monocentristische netwerken bevatten meer concentratie dan polycentristische netwerken. Hiërarchische differentiatie - en dus concentratie - in luchtvaartnetwerken kan gemeten worden aan de hand van drie dimensies (Derudder & Witlox, 2009):

- concentratie op het niveau van de knooppunten in het netwerk, i.e. de verdeling van de passagiers over de verschillende steden (of luchthavens) in het netwerk;
- concentratie op het niveau van de verbindingen in het netwerk, i.e. de verdeling van de passagiers over de verschillende mogelijke verbindingen tussen de knooppunten in het netwerk;
- concentratie in de “gerichtheid” van de verbindingen in het netwerk, i.e. de mate van symmetrie in de verschillende verbindingen.

Twee netwerken met gelijke concentratie op niveau van de knooppunten kunnen verschillen inzake concentratie op niveau van de verbindingen en/of de mate van symmetrie in deze verbindingen (en omgekeerd). Hoewel theoretisch gezien de drie dimensies moeten worden berekend in een analyse van netwerken (Derudder & Witlox, 2009), zullen in deze toepassing enkel de eerste twee dimensies worden berekend omdat onze gegevensset (MIDT 2001, zie verder) geen informatie bevat over de gerichtheid van de verbindingen. Er kan met andere woorden niet nagegaan worden of een passagier van stad A naar B vertrekt of terugkeert.

De rest van dit artikel is als volgt opgebouwd. In paragraaf 2 wordt aangegeven wat de voornaamste kenmerken zijn van een ‘geschikte’ concentratie-index. Vervolgens worden een aantal fictieve netwerken uitgewerkt om de indices theoretisch te evalueren. In paragraaf 3 worden de indices empirisch getoetst. In paragraaf 4 worden de bevindingen samengevat en de voornaamste implicaties voor toekomstig onderzoek naar de structuur van transportnetwerken besproken.

2. Het meten van Concentratie in netwerken

2.1 Eigenschappen van een ‘geschikte’ concentratie-index

Op basis van Hall en Tideman (1967) kan gesteld worden dat een index voor het meten van concentratie in een netwerk bij voorkeur voldoet aan vier voorwaarden. Heel wat andere classificaties werden uitgewerkt naargelang verschillende analyses en doelstellingen. De auteurs stelden deze voorwaarden oorspronkelijk op voor economische gegevens. In dit artikel worden de voorwaarden uitgewerkt voor luchtvaartnetwerken.

1. *Ondubbelzinnige waarde*: concentratie-indices moeten eendimensionaal en ondubbelzinnig zijn. Als de concentratie in een bepaald netwerk groter is dan dat in een ander, dan moet dit steeds duidelijk blijken uit de index.
2. *Onafhankelijk van het totaal aantal passagiers*: de waarde van een index moet onafhankelijk zijn van het totaal aantal passagiers in het netwerk. Aan deze voorwaarde kan gemakkelijk worden voldaan als een index wordt berekend aan de hand van het aandeel passagiers van elke stad of verbinding in het netwerk, zijnde s_j .
3. *Afhankelijk van elke stad of verbinding*: de waarde van een concentratie-index moet veranderen indien er een aanpassing is van eender welke s_j . Deze voorwaarde kan als volgt worden uitgedrukt: stel dat een bepaald aantal passagiers overgaan van de i de belangrijkste stad of verbinding naar de j de waarbij s_j groter is dan s_i (dus $j > i$), dan moet de waarde van de index dalen aangezien de concentratie minder groot wordt.
4. *Onafhankelijk van de grootte van het netwerk*: luchtvaartnetwerken van een verschillende grootte (verschillend aantal steden of verbindingen) kunnen toch even geconcentreerd zijn. We nemen dus aan dat een concentratie-index onafhankelijk moet zijn van het aantal steden en/of verbindingen in het netwerk.

2.2 Fictieve netwerken

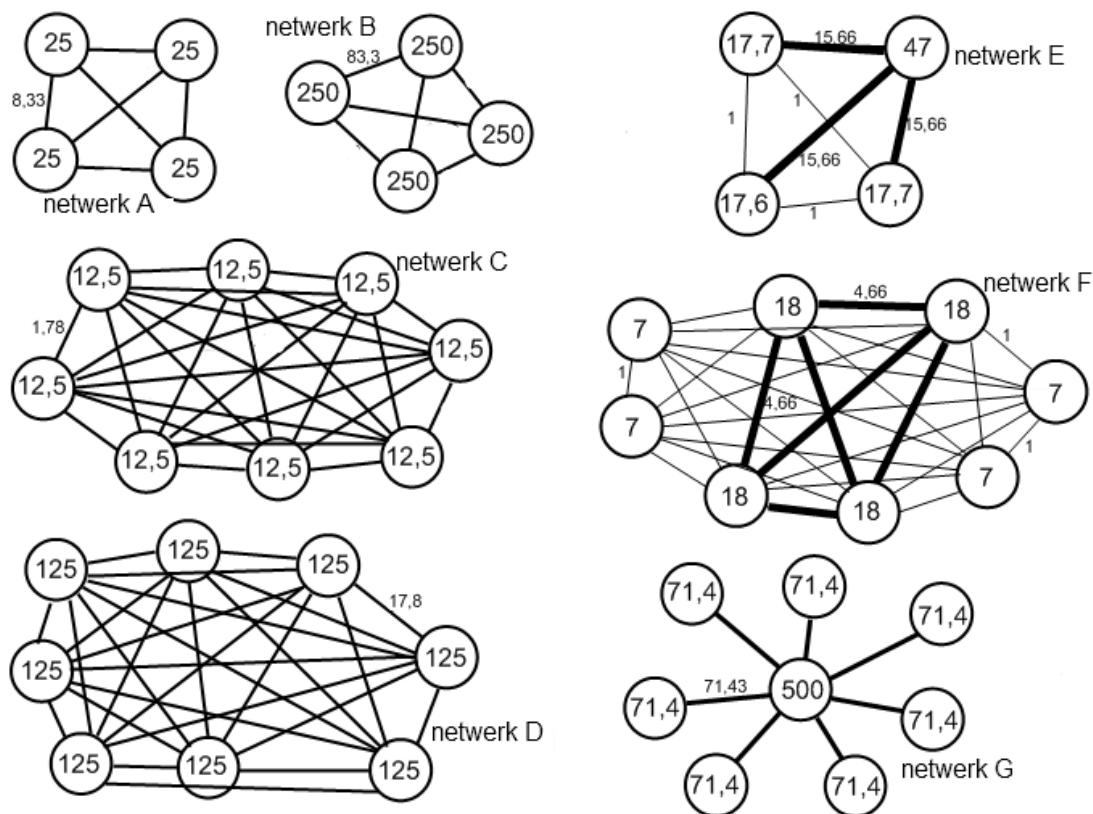
Om de concentratie-indices theoretisch af te toetsen aan bovenstaande voorwaarden, wordt gebruik gemaakt van een aantal fictieve netwerken. In deze fictieve netwerken wordt gevarieerd naar aantal knooppunten, aantal passagiers, mate van concentratie, etc. In Tabel 1 worden de eigenschappen van de netwerken kort toegelicht en in Figuur 1 worden ze gevisualiseerd. In de netwerken A, B, C en D zijn alle steden verbonden met elkaar (point-to-point netwerken) en vervoert elke stad of verbinding een gelijk absoluut aantal passagiers. Zo bevat elke stad in netwerk D 125 passagiers, elke verbinding vertegenwoordigt er 17,8 passagiers. We kunnen dus stellen dat deze vier netwerken een lage mate van concentratie (of een hoge mate van spreiding) bevatten. Er wordt binnen deze vier netwerken gevarieerd naar aantal steden en verbindingen in het netwerk en naar totaal aantal passagiers om zo de voorwaarden te kunnen testen. Het totaal aantal passagiers van de steden is hierbij steeds het dubbel van het aantal geteld over de verbindingen omdat een passagier van een bepaalde verbinding bij beide steden wordt bijgeteld. Netwerken E, F en G zijn monocentristischer opgebouwd maar ook hier verschilt het aantal steden en passagiers. Bovendien is er steeds een andere configuratie van het netwerk: in netwerk E worden alle knooppunten met elkaar verbonden (point-to-point) in tegenstelling tot netwerk G (hub-and-spoke).

Er kan een vergelijking worden gemaakt tussen de waarden van netwerk A (weinig concentratie) en E (sterke concentratie) om te testen of de index wel degelijk weergeeft dat er meer/minder concentratie is (voorwaarde 1). Er kan worden gecontroleerd of de index onafhankelijk is van het aantal passagiers (voorwaarde 2) door de resultaten van netwerk A te vergelijken met deze van B en anderzijds ook C met D. Voorwaarde 3 kan op twee manieren worden nagegaan: door controle van de theoretische berekening van elke index en door vergelijking van de waarden voor netwerk A en C. Door de resultaten

Tabel 1: Configuratie van de fictieve netwerken

Netwerken	A	B	C	D	E	F	G
Aantal steden	4	4	8	8	4	8	8
Aantal verbindingen	6	6	28	28	6	28	7
Aantal passagiers (verbindingen)	50	500	50	500	50	50	500
Aantal passagiers (knooppunten)	100	1.000	100	1.000	100	100	1.000

Figuur 1: Fictieve netwerken: visualisatie



Tabel 2: Resultaten van de indices toegepast op de fictieve netwerken

		A	B	C	D	E	F	G
Knooppunten	CR ₄	1.00	1.00	0.50	0.50	1.00	0.72	0.71
	HHI	0.25	0.25	0.13	0.13	0.31	0.15	0.29
	NCI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.37	0.50
	TI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.05	0.20
Verbindingen	CR ₄	0.67	0.67	0.14	0.14	0.96	0.37	0.57
	HHI	0.17	0.17	0.04	0.04	0.30	0.06	0.14
	NCI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.37	0.00
	TI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.08	0.00

van netwerk A met C te vergelijken (of B met D) wordt bovendien getest of de waarde van de index afhankelijk is van het aantal steden in het netwerk (voorwaarde 4). Analooft kunnen ook de netwerken met een grotere mate van concentratie (E, F en G) worden vergeleken met elkaar.

2.3 Concentratie-indices

In Tabel 2 worden de resultaten weergegeven van de indices toegepast op de fictieve netwerken. In deze paragraaf worden de indices achtereenvolgens uitgewerkt en worden hun resultaten besproken. Alle indices worden hier uitgewerkt voor toepassing op luchtvaart-

netwerken, hoewel ze in de literatuur vaak voor andere netwerken worden gebruikt. De indices kunnen zowel worden gebruikt om de concentratie in de knooppunten (steden) als deze in de verbindingen na te gaan. Beide niveaus worden daarom steeds naast elkaar besproken.

2.3.1 Concentratieratio

De concentratieratio CR_x geeft het gezamenlijke aandeel van de x steden (zijnde alle luchthavens in die stad) of verbindingen met het grootste aantal vervoerde passagiers (Hall & Tideman, 1967). De x bedraagt meestal 2, 4, 8, 20 of 100. De CR₄ is het meest voorkomend en geeft logischerwijs het aandeel weer van de vier steden of verbindingen met het grootste aantal vervoerde passagiers. Zo kan deze

index een indicatie geven van het belang van deze vier dominerende steden of verbindingen in het luchtvaartnetwerk (Sys, 2009). Hoe groter de waarde van de CR_4 , hoe groter de concentratie in het netwerk. De index wordt berekend door de aandelen passagiers van x aantal steden (i.e. s_j) te sommeren:

$$CR_x = \sum_{i=1}^x s_i$$

Specifiek voor netwerk G wordt de CR_4 op het niveau van de knooppunten als volgt berekend. De s_j voor de centrale stad bedraagt 0,5 (=500/1.000). De s_j van de andere steden bedraagt 0,07 (=71,4/1.000). De CR_4 bedraagt dus $0,5 + (3 \cdot 0,07) = 0,71$

De CR_4 is duidelijk erg beperkt. De index reageert enkel op veranderingen in de configuratie van het netwerk als de vier grootste steden of verbindingen hierin opgenomen zijn (Burghouwt et al., 2003). De index voldoet dus niet aan de derde voorwaarde. De CR_4 houdt ook niet op correcte manier rekening met het aantal steden in het netwerk (voorwaarde 4). Netwerken A en C zouden immers even geconcentreerd moeten blijken als aan deze vereiste wordt voldaan. Bovendien wordt ook aan de tweede voorwaarde niet voldaan: de index is afhankelijk van het totaal aantal passagiers. De waarden van netwerken A tot en met D zijn immers niet gelijk aan elkaar.

Er is geen objectieve basis voor de selectie van het aantal steden of verbindingen x dat wordt opgenomen in de CR_x waardoor deze keuze de resultaten sterk beïnvloedt. Zo bedraagt de waarde van CR_4 voor netwerk A 1 en voor C 0,5. Als de CR_8 wordt berekend, blijft de waarde van netwerk A 1 en krijgt ook netwerk C waarde 1. Hoe hoger de waarde van x , hoe groter de concentratie in hetzelfde netwerk blijkt te zijn volgens de CR_x .

2.3.2 Herfindahl-Hirschman index

De Herfindahl-Hirschman index HHI wordt berekend door de aandelen passagiers van alle steden of verbindingen te sommeren (Reynolds-Feighan, 2001). Door het kwadrateren van de percentages worden de steden of verbindingen van een lagere rang – en dus een relatief groot proportioneel aandeel – meer beklemtoond.

$$HHI = \sum_{i=1}^n s_i^2$$

In tegenstelling tot de CR_4 brengt de HHI zowel het aandeel passagiers van elke eenheid (stad of verbinding) als het aantal eenheden in rekening. De aandelen van de belangrijkste eenheden worden hierbij niet geminimaliseerd (Sys, 2009). Een belangrijk nadeel is echter dat de index enkel gevoelig is voor veranderingen in extremen van de gegevens (Burghouwt et al., 2003).

De HHI is afhankelijk van het aantal steden of verbindingen in het netwerk: de waarden van netwerken A en C zijn niet gelijk. De HHI voldoet dus niet aan de vierde voorwaarde. Hoe groter het netwerk, hoe kleiner de gemiddelde waarde van elke s_j en dit beïnvloedt de waarde van de HHI. De HHI voldoet wel aan de andere voorwaarden. Ten eerste is de index onafhankelijk van het totaal aantal passagiers in het netwerk (voorwaarde 2); de waarden van netwerken A en B zijn dezelfde. Dit impliceert ook dat de HHI alle steden en ver-

bindingen in het netwerk in rekening brengt (voorwaarde 3). Hoe groter de mate van concentratie in het netwerk, hoe groter de waarde van de HHI (voorwaarde 1).

2.3.3 Netwerkconcentratie-index

De netwerkconcentratie-index is een variant van de Gini-index GI om netwerken te analyseren. De GI is gebaseerd op de Lorenzcurve die vaak wordt gebruikt om ongelijkheden binnen een bepaalde verdeling te visualiseren (Sys, 2009). De curve toont het verschil tussen een distributiefunctie en de lijn van gelijke verdeling. De Gini-index drukt de Lorenzcurve uit in een enkele waarde en wordt als volgt berekend (Burghouwt et al., 2003):

$$GI = \frac{1}{n^2 \bar{y}} \sum_i \sum_j |x_i - x_j|$$

waarbij y het aantal passagiers van de stad of verbinding i of j voorstelt en n het totaal aantal steden (of verbindingen) in het netwerk. Het gemiddeld aantal passagiers van steden of verbindingen in een netwerk wordt voorgesteld door $\bar{y}$. De waarde van de GI ligt tussen 0 en 1, hoe hoger de waarde hoe meer concentratie.

Burghouwt et al. (2003) stellen dat GI nooit de maximale waarde 1 kan bereiken aangezien er steeds meerdere steden en/of verbindingen in een netwerk zitten. Deze waarde zou immers theoretisch overeen komen met een hub-and-spoke netwerk waarbij alle stromen zijn geconcentreerd in een enkel knooppunt of een enkele verbinding (d.w.z. een “netwerk” van een enkele of twee steden, wat uiteraard niet relevant is in de realiteit). De effectief mogelijke maximale waarde GI_{max} neemt toe met het aantal steden of verbindingen n in het netwerk (Burghouwt et al., 2003). De netwerkconcentratie-index NCI kan dan worden afgeleid door de waarde van de GI te delen door GI_{max} . Aangezien de NCI slechts een kleine aanpassing is van de GI , bespreken we beide hier samen.

$$GI_{max} = 1 - \frac{2}{n}$$

$$NCI = \frac{GI}{GI_{max}}$$

Reynolds-Feighan (2001) stelt dat de NCI de beste index is om de concentratie in transportnetwerken te kwantificeren omdat de volledige distributie wordt gebruikt en toch variaties in de grootte van het netwerk worden toegelaten. Burghouwt et al. (2003) beschouwen de indices als erg geschikt om ongelijkheden in een bepaalde verdeling na te gaan, omdat deze:

- reageert op alle veranderingen in het aandeel passagiers van eender welke stad of verbinding (in tegenstelling tot de CR_4);
- niet overdreven gevoelig is aan overschatting van de belangrijkste steden of verbindingen ten koste van de onderliggende;
- in tegenstelling tot de HHI niet enkel gevoelig is voor extremen, maar voor elke verandering in de distributie;
- onafhankelijk is van het totaal aantal passagiers, steden of verbindingen in het netwerk.

De resultaten van de fictieve voorbeelden bevestigen deze eigenschappen van de NCI . De index is onafhankelijk van zowel het aantal passagiers als het aantal steden of verbindingen in het netwerk. Dit blijkt uit de waarden van netwerk A t.o.v. B, respectievelijk C.

Zowel aan voorwaarde 2 als 4 wordt dus voldaan. Ook aan de derde voorwaarde is voldaan: de waarden geven duidelijk weer dat netwerk E, F en G geconcentreerder zijn dan de andere vier. Uit het resultaat van netwerk G blijkt duidelijk dat de concentratie in een netwerk pas kan worden bestudeerd als zowel de hiërarchische differentiatie in de knooppunten als die in de verbindingen wordt berekend. Immers, het netwerk bevat een zekere mate van concentratie maar alle verbindingen nemen een gelijk aantal passagiers voor hun rekening waardoor de waarde voor de verbindingen 0 bedraagt.

2.3.4 Theilindex

De Theilindex TI wordt als volgt berekend (naar Reynolds-Feighan, 1998):

$$TI = 1 - \left(\frac{\sum \left\{ \left(\frac{s_i}{\sum s_i} \right) \cdot \log \left(\frac{s_i}{\sum s_i} \right) \right\}}{\log n} \right)$$

Hierbij is s_i het aandeel van elke stad in het totaal aantal passagiers en n het totaal aantal steden in het netwerk. Als gevolg van de herschaling van de index ligt de waarde ervan tussen 0 (geen concentratie) en 1. Blackburn (1989) stelt dat de index erg gevoelig is aan veranderingen in de s_i van steden met een klein percentage passagiers aangezien de logaritme van de waarden wordt gebruikt.

Net als de NCI neemt de TI de volledige range van waarden tussen 0 en 1 aan. In alle netwerken waar de steden of verbindingen een gelijk percentage innemen (A tot en met D en G in de verbindingen) bedraagt de waarde 0.

In Tabel 3 wordt samengevat aan welke voorwaarden elke index voldoet. Er blijkt duidelijk dat de netwerkconcentratie-index en de Theilindex theoretisch het best geschikt zijn om de concentratie in transportnetwerken te meten. Om de praktische werking van deze indices te bestuderen, passen we ze in de volgende paragraaf toe op drie netwerken die worden opgebouwd uit binnenlandse stromen (Frankrijk, Duitsland en de Verenigde Staten).

3. Toepassing

3.1 De toetsstenen

We passen de indices toe op drie netwerken waarvan de onderlinge mate van concentratie intuïtief duidelijk is. Ze vormen op deze manier een geschikte empirische toetssteen voor de indices. De gegevens van deze netwerken werden afgeleid uit de MIDT 2001 databank ('Marketing Information Data Transfer'). Deze bevat informatie over vluchtboekingen gemaakt via 'Global Distribution Sys-

tems' (GDS) in de periode januari tot augustus 2001 (Derudder & Witlox, 2005). Concreet wordt aangegeven hoeveel passagiers een bepaald traject tussen twee steden volgen, via welke hub en met welke maatschappij. Een nadeel van deze dataverzameling is dat slechts 80% (Derudder et al., 2007) van het totaal aantal boekingen wordt gemaakt via dergelijke platformen. Lagekostenmaatschappijen maken eerder gebruik van directe boekingen van de passagiers via internet in plaats van via een agentschap aangezien dit de kosten aanzienlijk drukt (Derudder & Witlox, 2005). In de MIDT dataset vertegenwoordigen dus niet alle maatschappijen een gelijk deel. Men zou kunnen stellen dat op deze manier niet het gehele globale luchtvaartnetwerk kan bestudeerd worden aangezien de databank er geen representatieve weergave van is. Niettemin stellen Derudder en Witlox (2005) dat er kan aangenomen worden dat het gebruik van boekingen via GDS een correct beeld geeft van het totaal aantal boekingen en de ruimtelijke verdeling ervan wat de dataset geschikt maakt voor onze analyse.

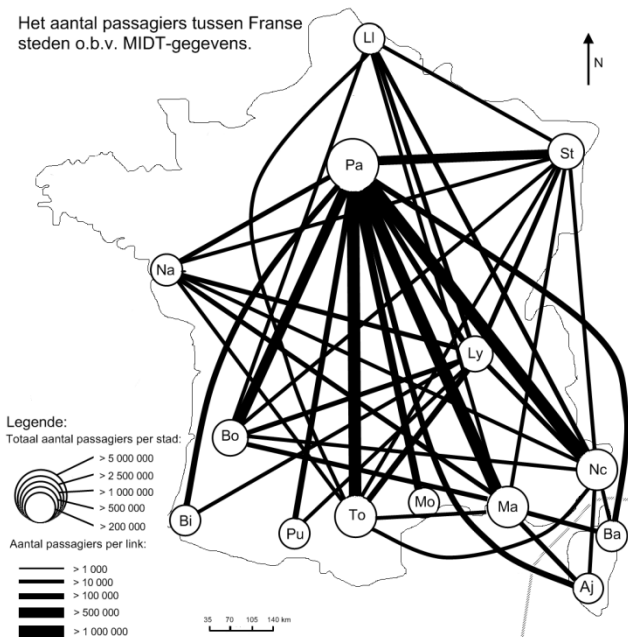
Het belangrijkste voordeel van de MIDT dataset voor deze analyse is dat de gegevens het echte oorsprong - bestemming traject van de passagiers reflecteren in plaats van alle segmenten apart. Op die manier kan binnen de landen van de toetsstenen (bijv. Frankrijk) het stedennetwerk bestudeerd worden, onafhankelijk van de eventuele tussenliggende steden die passagiers nemen in hun route. Zo wordt het belang van deze steden (bijv. Parijs) niet overschat.

In Figuren 2 tot en met 4 worden de configuraties van de netwerken gevisualiseerd. De figuren tonen de concentratie in de belangrijkste knooppunten en in de verbindingen van de netwerken in Frankrijk, Duitsland en de Verenigde Staten. Om de volledige concentratie te bekijken, moeten uiteraard alle steden en verbindingen worden meegeteld. De netwerken van Frankrijk en Duitsland hebben een gelijkaardige grootte, zowel in aantal knooppunten (respectievelijk 53 en 30) als verbindingen (196 in Frankrijk en 105 in Duitsland). Het is echter intuïtief duidelijk dat er sterke verschillen zijn op het gebied van configuratie en concentratie. Het luchtvaartnetwerk van het monocentrische - voornamelijk op Parijs gerichte - Frankrijk is duidelijk geconcentreerder dan dat van het meer polycentrische - op verschillende belangrijke steden zoals Frankfurt, Berlijn, Düsseldorf, Stuttgart, Hamburg en München gerichte - Duitsland (Limtanakool et al., 2007). Om na te gaan hoe de indices omgaan met twee netwerken die een beduidend verschillende omvang hebben, worden ze ook berekend voor het nationale luchtvaartnetwerk van de Verenigde Staten. Dit netwerk lijkt qua configuratie sterk op het Duitse maar telt meer steden (314), verbindingen (2.034) en passagiers. We zullen nagaan of de indices effectief weergeven dat het netwerk van Frankrijk de grootste concentratie bevat en of de netwerken van Duitsland en de Verenigde Staten een gelijkaardige waarde voor de indices hebben.

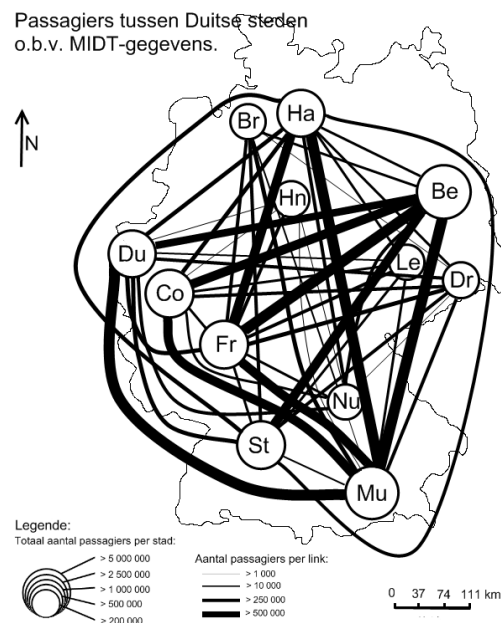
Tabel 3: Theoretische geschiktheid van de indices volgens de voorwaarden

	CR ₄	HHI	NCI	TI
1. Ondubbelzinnige waarde	+	+	+	+
2. Onafhankelijk van het aantal passagiers		+	+	+
3. Afhankelijk van elke stad		+	+	+
4. Onafhankelijk van het aantal steden of verbindingen			+	+

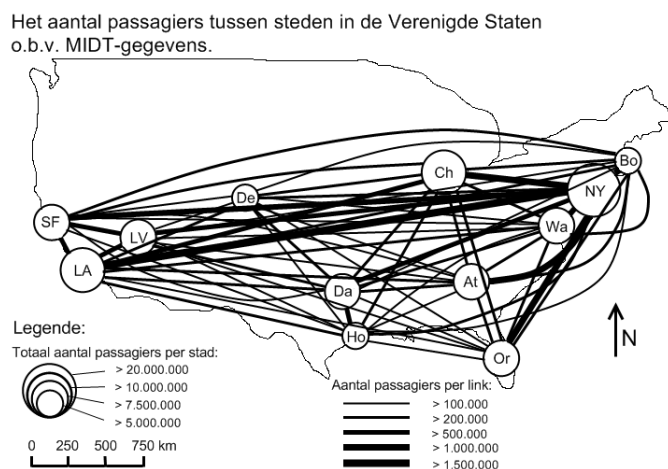
Figuur 2: Het aantal passagiers tussen Franse steden



Figuur 3: Het aantal passagiers tussen Duitse steden



Figuur 4: Het aantal passagiers tussen steden in de Verenigde Staten



3.2 Resultaten

In Tabel 4 worden de resultaten voorgesteld van de indices zoals toegepast op de drie netwerken. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de CR_4 niet geschikt is om luchtvaartnetwerken met elkaar te vergelijken (zie ook paragraaf 2.3.1). Ten eerste wordt Frankrijk niet aangeduid als het netwerk met de grootste concentratie in de knooppunten. De reden voor deze tekortkoming is vrij duidelijk: de CR_4 houdt enkel rekening met de vier belangrijkste steden in het netwerk. Het gecumuleerde aandeel van de vier belangrijkste steden in Frankrijk is kleiner dan in Duitsland, respectievelijk 63,1% en 63,9%. De oorzaak hiervan is dat de steden in de tweede, derde en vierde rang van Duitsland meer passagiers vervoeren dan dezelfde steden in Frankrijk. De resultaten van de verbindingen sluiten wel beter aan bij de realiteit dan deze van de knooppunten. Ten tweede houdt de CR_4 geen rekening met de grootte van een netwerk: de waarde van het netwerk van de Verenigde Staten (0,20) is beduidend kleiner dan deze van de Europese landen (0,64). De CR_4 is dus niet

geschikt om netwerken van een verschillende grootte te vergelijken met elkaar. Algemeen kunnen we stellen dat de concentratieratio CR_X niet geschikt is om concentratie in netwerken van een verschillende grootte te vergelijken.

Ook de HHI houdt geen rekening met het aantal steden in het netwerk. Dit blijkt duidelijk uit de resultaten: de waarde van de Verenigde Staten (0,02) is beduidend kleiner dan de andere waarden (Duitsland: 0,13). Dit blijkt dan ook de belangrijkste tekortkoming te zijn van deze index. Bovendien heeft dit nadeel als gevolg dat de waarden van de HHI voor de verbindingen steeds kleiner zijn dan deze van de knooppunten (er zijn immers steeds meer verbindingen dan knooppunten in eenzelfde netwerk). De index kan dus wel worden gebruikt om netwerken met een gelijk aantal knooppunten en/of verbindingen met elkaar te vergelijken. Hieruit blijkt duidelijk dat het netwerk van Frankrijk meer concentratie bevat dan dat van Duitsland.

Tabel 4: Resultaten van alle indices op de nodes en de verbindingen van de reële netwerken

Knooppunten	CR ₄	HHI	NCI	TI
Frankrijk	0,63	0,18	0,86	0,38
Duitsland	0,64	0,13	0,82	0,31
V.S.	0,20	0,02	0,81	0,24
Verbindingen	CR ₄	HHI	NCI	TI
Frankrijk	0,43	0,06	0,82	0,31
Duitsland	0,30	0,04	0,75	0,23
V.S.	0,05	0,01	0,58	0,54

Uitgaande van de formule van de GI, kan worden verwacht dat de NCI, meer dan de vorige indices, onafhankelijk is van de grootte van het netwerk. De resultaten geven aan dat Frankrijk het meest geconcentreerde luchtvaartnetwerk heeft, zowel in de knooppunten (0,86) als de verbindingen (0,82). Het netwerk van Duitsland wordt aangeduid als minder geconcentreerd (0,82). De waarden van de indices toegepast op de drie netwerken opgebouwd uit de knooppunten van de landen liggen eerder in dezelfde grootteorde als dit wordt vergeleken met dezelfde waarden van de CR₄ en HHI.

Ook de Theilindex is theoretisch gezien onafhankelijk van het aantal steden of verbindingen in het netwerk. Het netwerk van Frankrijk (0,38) is het meest geconcentreerd. Het netwerk van de Verenigde Staten (0,24) is minder geconcentreerd dan dat van Frankrijk en Duitsland. Bij de resultaten van de verbindingen moeten andere besluiten worden gemaakt. De Verenigde Staten hebben een beduidend geconcentreerder netwerk (0,54) dan de andere landen wat niet klopt met de toetsstenen. Hieruit blijkt dat de Theilindex toch afhankelijk is van het aantal steden of verbindingen indien het verschil tussen de bestudeerde netwerken erg groot is. Indien de Verenigde Staten niet wordt meegenomen in de analyse, volgen de resultaten de toetsstenen. Het netwerk gevormd door de verbindingen van Frankrijk heeft immers een grotere mate van concentratie dan dat van Duitsland.

Zowel door de NCI als door de TI wordt aangegeven dat het netwerk van Duitsland meer concentratie bevat dan dat van de Verenigde Staten in de knooppunten, maar niet in de verbindingen ertussen. Dit wijst erop dat er enkele verbindingen zijn tussen Amerikaanse steden die een groot aandeel passagiers opnemen maar dat deze niet allemaal vertrekken vanuit eenzelfde stad. Op Figuur 4 was duidelijk te zien dat het hier voornamelijk over oost-west verbindingen gaat (bijvoorbeeld New York – Los Angeles, San Francisco – New York, Chicago – Los Angeles). In Duitsland zijn de belangrijkste verbindingen wel meer tussen dezelfde steden (Berlijn, München, Frankfurt).

4. Conclusie

In dit artikel wordt onderzocht hoe concentratie-indices de concentratie in een luchtvaartnetwerk meten. Met de conclusies uit dit artikel kan rekening worden gehouden in verscheidene analyses. Reeds heel wat auteurs onderzochten methoden om de concentratie in netwerken te meten, zowel aan de hand van bovenstaande indices als andere, al dan niet geschikte indices.

De CR₄ en de HHI kunnen niet worden gebruikt om netwerken van een verschillende grootte met elkaar te vergelijken. De CR_x is anderzijds wel geschikt om bijvoorbeeld twee netwerken te vergelijken waarin x steden een centrale hubfunctie vervullen. Zo kan nagegaan worden welk percentage passagiers deze steden samen vertegenwoordigen. De index kan ook worden gebruikt om een vlug overzicht te krijgen van de graad van concentratie in een netwerk. O'Connor (2003) gebruikte daarom de CR₁₀₀ om veranderingen in het luchtvaartnetwerk na te gaan. Sys (2009) gebruikte de CR₄ en CR₈ om veranderingen in competitie tussen havens te bestuderen maar had voor een diepgaandere analyse beter een andere index (bijvoorbeeld de GI) gebruikt. In haar analyse blijft het netwerk gelijk qua grootte, dus is de CR_x een geschikte index om het belang van enkele dominerende havens in te schatten.

De HHI kan enkel worden gebruikt om netwerken te vergelijken die een gelijkaardig passagiers en steden hebben. Zo kan men via een eenvoudige berekening een snel inzicht krijgen in de mate van concentratie. Borenstein (1992) gebruikte de CR_x en de HHI om enerzijds na te gaan in welke mate luchthavens al dan niet een hub vormen, anderzijds om de concentratie in het netwerk van de Verenigde Staten te meten met verschillende tijdsintervallen. Hier blijft de grootte van het netwerk min of meer gelijk, dus is de HHI geschikt voor deze analyse. Martín en Voltes-Dorta (2008) gingen na hoe de hubvorming van een luchtvaartmaatschappij kan worden gemeten door verschillende concentratie-indices (Gini-index, Theilindex, Herfindahl-Hirschman index). Ook veel andere methodes en indices worden gebruikt om concentratie in netwerken te meten. Martín en Voltes-Dorta (2009) introduceren een nieuwe methode om de 'hubbing' in een netwerk te meten. Van Nuffel et al. (2010a) gebruiken 'multiple linkage analysis' MLA om concentratie na te gaan.

Indices die niet afhankelijk zijn van het aantal steden in het netwerk zijn de Gini-index, de Theilindex en de netwerkconcentratie-index NCI. Theoretisch blijkt de NCI de meest geschikte index te zijn om concentratie in een netwerk te bestuderen. Deze conclusie wordt bevestigd na toepassing van de indices op enkele concreet bestaande luchtvaartnetwerken als proxy voor het stedensysteem. Er kan worden geconcludeerd dat de NCI beter geschikt is dan de Theilindex tenzij de netwerken een beduidend verschillende grootte (aantal steden en/of verbindingen) hebben. In dat geval moet steeds grondig worden onderzocht of de concentratie-indices de concentraties in dergelijke netwerken op een vergelijkbare manier meten. Veldhuis (1997) en Burghouwt et al. (2003) analyseerden bijvoorbeeld hoe connectiviteitsmaten de positie van een luchthaven in het netwerk

kunnen aantonen. Hierdoor kan de marktpositie worden bepaald en eventueel een strategie worden opgesteld.

De resultaten van de concentratie in de nodes en deze in de verbindingen wijken vaak af van elkaar. Er werd aangetoond dat netwerken waarbij de nodes een gelijkaardige concentratie vertonen toch erg kunnen verschillen van elkaar in de verbindingen. Beide soorten hiërarchische differentiatie moeten dus bij elkaar worden geteld om de volledige configuratie van een netwerk te bestuderen.

Referenties

- Blackburn, M.-L.: 1989, Poverty measurement: an index related to a Theil measure of inequality. *Journal of Business & Economic Statistics*. 7, 475-481.
- Borenstein, S.: 1992, The evolution of US airline competition. *Journal of Economic Perspectives* 6 (2), 45-73.
- Burghouwt, G., Hakfoort, J. en Ritsema van Eck, J.: 2003, The spatial configuration of airline networks in Europe. *Journal of Air Transport Management*. 9, 303-323.
- Derudder, B.: 2008, Mapping global urban networks: A decade of empirical world cities research. *Geography Compass*. 2 (2), 559-574.
- Derudder, B., Devriendt, L. en Witlox, F.: 2007, Flying where you don't want to go: an empirical analysis of hubs in the global airline network. *Tijdschrift voor economische en sociale geografie*. 98 (3), 307-324.
- Derudder, B. en Witlox, F.: 2005, An appraisal of the use of airline data in assessing the World City Network: a research note on data. *Urban Studies*. 42, 2371-2388.
- Derudder, B. en Witlox, F.: 2009, The impact of progressive liberalization on the spatiality of airline networks: a measurement framework based on the assessment of hierarchical differentiation. *Journal of Transport Geography*. 17, 276-284.
- Dresner, M., Lin, J. en Windle, R.: 1996, The impact of low-cost carriers on airport and route competition. *Journal of Transport Economics and Policy*. 309-328.
- Hall, M. en Tideman, N.: 1967, Measures of concentration. *Journal of the American Statistical Association*. 62, 162-168.
- Limtanakool, N., Dijst, M. en Schwanen, T.: 2007, A theoretical framework and methodology for characterizing national urban systems on the basis of flows of people: empirical evidence for France and Germany. *Urban Studies*. 44, 2123-2145.
- Martín, J.C. en Voltes-Dorta, A.: 2008, Theoretical evidence of existing pitfalls in measuring hubbing practices in airline networks. *Networks and Spatial Economics* 8 (2-3), 161-181.
- Martín, J.C. en Voltes-Dorta, A.: 2009, A note on how to measure hubbing practices in airline networks. *Transportation Research Part E* 45, 250-254.
- O'Connor, K.: 2003, Global air travel: toward concentration or dispersal? *Journal of Transport Geography*. 11, 83-92.
- Pumain, D.: 2006, *Hierarchy in Natural and Social Sciences*. Dordrecht: Springer.
- Reynolds-Feighan, A.: 1998, The impact of the U.S. airline deregulation on airport traffic patterns. *Geographical Analysis*. 30, 234-253.
- Reynolds-Feighan, A.: 2001, Traffic distribution in low-cost and full-service carrier networks in the U.S. air transportation market. *Journal of Air Transport Management*. 7, 265-275.
- Sys, C.: 2009, Is the container liner shipping industry an oligopoly? *Transport Policy*. 16, 259-270.
- Van Nuffel, N., Saey, P., Derudder, D., Devriendt, L. en Witlox, F.: 2010a, Measuring hierarchical differentiation: connectivity and dominance in the European urban network. *Transportation Planning and Technology* 33 (4), 343-366.
- Van Nuffel, N., Derudder, B. en Witlox, F.: 2010b, Even important connections are not always meaningful: the use of a polarization measure in a typology of European cities in air transport networks. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie* 101 (3), 333-348.
- Veldhuis, J.: 1997, The competitive position of airline networks. *Journal of Air Transport Management* 3 (4), 181-188.

Noten

- 1 Universiteit Gent – Vakgroep Geografie
Krijgslaan 281, Gebouw S8
9000 Gent - België
<http://www.geoweb.ugent.be/seg>
katrien.plasschaert@ugent.be;
ben.derudder@ugent.be;
frank.witlox@ugent.be

Het leren van reistijden en reistijdonzekerheid: Modellen van een Bayesiaanse reiziger

Caspar G. Chorus*, Theo A. Arentze**, Harry J.P. Timmermans**

Summary

This paper presents a generic model of travel time learning, founded on Bayes Theorem as applied in the field of Bayesian econometrics. It presents two methodological contributions. First, whereas previous work has focused on learning a route's mean travel time, our model acknowledges that travelers may learn a route's day-to-day travel time variability as well. Secondly, our model incorporates the notion that travelers that are provided with ex post travel time information may learn over time that travel times on nearby routes are likely to be correlated (covary). We illustrate our model using numerical examples.

Keywords: *Bayesian learning; Travel time; Travel time unreliability*

Samenvatting

Dit artikel presenteert een generiek leermodel voor reistijddistributies, gebaseerd op de wet van Bayes zoals toegepast in Bayesiaanse econometrie. Het artikel bevat twee methodologische bijdragen. Ten eerste, waar eerdere studies zich richtten op hoe reizigers gemiddelde reistijden leren, modelleren wij ook hoe reizigers kunnen leren hoe groot de reistijdonbetrouwbaarheid is van verschillende routes. Ten tweede modelleren wij hoe reizigers die de beschikking hebben over ex post-reistijdinformatie kunnen leren in welke mate de reistijden van dichtbij gelegen routes gecorreleerd zijn. Numerieke voorbeelden worden gepresenteerd ter illustratie van het model.

Keywords: *Bayesiaans leren; Reistijden; Reistijdonbetrouwbaarheid*

1. Introductie

De meeste vormen van mobiliteitsbeleid hebben het beïnvloeden van de keuzes van individuele reizigers tot doel. Reizigers op hun beurt baseren deze keuzes op hun perceptie van de werkelijkheid, die niet noodzakelijkerwijs volledig overeenkomt met de werkelijkheid zelf. Zo kiezen automobilisten hun routes op basis van, onder andere, hun inschatting van de reistijden en de bijbehorende reistijdonzekerheid voor verschillende routes. De volgende constatering is hiermee een open deur: beleid dat erop gericht is reizigers andere (meer duurzame of efficiënte) keuzes te laten maken staat of valt met een goed begrip van hoe deze reizigers de werkelijkheid percipiëren. Terugkomend op het routekeuze-voorbeeld: effectief prijsbeleid en een effectieve reisinformatievoorziening zijn niet mogelijk zonder inzicht in hoe reizigers reistijden percipiëren (en afwegen ten opzichte van andere kenmerken, zoals kosten). Omdat de meerderheid van ritten herhaaldelijk gemaakt wordt, met als meest aan-

sprekende voorbeeld de rit naar en van werk, zijn deze reistijdpercepties het gevolg van een proces van leren.

Dit alles in acht nemend wekt het geen verbazing dat er de afgelopen jaren een indrukwekkend aantal, veelal theoretische, studies is verschenen over hoe reizigers reistijden leren (zie Jotisankasa en Polak (2006), Chorus (2007) en Bogers (2009) voor recente overzichten). Bijna zonder uitzondering karakteriseren deze studies een in de loop der tijd geleerde reistijd in termen van een gewogen gemiddelde over geobserveerde reistijden en ontvangen reistijdinformatie. Het meest gebruikte raamwerk voor dergelijke modeloefeningen is dat van Bayesiaans leren (b.v. Kaysi, 1991; Jha et al., 1998; Chen & Mahmassani, 2004; Chorus et al., 2006, 2009). Kort gezegd komt de Bayesiaanse methode er op neer dat de reiziger verondersteld wordt zijn initiële kennis aangaande een onzekere gebeurtenis (b.v. het optreden van een bepaalde reistijd voor een bepaalde route) te percipiëren in termen van een kansdichtheidsfunctie over alle mogelijke reistijden. Op basis van een observatie (een ervaren reistijd tijdens een rit, of een bericht ontvangen van een reisinformatiedienst) past de reiziger zijn initiële kennis aan. Dit leerproces volgt de wet van Bayes: de aangepaste reistijdperceptie is een gewogen gemiddelde van de initiële kennis en de nieuwe observatie, waarbij de gewichten de bijbehorende (gepercipieerde) betrouwbaarheid representeren van respectievelijk de initiële kennis en de nieuwe observatie.

Dit artikel presenteert twee methodologische bijdragen aan de sterk groeiende literatuur aangaande het leren van reistijden door 'Bayesiaanse' reizigers, gebruik makend van methoden die recentelijk ontwikkeld zijn binnen de zogenaamde Bayesiaanse econometrie¹. Ten eerste: tot nu toe hebben Bayesiaanse leermodellen zich gericht op hoe reizigers in de loop der tijd de gemiddelde reistijd van een route leren, wat zich laat modelleren door middel van een reistijdvariantie die steeds kleiner wordt naarmate meer observaties beschikbaar komen. Dergelijke modellen representeren echter maar een deel van het mogelijke leerproces aangezien ze de dagelijkse variabiliteit in reistijden negeren (zie de appendix in Jha et al. (1998) voor een bespreking van deze omissie). Het in dit artikel gepresenteerde model presenteert een oplossing voor dit probleem door rekenschap te geven van het feit dat reizigers, naast de gemiddelde reistijd, ook de mate van dagelijkse reistijdvariabiliteit kunnen leren. Dit leerproces wordt gemodelleerd door middel van een additionele stochastische term waarvan de variantie, naarmate in de loop der tijd meer observaties beschikbaar komen, de werkelijke dagelijkse reistijdvariabiliteit benadert. Grote aantallen observaties leiden in ons model dus tot een steeds nauwkeuriger schatting van de gemiddelde reistijd én de dagelijkse reistijdvariabiliteit. Als zodanig ondervangt ons model twee vormen van reistijdonzekerheid (onzekerheid met betrekking tot de gemiddelde reistijd, en onzekerheid die het resultaat is van reistijdvariabiliteit), waar eerdere modellen zich enkel richtten op de eerste van deze twee. Deze bijdrage is als zodanig met name relevant in het licht van de sterk groeiende interesse voor de wijze waarop reizigers omgaan met reistijdvariabiliteit (b.v. Lam &

Small, 2001; Brownstone & Small, 2005; Fosgerau & Kalström, 2010). Ten tweede ondervangt ons model de intuïtie dat reizigers de reistijden van nabijgelegen routes als gecorreleerd beschouwen. Deze gepercipieerde correlatie kan bij voorbeeld het gevolg zijn van de notie dat congestie meestal grotere delen van het netwerk betreft, in plaats van geïsoleerde routes. Ons model veronderstelt dat reizigers die ex post-reistijdinformatie ontvangen, op een Bayesiaanse wijze leren in welke mate de reistijden van nabijgelegen routes correleren.

In sectie 2 beargumenteren wij onze keuze voor een Bayesiaans raamwerk voor het modelleren van leerprocessen (2.1.) en presenteren wij een model voor reistijdonzekerheid (2.2) en een model voor het leren van reistijden en reistijdonzekerheid (2.3). Sectie 3 bevat een numeriek voorbeeld ter illustratie van de werking van het model. Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek worden aangeleerd in sectie 4.

2. Een generiek Bayesiaans model voor het leren van reistijden en reistijdonzekerheid

2.1 Voor- en nadelen van het Bayesiaanse perspectief

Sinds de jaren 1960 (Raiffa & Schlaifer, 1961) is het Bayesiaanse perspectief uiterst populair voor het ontwerpen van optimale leerprocessen. In tegenstelling tot de genoten populariteit als normatief model, is de Bayesiaanse methode als descriptief model van werkelijk leergedrag (b.v. Edwards, 1963) erg omstreden. Ook al is de methode geaccepteerd in de gemeenschap van microeconomen als nuttig model voor keuzegedrag in condities van onzekerheid (zie bij voorbeeld het werk van Harsanyi (1976) aangaande het Bayesiaans modelleren van strategisch gedrag in condities van onvolledige informatie), veel psychologen wijzen op de beperkte rekenkundige capaciteit van mensen, die volstrekt ontoereikend zou zijn voor het doorlopen van complexe Bayesiaanse leerprocessen (b.v. Kahneman & Tversky, 1972; El-Gamal & Grether, 1995).

Toch neigt de gemeenschap van gedragswetenschappers in toenemende mate naar het volgende standpunt: al is het expliciet uitvoeren van een Bayesiaans leerproces waarschijnlijk te veel gevraagd van de meeste mensen, het blijkt dat de uitkomsten van leerprocessen (zoals keuzes) vaak goed aansluiten bij de voorspellingen van Bayesiaanse leermodellen (b.v. Birnbaum, 1983; Viscusi & Magat, 1992; Gigerenzer & Hoffrage, 1995; Hakes & Viscusi, 1997; Gopnik et al., 2004; Aadland et al., 2007). Bovendien, en dit zal in meer detail worden besproken in sectie 2.3, vertoont de Bayesiaanse methode eigenschappen die zeer intuïtief zijn in de context van het leren van reistijden en reistijdonzekerheid.

Tot slot is er een aanvullende, pragmatische reden om te kiezen voor de Bayesiaanse benadering: de methode maakt gebruik van één enkele vergelijking (wet) om de wijze te modelleren waarop reizigers – steunend op initiële kennis, ervaren reistijden en ontvangen reisinformatie – zich in de loop der tijd een beeld vormen van de reistijden op verschillende routes, en van de wijze waarop deze reistijden variëren en onderling gecorreleerd zijn. In tegenstelling tot andere leermodellen die recentelijk gepresenteerd zijn in deze context (zie

Jotisankasa en Polak (2006), Chorus et al. (2006b) en Bogers (2009) voor recente overzichten), maakt de Bayesiaanse methode géén gebruik van additionele parameters en ad-hoc veronderstellingen over leergedrag.

2.2 Een generiek model van reistijdonzekerheid

Vooraleer ons leermodel te presenteren, is het van belang duidelijk te maken wat wij onder reistijdonzekerheid verstaan, en welke bronnen van onzekerheid wij in beschouwing nemen (en op welke manier). Neem hiervoor een reiziger die kiest tussen n routes, waarvan de reistijden geplaatst zijn in een n -dimensionele vector TT . Deze reistijden zijn onzeker in de perceptie van de reiziger, in de zin dat deze niet bij aanvang van de rit precies kan voorspellen welke reistijden de verschillende routes zullen hebben (of: welke waarden de elementen in TT zullen aannemen). Deze onzekerheid heeft drie oorzaken.

Een eerste bron van onzekerheid is een gevolg van dagelijkse variabiliteit in het transportnetwerk. Meer specifiek: de reiziger weet dat ook wanneer hij in de loop der tijd kan steunen op een steeds uitgebreidere ervaring, reistijden deels onzeker blijven door, bij voorbeeld, het weer of het vóórkomen van ongelukken. Daarnaast realiseert de reiziger zich dat de reistijden van de verschillende routes gecorreleerd kunnen zijn: wij veronderstellen dat hij TT percipieert in termen van een multivariate normaalverdeling met vector van gemiddelde reistijden en een covariantiematrix $\Sigma(TT)$. De diagonale elementen van $\Sigma(TT)$ representeren de reiziger zijn beste inschattingen voor de variantie van de reistijden, en de overige elementen geven zijn beste inschatting van de covarianties voor verschillende routeparen.

Ten tweede is de reiziger onzeker over de gemiddelde reistijden μ voor de routes, als gevolg van een beperkte ervaring met de routes. De reiziger wordt daarom geacht de vector van reistijdgemiddelden μ te beschouwen in termen van een multivariate normaalverdeling, die gecentreerd is rond een vector van geschatte ('best guess') gemiddelden $\hat{\mu}$, en met een covariantiematrix $\Sigma(\mu)$.

Een derde bron van onzekerheid betreft de covariantiematrix voor de reistijden $\Sigma(TT)$: de reiziger kent de varianties (lees: de mate van dagelijkse variabiliteit) en de covarianties niet precies. We veronderstellen dat de perceptie van de reiziger aangaande $\Sigma(TT)$ een zogenaamde Inverted Wishart (IW)-distributie volgt, met v vrijheidsgraden en schaalmatrix S . De keuze voor deze IW-distributie berust deels op pragmatische gronden; zij garandeert non-negatieve varianties en laat een efficiënte formulering toe van het leerproces (zie 2.3). De volgende vergelijking vat deze drievoudige onzekerheid samen:

$$TT = \hat{\mu} + \varepsilon_{\mu} + \varepsilon_{TT} \quad (1).$$

Hier staat $\varepsilon_{\mu} \sim N(0, \Sigma(\mu))$ voor de onzekerheid die het gevolg is van een gebrek aan ervaring (het niet precies weten van reistijdgemiddelden μ). Component $\varepsilon_{TT} \sim N(0, \Sigma(TT))$ staat voor die onzekerheid die volgt uit de dagelijkse variabiliteit. De elementen van $\Sigma(TT)$ zijn niet precies bekend, maar volgen een $IW(v, S)$ -distributie.

In de literatuur (b.v. Jha et al., 1998; Chen & Mahmassani, 2004) wordt meestal verondersteld dat een reiziger de gemiddelde reistijden van routes μ kan achterhalen door middel van een herhaald proces van waarneming en ervaring, in combinatie met het ontvangen van reisinformatie: uiteindelijk zal dit proces er voor zorgen dat (de variantie van) ε_{μ} steeds kleiner wordt en uiteindelijk verwaarloosbaar. Maar het feit dat de term ε_{TT} in de huidige modellen niet voor komt, impliceert dat reizigers verondersteld worden de werkelijke reistijden TT met steeds toenemende zekerheid kunnen voorspellen. De bijdrage van ons model zit hem in het feit dat wij een tweede storingsterm ε_{TT} opnemen en dat wij veronderstellen dat, ongeacht de lengte van het leerproces, deze term niet per definitie kleiner wordt. Het gevolg is dat – in ons model – reizigers door middel van leren maar twee van de drie bronnen van reistijdonzekerheid kunnen wegnemen; de onzekerheid die volgt uit dagelijkse variabiliteit blijft bestaan.

2.3 Een generiek model van het leren van reistijden en reistijdonzekerheid

Neem de situatie waarin een reiziger ex post-reistijdinformatie ontvangt voor alle niet-gekozen routes (zie Bogers (2009) voor een bespreking van het nut van de verstrekking van dit type reisinformatie). De aard van dit type informatie staat de veronderstelling toe dat deze informatie door de reiziger wordt gezien als een volledig betrouwbare weergave van de reistijd die op die specifieke dag is gerealiseerd op de verschillende niet-gekozen routes. In combinatie met zijn eigen (betrouwbare) observatie voor de gekozen route, heeft de reiziger dus een volledig juist beeld van de reistijden op die dag voor alle routes. Door de wet van Bayes toe te passen kan de reiziger deze kennis van reistijden inzetten om een beter beeld te krijgen van de gemiddelde reistijden voor alle routes, en van de reistijdvarianties en -covarianties.

In notatie: de reiziger is in de positie om μ en $\Sigma(TT)$ te leren door een proces van Bayesiaans leren. Gebruik makend van de formulering van Zellner (2007) in de context van Bayesiaanse econometrie, kan dit leerproces in de volgende vergelijking worden weergegeven:

$$g(\mu, \Sigma(TT)|y) = \pi(\mu, \Sigma(TT)) \cdot f(y|\mu, \Sigma(TT)) / h(y) \quad (2).$$

Hier staat $g(\mu, \Sigma(TT)|y)$ voor de bijgestelde perceptie van de kansdichtheidsfunctie betreffende de gemiddelde reistijden en de reistijd(co-)varianties, na de werkelijke reistijden y geobserveerd te hebben door middel van eigen ervaring of ex post-reistijdinformatie. Factor $f(y|\mu, \Sigma(TT))$ staat voor de waarschijnlijkheid van geobserveerde reistijden, gegeven een combinatie van gemiddelde reistijden en reistijd(co-)varianties. De initiële kennis van de reiziger, in termen van zijn gepercipieerde kansdichtheidsfunctie betreffende de gemiddelde reistijden en reistijd(co-)varianties, wordt gegeven door $\pi(\mu, \Sigma(TT)|y)$. Factor $h(y)$, de marginale kansdichtheid van geobserveerde reistijden, speelt een normaliserende rol.

De berekening van zogenaamde ‘posterior densities’ zoals is standaard in de Bayesiaanse econometrie (zie Train (2003) voor een gedetailleerd stappenplan) – vandaar dat wij er hier niet uitgebreid op in gaan. Het is wel van belang hier op te merken dat een pragmatische keuze van kansdichtheidsfuncties voor de stochastische

termen in vergelijking (1) noodzakelijk is om de berekening van $g(\mu, \Sigma(TT)|y)$ mogelijk te maken. Onze keuze voor de normaalverdelingen voor ε_{μ} en ε_{TT} en de IW-verdeling voor $\Sigma(TT)$ moeten in dit licht gezien worden.

Meer concreet wil vergelijking (2) het volgende zeggen in gedragsmatige termen: de kans die een reiziger toedicht aan een combinatie van gemiddelde reistijden en de reistijd(co-)varianties, na de werkelijke reistijden tijdens en na een specifieke rit geobserveerd te hebben, is proportioneel aan het product van i) de kans die hij voorafgaand aan de rit toedichtte aan deze combinatie van gemiddelde reistijden en reistijd(co-)varianties, en ii) de waarschijnlijkheid dat die combinatie van gemiddelde reistijden en reistijd(co-)varianties resulteert in de gedane observatie.

Om dit alles nog één stap meer concreet te maken: de voorspellingen van dit generieke leermodel zijn zeer intuïtief zijn in de context van het leren van reistijden en reistijdonzekerheid:

- Wanneer een reiziger een relatief hoge (lage) reistijd observeert voor een bepaalde route, stelt hij zijn inschatting voor de gemiddelde reistijd voor die route naar boven (beneden) bij.
- In die mate dat een geobserveerde reistijd voor een bepaalde route hoger of lager dan verwacht is, stelt de reiziger zijn inschatting voor de reistijdvariabiliteit naar boven bij.
- Wanneer een reiziger op een bepaalde dag een hoger dan verwachte reistijd voor de ene route én een lager dan verwachte reistijd voor een andere route observeert (of vice versa), dan stelt hij zijn inschatting voor de covariantie tussen de twee routes naar boven bij. Het omgekeerde is het geval wanneer allebei de routes simultaan een hoger (of lager) dan verwachte reistijd hebben.
- Wanneer de reiziger zijn inschattingen betreffende gemiddelde reistijden relatief betrouwbaar (onbetrouwbaar) acht, hebben geobserveerde reistijden weinig (veel) invloed op de inschatting van de reiziger met betrekking tot gemiddelde reistijden.
- Wanneer de reiziger van mening is dat er veel (weinig) dagelijkse variabiliteit is in reistijden, hebben geobserveerde reistijden weinig (veel) invloed op de inschatting van de reiziger met betrekking tot gemiddelde reistijden.
- Hoe meer observaties de reiziger heeft gemaakt, hoe zekerder hij is aangaande zijn inschattingen voor gemiddelde reistijden en reistijd(co-)varianties, en hoe minder gewicht hij toekent aan nieuwe observaties.

3. Een numeriek voorbeeld

Neem de volgende, arbitraire en fictieve situatie: een forens is van baan veranderd, en kent twee routes A en B naar zijn nieuwe werkplek. Zij heeft geen van beide routes ooit zelf afgelegd, maar op basis van algemene kennis over het transportnetwerk heeft zij initiële verwachtingen aangaande i) de gemiddelde reistijden van de routes en ii) de reistijd(co-)varianties. Het totale gebrek aan ervaring in acht nemend, zijn deze verwachtingen vrij diffuus en speelt onzekerheid een grote rol. Gebruik makend van onze notatie, verwacht de reiziger dat de reistijden voor beide routes getrokken worden uit een multivariate normaalverdeling $TT \sim N(\mu, \Sigma(TT))$, met $\mu \sim N(\hat{\mu}, \Sigma(\mu))$ en $\Sigma(TT) \sim IW(\nu, S)$. Hier zijn $\hat{\mu}$, $\Sigma(\mu)$, ν en S als volgt gespecificeerd:

$$\hat{\mu} = \begin{pmatrix} 55 \\ 55 \end{pmatrix}, \Sigma(\mu) = \begin{pmatrix} 36 & 18 \\ 18 & 36 \end{pmatrix}; \nu = 20, \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{pmatrix} \quad (3).$$

In woorden: de reiziger schat dat beide routes gemiddeld even snel zijn (55 minuten reistijd), en dat er 95% kans is per route dat de reistijd valt tussen de 43 en 67 minuten ($55 \pm 2 \cdot \sqrt{36}$). De positieve covarianties in $\Sigma(\mu)$ geven aan dat de reiziger schat dat wanneer de gemiddelde reistijd van één van de routes hoger is dan de initiële inschatting, de gemiddelde reistijd van de andere route dan waarschijnlijk ook hoger zal zijn dan de desbetreffende inschatting. Om een meer intuïtief begrip te krijgen van de IW-verdeelde covariantiematrix $\Sigma(TT)$, die de inschatting aangeeft van de reiziger betreffende de mate waarin de reistijden voor de tweede routes variëren en covariëren, berekenen we haar verwachting en variantie door middel van simulatie:

$$\mathbf{E}(\Sigma(TT)) = \begin{pmatrix} 11.77 & 0 \\ 0 & 11.77 \end{pmatrix}, \mathbf{Var}(\Sigma(TT)) = \begin{pmatrix} 18.44 & 8.73 \\ 8.73 & 18.52 \end{pmatrix} \quad (4).$$

De verwachting van de covariantiematrix, $\mathbf{E}(\Sigma(TT))$, laat zien dat de reiziger schat i) dat er weinig reistijdvariabiliteit is van dag tot dag en ii) dat er geen reistijd covariantie is tussen de twee routes. De variantie van de covariantiematrix, $\mathbf{Var}(\Sigma(TT))$, geeft aan dat reiziger zich er sterk van bewust is dat haar inschattingen incorrect kunnen zijn, gegeven haar gebrek aan ervaring. Meer specifiek: zij schat in dat de reistijdvariabiliteit hoger of lager (maar niet negatief) kan zijn dan zijn beste inschatting, en dat zowel positieve als negatieve covariantie mogelijk is².

We veronderstellen dat de werkelijke reistijden voor de twee routes worden getrokken uit

$$TT^{\text{true}} \sim N(\mu^{\text{true}}, \Sigma^{\text{true}}(TT)),$$

waar

$$\mu^{\text{true}} = \begin{pmatrix} 65 \\ 75 \end{pmatrix} \text{ en } \Sigma^{\text{true}}(TT) = \begin{pmatrix} 64 & 33.6 \\ 33.6 & 49 \end{pmatrix}.$$

In woorden: route A is gemiddeld sneller dan route B, maar zijn reistijd is meer variabel. In 95% van de gevallen valt de reistijd van route A binnen het [49, 81] interval. De reistijd van route B valt in 95% van de gevallen binnen het [61, 89] interval. De twee routes zijn aanzienlijk gecorreleerd in termen van hun reistijden (de correlatiecoëfficiënt is $33.6 / (\sqrt{64} \cdot \sqrt{49}) = 0.6$).

Wanneer we de gepercipieerde en de werkelijke reistijdverdelingen naast elkaar zetten, zien we dat de reiziger de reistijden van de twee routes onderschat, net als hun variabiliteit en covariabiliteit. In het vervolg van deze sectie onderzoeken wij, gebruik makend van het in sectie 2 gepresenteerde Bayesiaanse leermodel, hoe deze bias geleidelijk aan verdwijnt als gevolg van de herhaalde observatie van reistijden in het proces van reizen en reisinformatieacquisitie. We gaan er hierbij vanuit dat de reiziger elke werkdag één van de twee routes kiest, en ex post-reistijdinformatie ontvangt voor de andere route. Na elke gereisde dag berekenen we de aangepaste percepties van de reiziger als functie van de initiële kennis van de reiziger en de gedane observaties. Hiertoe is een zogenaamde 'Gibbs sampling procedure' geprogrammeerd in het programma GAUSS 7.0.

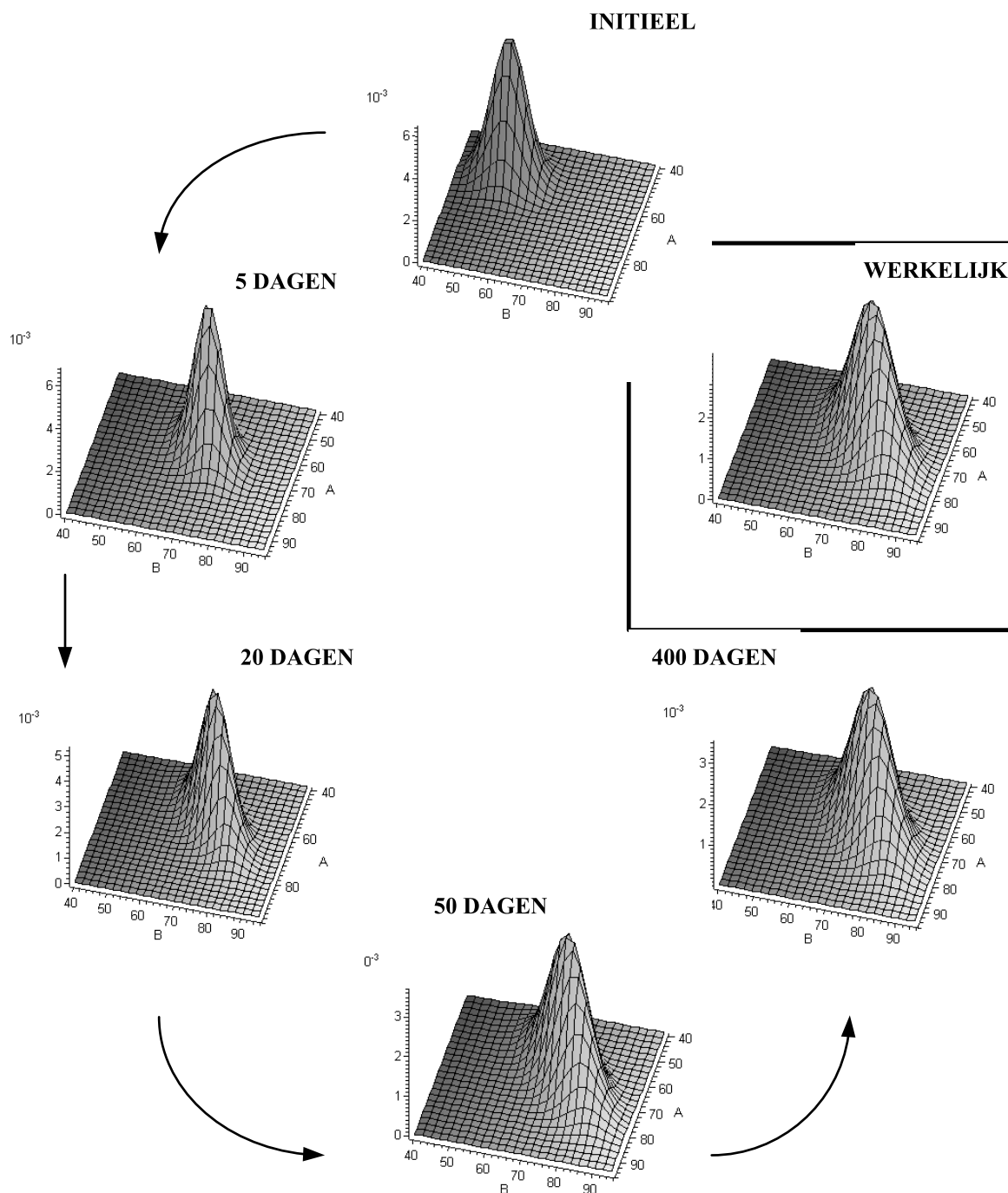
We beschouwen, voor een eerste numerieke illustratie van de werking van ons leermodel, de negende en tiende rit, en we richten ons op de reiziger haar inschattingen voor μ en $\Sigma(TT)$. Na negen dagen gereisd te hebben³, heeft de reiziger de volgende inschattingen: de reistijd voor route A = 63.1 minuten, die voor route B = 71.7 minuten, en hun variantie is gelijk aan 49.7 minuten (route A) en 31.6 (route B). De gepercipieerde covariantie is gelijk aan 26.9. Deze inschattingen tonen aan dat de reiziger haar initiële inschattingen al aanzienlijk heeft aangepast in het licht van de gedane observaties gedurende de negen ritten. Zij gelooft nu (terecht) dat route A gemiddeld genomen sneller is dan route B, in plaats van dat zij even snel zouden zijn. Ook gelooft zij nu dat beide routes gemiddeld genomen langzamer zijn dan zij eerst dacht en dat hun reistijden variabelere zijn dan eerst ingeschat. Niettegenstaande dit leerproces, zijn haar inschattingen nog steeds niet accuraat: gemiddelde reistijden worden nog steeds onderschat, net als de varianties van de reistijden van de twee routes en hun covariantie. Dit kon verwacht worden, gegeven het lage aantal gemaakte ritten en de mate waarin de initiële inschattingen afweken van de werkelijkheid.

Op de tiende dag observeert de reiziger weer reistijden voor route A (45.8 minuten) en B (66.5 minuten), getrokken uit $TT^{\text{true}} \sim N(\mu^{\text{true}}, \Sigma^{\text{true}}(TT))$. Beide reistijden komen uit de linkerstaart van de dichtheidsfunctie (met name die voor route A), wat ervoor zorgt dat de gepercipieerde reistijden na dag tien worden bijgesteld naar 61.4 minuten (route A) en 71.2 minuten (route B). De gepercipieerde variantie van de twee routes wordt aangepast naar 60.0 minuten (route A) en 32.5 (route B), en hun gepercipieerde covariantie naar 30.8. Deze aanpassingen illustreren helder hoe de reiziger probeert te leren van haar observaties: haar percepties voor de twee gemiddelde reistijden worden naar beneden bijgesteld na de korter dan verwachte reistijden geobserveerd te hebben. Met name de gemiddelde reistijd voor route A wordt fors bijgesteld, wat in lijn is met intuïtie. Verder worden de gepercipieerde varianties naar boven bijgesteld, met name voor route A. Tot slot zorgt het feit dat twee routes simultaan een zeer korte reistijd kenden ervoor, dat de reiziger haar perceptie aangaande de reistijd-covariantie tussen de twee routes omhoog bijstelt. De aanpassingen blijven relatief klein, wat logisch is in het licht van het feit dat het hier slechts één van tien gemaakte observaties (meer precies: observatiekoppels) betreft.

In Figuur 1 wordt een tweede illustratie van het gemodelleerde leerproces weergegeven. De X- en Y-assen geven reistijden voor de twee routes, de Z-as de bijbehorende kansdichtheid. De kansdichtheidsplot bovenaan geeft de initiële inschattingen van de reiziger met betrekking tot de kansen (meer precies: kansdichtheden) horend bij verschillende combinaties van reistijden voor routes A en B. De pijlen volgend, tonen de plots hoe de reiziger haar inschattingen aanpast naar mate het aantal afgelegde ritten groter wordt: zoals eerder aangegeven zijn de initiële inschattingen van de gemiddelde reistijden te optimistisch, en onderschat de reiziger de variantie en covariantie tussen de reistijden van de twee routes (dit laatste komt visueel naar voren in het feit dat de kansdichtheidsfunctie die de initiële verwachtingen weergeeft, minder 'platgedrukt' is dan de werkelijke kansdichtheidsfunctie). Wat ook opvalt, is dat de grootste bijstellingen in percepties optreden in het begin van het leerproces: nieuwe observaties hebben in die eerste fase nog relatief veel invloed. Hoewel het niet zinvol is om de aantallen dagen in absolute zin te interpreteren (zij zijn deels een gevolg van de arbitrair gekozen

startwaarden en instellingen van dit specifieke voorbeeld), is het duidelijk dat de inschattingen van de reiziger de karakteristieken van de werkelijke kansdichtheidsfunctie steeds beter benaderen.

Figuur 1: Het Bayesiaans leren van onbetrouwbare reistijden



4. Conclusies

Dit artikel presenteerde een generiek model van de wijze waarop reizigers reistijden en reistijd(co-)varianties leren. Het is gefundeerd op de wet van Bayes, zoals toegepast in de Bayesiaanse econometrie. Het model bevat twee verbeteringen ten opzichte van Bayesiaanse leermodellen die gebruikt zijn in eerdere studies. Ten eerste ondervangt ons model de intuïtie dat reizigers niet alleen de gemiddelde reistijd voor een route kunnen leren, maar ook de bijbehorende variabiliteit. Ten tweede is ons model in staat te representeren hoe reizigers die ex post-reistijdinformatie krijgen over niet-gekozen routes, in staat zijn om in de loop der tijd te leren hoe de reistijden van nabijgelegen routes covariëren. Numerieke simulaties illustreren de werking van het model.

Een voor de hand liggende theoretische uitbreiding van het leermodel betreft de toevoeging van een beslismodel onder condities van onzekere reistijden. Een dergelijke uitbreiding zou niet alleen de keuze tussen verschillende onzekere routes moeten representeren, maar ook de keuze om al dan niet de beschikbare reisinformatie te acquireren. Zie Chorus et al. (2010) voor een voorbeeld van een dergelijk beslismodel. Uiteindelijk zou een dergelijk integratief raamwerk (waarvan het in dit artikel gepresenteerde leermodel een belangrijk onderdeel uitmaakt) inzicht kunnen verschaffen in de wijze waarop reizigers reageren op onzekerheid / onbetrouwbaarheid / variabiliteit in hun dagelijkse routekeuzes. Die antwoorden op hun beurt zijn van belang voor het formuleren van effectieve beleidstactieken in de context van, bij voorbeeld, prijsbeleid of de provisie van reisinformatie.

Een cruciale voorwaarde voor de geloofwaardigheid van een dergelijk integratief leermodel is evenwel dat het accurate voorspellingen doet, die getest zijn ten opzichte van werkelijk waargenomen routekeuzegedrag van reizigers. Dit geldt des te meer in het licht van het voortgaande debat in verschillende takken van de sociale wetenschappen aangaande de validiteit van de Bayesiaanse benadering als descriptief leermodel. Als zodanig beschouwen wij het empirisch testen van het hier gepresenteerde model en zijn eventuele uitbreidingen als de meest belangrijke richting voor verder onderzoek op dit gebied.

Dankwoord

Opmerkingen van twee anonieme referenten hebben geleid tot een verbeterde versie van dit artikel.

Bibliografie

- Aadland, D.M., Caplan, A.J., Phillips, O.R., 2007. A Bayesian examination of information and uncertainty in contingent valuation. *Journal of Risk and Uncertainty*, 35(2), 149-178
- Birnbaum, M.H., 1983. Base rates in Bayesian inference: Signal detection analysis for the cab problem. *American Journal of Psychology*, 96, 85-94
- Bogers, E.A.I., 2009. Travel information and learning in day-to-day route choice. TRAIL Thesis Series no. T2009/5, TRAIL Research School, the Netherlands

- Brownstone, D., Small, K.A., 2005. Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations. *Transportation Research Part A*, 39, pp. 279-293
- Chen, R.B., Mahmassani, H.S., 2004. Travel time perception and learning mechanisms in traffic networks. *Transportation Research Record*, 1894, 209-221
- Chorus, C.G., Arentze, T.A., Molin, E.J.E., Timmermans, H.J.P., van Wee, G.P., 2006. The value of travel information: Decision-strategy specific conceptualizations and numerical examples. *Transportation Research Part B*, 40(6), 504-519
- Chorus, C.G., 2007. Traveler response to information. TRAIL Thesis Series no. T2007/2, TRAIL Research School, the Netherlands
- Chorus, C.G., Arentze, T.A., Timmermans, H.J.P., 2009. Traveler compliance with advice: A Bayesian utilitarian perspective. *Transportation Research Part E*, 45(3), 486-500
- Chorus, C.G., Walker, J.L., Ben-Akiva, M.E., 2010. The value of travel information: A search-theoretic approach. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 14(3), 154-165
- Edwards, W., Lindman, H., Savage, L.J., 1963. Bayesian statistical research for psychological research. *Psychological Review*, 70, 193-242
- El-Gamal, M.A., Grether, D.M., 1995. Are people Bayesian? uncovering behavioural strategies. *Journal of the American Statistical Association*, 90, 1137-1145
- Fosgerau, M., Kalström, A., 2010. The value of reliability. *Transportation Research Part B*, 44(1), 38-49
- Gigerenzer, G., Hoffrage, U., 1995. How to improve Bayesian reasoning without instruction: Frequency formats. *Psychological Review*, 102(4), 684-704
- Gopnik, A., Glymour, C., Sobel, D.M., Schulz, L.E., Kushnir, T., Danks, D., 2004. A theory of causal learning in children: Causal maps and Bayes nets. *Psychological Review*, 111(1), 3-32
- Hakes, J., Viscusi, W.K., 1997. Mortality risk assessments: A Bayesian reassessment. *Journal of Risk and Uncertainty*, 15(2), 135-150
- Harsanyi, J.C., 1967. Games with Incomplete Information Played by Bayesian Players (I, II and III). *Management Science*, 14, 159-82, 320-34 and 486-502.
- Jha, M., Madanat, S., Peeta, S., 1998. Perception updating and day-to-day travel choice dynamics in traffic networks with information provision. *Transportation Research Part C*, 6, 189-212
- Jotisankasa, A., Polak, J.W., 2006. A framework for travel time learning and behavioral adaptation in route and departure time choice. *Transportation Research Record*, 1985, 231-240
- Kahneman, D., Tversky, A., 1972. Subjective probability: A judgment of representativeness. *Cognitive Psychology*, 3, 430-454
- Kaysi, I., 1991. Framework and models for provision of driver information system. PhD-thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA
- Lam, T., and Small, K., 2001. The value of time and reliability: Measurement from a value pricing experiment. *Transportation Research Part E*, 37(4), 297-320
- Raiffa, H., Schlaifer, R., 1961. *Applied statistical decision theory*. Harvard University Press, Boston, MA
- Train, K.E., 2003. *Discrete choice methods with simulations*. Cambridge University Press, Cambridge UK
- Viscusi, W.K., Magat, W.A., 1992. Bayesian decisions with ambiguous belief aversion. *Journal of Risk and Uncertainty*, 5(4), 371-387
- Zellner, A., 2007. Some aspects of the history of Bayesian information processing. *Journal of Econometrics*, 138, 388-404

Noten

- * Tel.: +31-15-2788546; fax: +31-15-2782719. E-mail: c.g.chorus@tudelft.nl (C.G. Chorus)
- 1 Zie bijvoorbeeld Train (2003 – hoofdstuk 12) voor een recent overzicht van Bayesiaanse econometrie in de context van het schatten van discrete keuze-modellen,
- 2 Het feit dat de diagonale elementen in enigszins verschillen, volgt uit het feit dat de waarden verkregen zijn door simulatie.
- 3 Reistijden in minuten voor routes A and B, gedurende deze eerste negen dagen, waren (72.8, 70.3), (61.9, 74.2), (50.1, 62.6), (56.6, 75.1), (75.3, 80.6), (72.7, 81.6), (70.5, 76.6), (45.2, 57.1) en (75.0, 81.4) respectievelijk.
- * Sectie Transport en Logistiek, TU Delft, Postbus 5015, 2600 GA, Delft
- ** Vakgroep Urbanistiek, TU Eindhoven, Postbus 513, 5600 MB, Eindhoven

Spijtminimalisatie: een nieuwe modelvorm en een toepassing op vertrektijdstipkeuze-data

Caspar G. Chorus*, Gerard C. de Jong**

Summary

This paper presents a new discrete choice-model, rooted in the paradigm of Random Regret Minimization (RRM). In contrast with earlier RRM-models, this new model formulation is estimable using conventional discrete choice-software. It is shown how the new RRM-based Multinomial Logit (MNL) model differs from its Random Utility Maximization-based counterpart. An empirical application based on a stated departure time-choice dataset is provided, which shows how the new RRM-based (Mixed) MNL models perform well – also when compared to RUM-based (Mixed) MNL models. Potential policy-relevance of the new RRM-model is discussed.

Keywords: *Random Regret Minimization; Mixed Logit; Departure time choice*

Samenvatting

Dit artikel presenteert een nieuw discrete-keuzemodel, geworteld in het 'Random Regret Minimization'-paradigma (RRM). In tegenstelling tot eerdere RRM-modellen kan de nieuwe modelvorm geschat worden met behulp van standaard softwarepakketten. We laten zien hoe het spijtgebaseerde Multinomiale Logit (MNL)-model verschilt van zijn nutsgebaseerde tegenhanger (het op Random Utility Maximization-theorie gebaseerde MNL-model). Vervolgens presenteren we een empirische toepassing op een 'Stated Choice'-dataset betreffende vertrektijdstipkeuzes. Schattingsresultaten tonen goede prestaties van het RRM-gebaseerde (Mixed) MNL-model, ook wanneer het vergeleken wordt met zijn nutsgebaseerde tegenhangers. De mogelijke transportbeleids-relevantie van het RRM-model wordt besproken.

Keywords: *Random Regret Minimization; Mixed Logit; Vertrektijdstipkeuze*

1. Inleiding

De minimalisatie van geanticipeerde spijt is met succes toegepast ter verklaring van keuzegedrag, in vakgebieden zo uiteenlopend als marketing (Simonson, 1992; Zeelenberg & Pieters, 2009), microeconomie (Loomes & Sugden, 1982; Sarver, 2008), psychologie (Zeelenberg, 1999; Connolly, 2005), besliskunde (Savage, 1954; Bell, 1982) en ook mobiliteitsonderzoek (Chorus et al., 2006a, b). Kort gezegd is spijt wat men voelt wanneer een niet-gekozen alternatief beter presteert dan een gekozen alternatief. Spijtgebaseerde keuzetheorieën en –modellen veronderstellen dat de wens om geanticipeerde spijt te minimaliseren (naast, of in plaats van, de wens om geanticipeerd nut te maximaliseren) centraal staat wanneer mensen keuzes

maken. Recentelijk is de notie van spijtminimalisatie vertaald in een generiek discrete-keuzemodel: dit zogenaamde Random Regret Minimization (RRM)-model (Chorus et al., 2008a, b) is ontwikkeld voor de econometrische analyse van geobserveerde keuzes en vormt een spijtgebaseerde tegenhanger van de Multinomiale Logit (MNL) modellen (McFadden, 1974) de Mixed MNL modellen (McFadden & Train, 2000), die beiden gebaseerd zijn op Random Utility Maximization (RUM)-veronderstellingen.

Een belangrijk nadeel van deze eerste generatie RRM-modellen is dat hun modelstructuur een discontinue Likelihoodfunctie genereert, wat problemen kan opleveren bij het optimalisatieproces dat onderdeel uitmaakt van de modelschatting¹. Mede hierdoor kunnen deze RRM-modellen niet geschat worden met behulp van standaard softwarepakketten voor discrete-keuzemodellen (in plaats daarvan is handgeschreven code nodig), wat hun gebruiksvriendelijkheid fors vermindert.

Onlangs is een nieuwe RRM-modelvariant afgeleid (Chorus, 2010) die deze beperking niet kent: de bijbehorende Likelihoodfunctie is continu, en het model kan mede hierdoor geschat worden op bestaande softwarepakketten zoals BIOGEME, ALOGIT, NLOGIT². In dit paper presenteren we dit model (sectie 2), en bespreken we hoe het verschilt van zijn nutsgebaseerde tegenhanger (sectie 3). In sectie 4 presenteren we een empirische modelschatting (en een vergelijking tussen RRM- en RUM-modellen), gebruik makend van een dataset betreffende vertrektijdstipkeuzes van automobilisten (de Jong et al., 2003). De schatting van RRM-modellen op deze data is niet eerder gepubliceerd. Sectie 5 presenteert conclusies en bespreekt de potentiële beleidsrelevantie van het nieuwe RRM-model.

2. Een nieuw RRM-model

We veronderstellen de volgende keuzesituatie: een reiziger kiest tussen J reisopties (zoals routes, vertrektijdstippen), die elk gedefinieerd zijn in termen van M attributen x_m . We richten ons in de rest van deze paragraaf op het voorspellen van de kans dat de reiziger alternatief i kiest uit deze keuzeset. Het nieuwe RRM-model veronderstelt dat de reiziger probeert geanticipeerde random spijt te minimaliseren, en dat –vanuit het gezichtspunt van de onderzoeker– de random spijt die geassocieerd wordt met alternatief i bestaat uit de som van een iid storingsterm ε_i en 'systematische spijt' R_i . De afkorting 'iid' staat voor 'independent and identically distributed'; dit houdt in dat de waarde van de storingsterm die bij het ene alternatief hoort, onafhankelijk is van de waarde van de storingsterm die bij elk van de andere alternatieven hoort, en dat alle storingstermen uit dezelfde verdeling getrokken zijn. Meer concreet impliceert deze iid-veronderstelling dat de storingstermen zogenaamde 'witte ruis' vormen. In lijn met McFadden's nutsgebaseerde MNL-model, veronderstellen we dat ε_i een zogenaamde Extreme

Value Type I verdeling volgt. Deze verdeling lijkt op de normaalverdeling, maar heeft dikkere 'staarten'.

Systematische spijt is gedefinieerd als de som van de zogenaamde bilaterale spijt die geassocieerd wordt met de vergelijking tussen i en elke andere keuzeoptie:

$$R_i = \sum_{j \neq i} R_{i \leftrightarrow j}.$$

Als zodanig veronderstelt dit spijtmodel dat elk alternatief dat beter presteert dan i een bijdrage levert aan de spijt die de reiziger anticipeert en wil vermijden. De bilaterale spijt die geassocieerd wordt met de vergelijking tussen i en alternatief j bestaat uit de som van de spijt die geassocieerd wordt met de vergelijking tussen de twee keuzeopties in termen van elk attribuut:

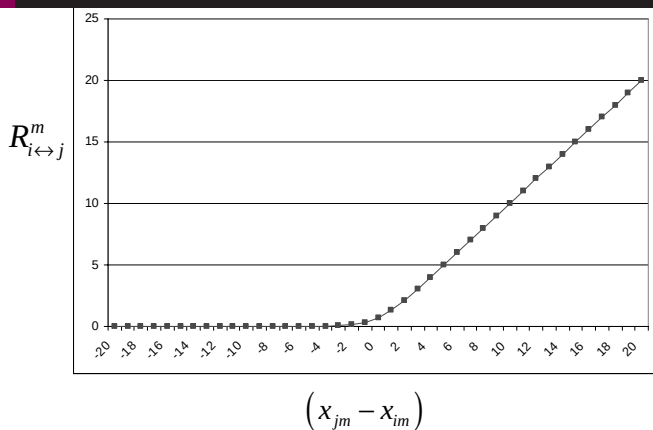
$$R_{i \leftrightarrow j} = \sum_{m=1..M} R_{i \leftrightarrow j}^m.$$

Tenslotte, de spijt die geassocieerd wordt met de vergelijking tussen i en j in termen van attribuut m (in formulevorm: $R_{i \leftrightarrow j}^m$) is als volgt geformuleerd:

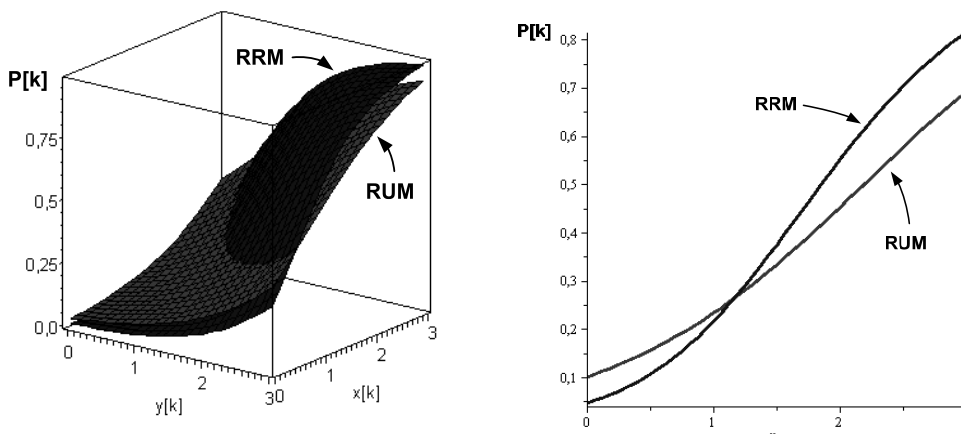
$$R_{i \leftrightarrow j}^m = \ln \left(1 + \exp \left[\beta_m \cdot (x_{jm} - x_{im}) \right] \right).$$

Deze formulering impliceert dat spijt zo goed als nul is wanneer alternatief i beter presteert dan j op attribuut m , en dat spijt een lineaire functie is van het verschil in attribuutwaarden wanneer j beter presteert dan i . In dat laatste geval benadert de te schatten parameter β_m (waarvan ook het teken wordt geschat) de richtingscoëfficiënt van de semi-lineaire spijtfunctie. Zie Figuur 1 voor een visuele weergave van deze formulering voor spijt op het attribuutniveau ($\beta_m=1$).

Figuur 1: een visuele weergave van spijt op het attribuutniveau (=1)



Figuur 2. Marktaandelen voorspeld door RRM en RUM vergeleken



Totale systematische spijt wordt dan:

$$R_i = \sum_{j \neq i} \sum_{m=1..M} \ln \left(1 + \exp \left[\beta_m \cdot (x_{jm} - x_{im}) \right] \right).$$

De kans dat de reiziger keuzeoptie i kiest, is nu gelijk aan de kans dat de random spijt die geassocieerd wordt met i kleiner is dan de random spijt van de andere alternatieven. Uit het feit dat de ε -storingstermen verondersteld worden de iid-Extreme Value Type I verdeling te volgen, volgt dat deze kans gegeven wordt door een zogenaamde logit-formulering: $P_i = \exp(-R_i) / \sum_{j=1..J} \exp(-R_j)$.

3. Een numerieke vergelijking met het nutsgebaseerde MNL-model

De lezer die bekend is met het nutsgebaseerde MNL-model ziet direct de overeenkomst tussen de keuzekans-formule voor het RRM-model en die van het nutsgebaseerde MNL-model: deze laatste wordt gegeven door de formule

$$P_i = \exp(V_i) / \sum_{j=1..J} \exp(V_j), \text{ waar } V_i = \sum_{m=1..M} \beta_m x_{im}.$$

Naast de gelijkenis in termen van keuzekansen, valt op dat elke parameter in het nutsgebaseerde MNL-model een tegenhanger heeft in het spijtgebaseerde MNL-model, en dat alle parameters hetzelfde teken (zouden moeten) hebben in RUM- en RRM-modellen. Met andere woorden: beide modellen zijn even zuinig met parameters, wat ze in fundamentele zin even 'complex' maakt. In het licht van deze gelijkenissen, is het interessant om enkele verschillen te belichten tussen de twee modellen. We richten ons hier op verschillen in concrete voorspellingen van marktaandelen, aan de hand van een numeriek voorbeeld. Voor een diepergravende en meer formeel-theoretische analyse van verschillen in modeleigenschappen kan de lezer terecht bij Chorus (2010).

We veronderstellen de volgende keuzesituatie: een reiziger kiest tussen alternatieven i , j en k welke gekarakteriseerd worden in termen van attributen x en y . Beide attributen zijn even belangrijk (en krijgen beide gewicht 1), en hogere waarden worden geprefereerd boven lagere waarden. Alternatief i is gedefinieerd als $\{1,2\}$, terwijl j is gedefinieerd als $\{2,1\}$. Alternatief k is gedefinieerd als $\{x_k, y_k\}$, waarbij x_k en y_k waarden aan kunnen nemen tussen 0 en 3. Met andere woorden: i scoort zwak op attribuut x en sterk op attribuut y . Voor alternatief j geldt exact het omgekeerde, en de prestatie van alternatief k varieert tussen zeer zwak en zeer sterk voor beide attributen. Figuur 2 (linkerpaneel) geeft het marktaandeel voor alter-

natief k , als functie van x_k en y_k , zoals voorspeld door enerzijds (in het rood) een lineair-additief nutsmodel ($V_k = x_k + y_k$) en anderzijds (in het blauw) het hierboven gepresenteerde RRM-model. Het rechterpaneel van deze figuur geeft de dwarsdoorsnede voor $x_k = 1.5$. Er kunnen vier waarnemingen worden gedaan, op basis van deze figuren.

Ten eerste is te zien dat binnen het RRM-model een relatief zwakke prestatie van k leidt tot grotere verliezen in marktaandeel dan binnen het RUM-model: de linkerbenenhoek van het linkerpaneel toont lagere marktaandelen voor RRM dan voor RUM. Ten tweede blijkt dat een relatief sterke prestatie van k meer effect heeft op de marktaandelen in de context van een RRM-model, dan in de context van een RUM-model (zie de rechterbovenhoek van het linkerpaneel). Ten derde, en dit valt het best af te leiden uit het rechterpaneel, is het verschil tussen RRM en RUM in termen van het marktaandeel van goed presterende alternatieven, groter dan het verschil in termen van het marktaandeel van slecht presterende alternatieven.

Ten vierde blijkt dat RRM hogere keuzekansen voorspelt voor k , wanneer dit alternatief tussen i en j inligt in termen van zijn prestaties voor de twee attributen – met andere woorden, wanneer x_k en y_k liggen in het interval $[1,2]$. Marketingwetenschappers noemen alternatief k in deze situatie (waarbij het alternatief beter scoort dan i in termen van x , maar slechter dan i in termen van y , en beter scoort dan j in termen van y , maar slechter dan j in termen van x) een compromis-alternatief. De constatering dat RRM de populariteit van dergelijke compromis-alternatieven relatief hoog inschat, klopt met een grote hoeveelheid empirisch bewijs uit de wereld van consumentengedrag (Simonson, 1989; Wernerfelt, 1995; Kivetz et al., 2004).

Alhoewel het hier gepresenteerde voorbeeld geenszins toereikend is om alle mogelijke discrepanties tussen de twee modelbenaderingen te beschrijven, geeft het in ieder geval aan dat er vrij fundamentele verschillen zijn tussen RRM en conventionele RUM-modellen zoals het lineair-additieve MNL-model.

4. Het nieuwe RRM-model toegepast: vertrektijdstipkeuzes

Deze sectie presenteert een empirische toepassing van het in sectie 2 gepresenteerde RRM-model. We doen dit in de vorm van een vergelijking met RUM-modellen. Echter, het doel van de empirische analyses die hier gepresenteerd worden is niet om de twee modelparadigma's te vergelijken, of om verschillen in modelfit en schattingsresultaten te interpreteren in termen van de verschillende veronderstellingen over keuzegedrag die aan beide modellen ten grondslag liggen. Hiervoor is een veel uitgebreidere analyse nodig, die meerdere databronnen omvat. Ook heeft deze sectie niet tot doel om inhoudelijke inzichten te genereren aangaande de determinanten van vertrektijdstipkeuzes. Zie hiervoor een zeer uitgebreid verslag van empirische analyses, uitgevoerd op dezelfde data, zoals gerapporteerd in de Jong et al. (2003). We willen in deze sectie enkel aantonen dat het RRM-model succesvol kan worden toegepast op empirische keuzedata, en dat toepassing van het model resulteert in intuïtieve schattingsresultaten.

De dataset is gebaseerd op een zogenaamd Stated Choice-experiment dat werd uitgevoerd voor het Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Hierin werd forenzen die de auto gebruiken voor hun woon-werkverkeer³ gevraagd te kiezen tussen een aantal vertrektijdstoppen betreffende de rit van en naar werk: men kon ofwel op het voor hen reguliere tijdstip kiezen, ofwel substantieel eerder of later (om de files te vermijden). Elk van de drie opties is gedefinieerd in termen van onder andere de reistijd heen, de reistijd terug, de reistijd in de file (heen, en terug), en de tijd die overbleef om te werken. In het licht van de functie van de hier gepresenteerde empirische analyses (zoals hierboven uiteengezet), gaan we hier niet verder in op de opzet van het experiment, en op zaken als de representativiteit van de steekproef. Zie de Jong et al. (2003) voor een gedetailleerde bespreking van deze en gerelateerde aspecten. Voor onze analyses gebruiken we een deel van de beschikbare data: het betreft automobilisten, die hadden aangegeven dat gebruik maken van het OV

Tabel 1: RRM-MNL versus RUM-MNL

Attribuut	Random Regret Minimization		Random Utility Maximization	
	beta	t-waarde	beta	t-waarde
Constante (regulier vertrektijdstop)	1.48	16.11	1.47	16.02
Reistijd heen (minuten)	-0.00376	-1.27	-0.00579	-1.48
Filetijd heen (minuten)	-0.0264	-4.62	-0.0377	-4.67
Reistijd terug (minuten)	-0.00206	-0.37	-0.00318	-0.36
Filetijd terug (minuten)	-0.0168	-2.35	-0.0258	-2.20
Resulterende werktijd (minuten)	0.000366	0.36	0.000624	0.41
Eind-Loglikelihood	-796.306		-797.435	
Aangepaste rho-square ⁴	0.173		0.172	

voor hen geen optie is. Met andere woorden: hun keuzeset bestond enkel uit de drie gepresenteerde vertrektijdstipkeuze-opties. Deze sub-dataset bestond uit 883 waarnemingen (keuzes). Alle hierna beschreven modellen zijn geschat met behulp van de gratis discrete-keuze software BIOGEME (Bierlaire, 2003, 2008).

4.1 MNL-modellen

Tabel 1 toont de schattingsresultaten voor zowel de nuts- als spijtgebaseerde MNL-modellen. Om overschatting van de t-waarden, veroorzaakt door de panel-structuur van de data (voor elke respondent zijn 8 keuzes geobserveerd), te voorkomen zijn enkel de zogenaamde robuuste t-waarden gerapporteerd.

Beginnend bij de modelstatistieken: beide modellen bereiken een redelijke modelfit, wat gereflecteerd wordt door een rho-square van net boven de 0.17. De eind-Loglikelihood (een maat voor modelfit) van het RRM-model is zo goed als gelijk aan die van zijn nutsgebaseerde tegenhanger; het marginale verschil ten gunste van het RRM-model is verwaarloosbaar te noemen. Dit verschil is overigens wel significant wanneer een niveau van 10% wordt aangehouden: de nulhypothese dat het RUM-model beter bij de data past dan het RRM-model, wordt met behulp van de Ben-Akiva & Swait test voor ongeneste modellen (1986) verworpen met een bijbehorende bovengrens voor de p-waarde van 0.08. In termen van parameters geven de beide modellen op hoofdlijnen dezelfde inzichten (NB: gegeven dat het RRM-model parameters schat voor verschillen in attribuutwaardes, terwijl het RUM-model parameters schat voor absolute attribuutwaarde, is de verwachting niet dat beide parametersets noodzakelijkerwijs op elkaar lijken in termen van de grootte van afzonderlijke parameterwaarden). Het blijkt dat, zoals men zou verwachten, er ceteris paribus een voorkeur is voor vertrekken op het reguliere tijdstip (in plaats van vroeger of later). Een model met twee

constanten (voor vroeger, en voor later vertrekken) gaf voor elk van de modellen geen vergroting van de modelfit, en is niet gerapporteerd. De parameters voor reistijd zijn niet significant (zowel voor de heen- als voor de terugweg), wat ligt aan het feit dat de bijbehorende attributen weinig variatie kenden in het keuze-experiment. Ook de parameter voor resulterende werktijd is voor geen van de modellen significant. Wel significant zijn de negatieve parameters voor reistijd in de file; beide modellen geven aan dat reistijd in de file op de weg naar werk vervelender wordt gevonden dan op de terugweg (dit was ook al het geval in de Jong et al., 2003).

4.2 Mixed MNL-modellen met panelstructuur

Zoals hierboven aangegeven, is in het schatten van de MNL-modellen deels rekening gehouden met de panelstructuur van de data (het feit dat elke respondent meerdere observaties gegenereerd heeft), door middel van het gebruik van robuuste t-waarden. Een aanvullende en meer directe manier om met de panelstructuur om te gaan, is om te veronderstellen dat een deel van de ruis (die gemodelleerd wordt door middel van de storingstermen) niet varieert tussen verschillende waarnemingen voor dezelfde respondent. Deze aanvullende veronderstelling impliceert dat het individueel-specifieke deel van de ruis wordt gemodelleerd door één of meerdere normaalverdeelde additionele storingstermen, waarvan de standaarddeviaties geschat worden; deze representeren de mate van variatie in de smaak van respondenten betreffende de bij de parameters horende alternatieven en hun attributen. Deze smaak varieert binnen de populatie van reizigers, maar niet tussen de keuzes die een bepaalde reiziger maakt. Het resultaat van een dergelijke uitbreiding is een zogenaamd panel-data Mixed Logit-model (zie Train (2003) voor een uitgebreide bespreking van dit modeltype).

Specifiek hebben we er in dit geval voor gekozen om te veronder-

Tabel 2: RRM-Panel Mixed MNL versus RUM-Panel Mixed MNL

Attribuut	Random Regret Minimization		Random Utility Maximization	
	beta	t-waarde	beta	t-waarde
Constante (regulier vertrektijdstip)	1.79	8.19	1.77	8.14
Reistijd heen (minuten)	-0.00604	-1.44	-0.00846	-1.59
Filetijd heen (minuten)	-0.0244	-2.48	-0.0336	-2.52
Reistijd terug (minuten)	-0.00566	-0.82	-0.00799	-0.76
Filetijd terug (minuten)	-0.0185	-1.68	-0.0291	-1.66
Resulterende werktijd (minuten)	0.00109	0.03	0.000171	0.06
Standaarddeviatie (constante)	-1.87	-7.98	-1.87	-7.95
Eind-Loglikelihood	-712.074		-713.081	
Aangepaste rho-square	0.259		0.258	

stellen dat de intrinsieke waardering van reizigers voor het vertrekken op het reguliere tijdstip (in plaats van uit te wijken naar vroegere of latere tijdstippen), varieert binnen de reizigerspopulatie, maar niet binnen de 8 keuzes die elke reiziger maakt in het experiment. Met andere woorden, we schatten de standaarddeviatie voor de constante uit het MNL-model⁵. De significantie en grootte van deze standaarddeviatie is een indicatie van de mate waarin reizigers verschillen in hun voorkeur voor het op de reguliere tijd vertrekken. Omdat we slechts 1 van de parameters een individueel-specifieke component meegeven, blijven we overigens robuuste t-waarden rapporteren. Het resultaat is te zien in tabel 2: de verschillen met het geschatte MNL-model in termen van parameterwaarden en –significanties zijn klein, en dezelfde inhoudelijke inzichten komen boven-drijven.

De significante en substantiële standaarddeviatie voor de constante geeft aan dat er substantiële heterogeniteit is in de reizigerspopulatie betreffende de voorkeur voor het aanhouden van hun reguliere vertrektijdstip: voor de ene reiziger is dit een zeer belangrijk punt, voor de andere maakt het weinig uit. In termen van modelfit valt op dat het modelleren van deze ongeobserveerde heterogeniteit een zeer aanzienlijke verbetering in fit met zich meebrengt. Met andere woorden: een model dat deze heterogeniteit serieus neemt, past de data veel beter dan een MNL-model dat veronderstelt dat alle storingstermen enkel witte ruis representeren (en dat de voorkeur voor het reguliere vertrektijdstip niet structureel varieert binnen de reizigerspopulatie). Tot slot: ook hier weer blijkt de Loglikelihood van het RRM-model zo goed als gelijk aan die van zijn nutsgebaseerde tegenhanger, wat aangeeft dat beide modellen ongeveer even goed passen bij de data; het marginale verschil ten gunste van het RRM-model is wel weer significant (bij een significantieniveau van 10%).

Een belangrijkere conclusie – in het licht van de doelstelling zoals aangegeven bovenaan deze sectie – is dat het RRM-model blijkbaar zonder problemen is toe te passen met behulp van standaard-softwarepakketten, zowel in zijn MNL- als Mixed-MNL-vorm, en resulteert in intuïtieve modeluitkomsten. In de context van de gebruikte vertrektijdstipkeuze-data is er geen reden om het RUM-model te verkiezen boven zijn RRM-equivalent.

5. Conclusies

Dit artikel presenteert een nieuw discrete keuzemodel, geënt op het recentelijk geïntroduceerde paradigma van Random Regret Minimization. Het model is gebouwd op de veronderstelling, dat menselijk keuzegedrag gebaseerd is op de wens om spijt achteraf te voorkomen. Het ontwikkelde model is even spaarzaam met parameters als conventionele nutsgebaseerde keuzemodellen, het heeft een gesloten vorm-formulering voor keuzekansen en kan met behulp van bestaande software geschat worden. Het verschil met op Random Utility Maximization-gebaseerde modellen (in het bijzonder het lineair-additieve nutsgebaseerde MNL-model) zit hem met name in het feit dat RRM hogere keuzekansen voorspelt voor zogenaamde compromis-alternatieven (die tussen andere alternatieven in gepositioneerd zijn in termen van hun prestaties op verschillende kenmerken); in die zin sluit het RRM-model aan bij empirische bevindingen uit de consumentengedragswetenschap. Empirische toepassing van het RRM-model (in MNL-vorm en panel-

Mixed Logit vorm) op vertrektijdstipkeuze-data laat zien dat het model goed fit met de data, en intuïtieve parameters genereert. In statistische zin past het RRM-model beter bij de data dan een even zuinig (met parameters) RUM-model, wanneer een 10%-significantieniveau gehanteerd wordt. De bevindingen uit dit artikel zijn daarmee in lijn met schattingsresultaten in andere keuze-contexten: het RRM-model toont zich in deze analyses een goed alternatief voor de RUM-benadering in de context van route- en vervoerswijzekeuzes van automobilisten en treinreizigers (data: TU Delft), reisinformatie-acquisitie-keuzes (data: TU Delft), parkeer-keuzes (data: TU Eindhoven), bestemmings-keuzes (data: TU Eindhoven), autotype-keuzes (data: The University of Sydney), wandelroute-keuzes in een natuurpark (data: University of Padova) en zelfs keuzegedrag op een online-dating website (data: The University of Sydney).

Uiteraard is er veel meer werk nodig om een robuust inzicht te verkrijgen in de empirische potentie van RRM-modellen (in vergelijking met nutsgebaseerde modellen en alternatieve modelvormen). Zie Chorus (2010) voor een vergelijking tussen RRM-MNL en RUM-MNL op basis van vier andere datasets. De sociaalpsychologische literatuur geeft mogelijke handvaten om gericht te onderzoeken in welke keuzecontexten de RRM-benadering een mogelijk alternatief is voor de nutgebaseerde benadering: Zeelenberg and Pieters (2007) concluderen, in een overzichtsstudie over de rol van spijt als determinant van keuzegedrag, dat spijt met name een rol speelt wanneer beslissingen als moeilijk en belangrijk worden ervaren en wanneer degene die de keuze maakt verwacht dat hij of zij snel na het maken van de keuze inzicht krijgt in de prestaties van het gekozen (en niet-gekozen) alternatief. Een tweede context die volgens de auteurs tot spijtminimalisatie aanzet, is die waarin degene die de keuze maakt denkt of weet dat personen die deel uitmaken van zijn of haar persoonlijk netwerk de beslissing als belangrijk zien. Dit zou betekenen dat bij voorbeeld routekeuzes tijdens evacuatie (belangrijk en moeilijk), rijbaan-veranderingen (het resultaat van gekozen en niet-gekozen alternatieven is snel duidelijk) en autotypekeuzes (ook belangrijk voor anderen in het sociale netwerk) voor de hand liggen als mogelijke studieobjecten.

Wat is nu de beleidsrelevantie van het nieuwe RRM-model? Deze begint met de constatering dat het schatten van het RRM-model nauwelijks lastiger is dan het schatten van RUM-modellen (welke laatste zoals bekend zeer veel impact hebben gehad op de transportbeleidspraktijk). Momenteel wordt er zelfs gewerkt aan de ontwikkeling van standaard-routines binnen bestaande softwarepakketten, die het schatten en gebruiken van RRM-modellen verder vereenvoudigen.

Deze grote en toenemende mate van gebruiksvriendelijkheid (zeker in vergelijking met die van andere alternatieven voor het RUM-paradigma) maakt dat ook wanneer er geen a priori redenen zijn om een nut- dan wel spijtmodel te schatten, het schatten van een RRM-model naast een standaard-RUM model al snel de moeite loont. Op basis van de modelfit kan vervolgens gekeken worden welke van de twee modellen in statistische zin het best bij de data past, en gebruikt kan worden voor analyses en het doen van voorspellingen. Ook kan het RRM-model goed dienen als second opinion-model: gegeven dat de onderliggende veronderstellingen van RRM-modellen aanzienlijk verschillen van de ‘homo economicus’-veronderstellingen horende bij RUM-modellen, is het de moeite waard om te bekijken of

beleidsimplicaties die volgen uit schatting van het ene modeltype overleidend blijven wanneer het andere modeltype wordt toegepast. Zo ja, dan is dit een indicatie van de robuustheid van deze implicaties. Natuurlijk moet bij dit alles rekening worden gehouden met het feit dat beleidsmakers die bekend zijn met diskrete-keuzemodellen met name bekend zullen zijn met het RUM-paradigma. Het communiceren van de resultaten van een RRM-model richting (collega-)beleidsmakers zal dan ook meer moeite kosten dan het communiceren van RUM-modelresultaten, zeker zolang het RRM-model een nichespeler is. Hier staat tegenover dat de intuïtie achter het RRM-model wellicht makkelijker te communiceren is: hoor je mensen over hun keuzes praten, dan valt de term 'spijt' toch eerder dan de term 'nut'. De notie dat spijtminimalisatie een belangrijke determinant is van keuzegedrag zal bij menigeen minstens even veel weerklank vinden als de nutsmaximalisatie-gedachte, die onder economen en wetenschappers in het algemeen meer in zwang is dan onder mensen 'op straat'. Tot slot hangt de beleidsrelevantie van het RRM-model uiteraard af van het enthousiasme waarmee het model in wetenschappelijke kringen wordt ontvangen. De voortekenen zijn wat dat betreft gunstig te noemen, gegeven de actieve belangstelling van toonaangevende transport-onderzoeksgroepen in binnen- en buitenland – maar voor een definitief oordeel is het uiteraard nog veel te vroeg.

Dankwoord

De data over vertrektijdkeuze die gebruikt zijn in de schattingen in dit paper zijn verzameld in een onderzoek voor Rijkswaterstaat (toen AVV, nu DVS) dat werd uitgevoerd door RAND Europe. Wij willen DVS bedanken voor de toestemming tot hergebruik van deze data. De eerste auteur dankt NWO voor ondersteuning door middel van VENI-beurs 451-10-001 "Regret-based models of mobility". De eerste auteur wil ook deelnemers aan een lunchlezing over spijtmodellen bij het Kennisinstituut Mobiliteitsbeleid (KiM) bedanken voor het geven van nuttige suggesties aangaande de mogelijke beleidsrelevantie van het RRM-model.

Referenties

- Bell, D.E., 1982. Regret in decision making under uncertainty. *Operations Research*, 30(5), 961-981
- Ben-Akiva, M., Lerman, S.R., 1985. *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*. The MIT Press, Cambridge, Mass
- Ben-Akiva & Swait, 1986. The Akaike likelihood ratio index. *Transportation Science*, 20(2), 133-136
- Bierlaire, M., 2003. BIOGEME: A free package for the estimation of discrete choice models, *Proceedings of the 3rd Swiss Transportation Research Conference*, Ascona, Switzerland.
- Bierlaire, M., 2008. An introduction to BIOGEME Version 1.7, *biogeme.epfl.ch*
- Chorus, C.G., Arentze, T.A., Molin, E.J.E., Timmermans, H.J.P., van Wee, G.P., 2006a. The value of travel information: Decision-strategy specific conceptualizations and numerical examples. *Transportation Research Part B*, 40(6), 504-519
- Chorus, C.G., Molin, E.J.E., van Wee, G.P., Arentze, T.A., Timmermans, H.J.P., 2006b. Responses to transit information among car-drivers: Regret-based models and simulations. *Transportation Planning & Technology*, 29(4), 249-271
- Chorus, C.G., Arentze, T.A., Timmermans, H.J.P., 2008a. A Random Regret Minimization model of travel choice. *Transportation Research Part B*, 42(1), 1-18

- Chorus, C.G., Arentze, T.A., Timmermans, H.J.P., 2008b. Het compromiseffect in mobiliteitskeuzes, en de potentie van spijtminimalisatie-modellen. *Tijdschrift Vervoerswetenschap*, 44(4), 136-141
- Chorus, C.G., 2010. A new model of Random Regret Minimization. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 10(2), 181-196
- Connolly, T., Reb, J., 2005. Regret in cancer-related decisions. *Health Psychology*, 24(4), pp. 29-34
- de Jong, G., Daly, A., Pieters, M., Vellay, C., Bradley, M., Hofman, F., 2003. A model for time of day and mode choice using error components logit. *Transportation Research Part E*, 39, 245-268
- Hensher, D.A., Greene, W., Chorus, C.G., in review. Random Regret Minimisation or Random Utility Maximisation: An exploratory analysis in the context of automobile choice
- Kivetz, R., Netzer, O., Srinivasan, V., 2004. Alternative models for capturing the compromise effect. *Journal of Marketing Research*, 41, 237-257
- Loomes, G., Sugden, R., 1982. Regret-Theory: An alternative theory of rational choice under uncertainty. *The Economic Journal*, 92(368), 805-824
- McFadden, D., 1974. Conditional logit analysis of qualitative choice-behaviour. In Zarembka, P. (Eds.) *Frontiers in econometrics*, Academic Press, New York, 105-142
- McFadden, D., Train, K.E., 2000. Mixed MNL models for discrete response. *Journal of Applied Econometrics*, 15(5), 447-470
- Savage, Leonard J., 1954. *The Foundations of Statistics*. New York: Wiley
- Simonson, I., 1989. Choice based on reasons: The case of attraction and compromise effects. *Journal of Consumer Research*, 19, 158-174
- Simonson, I., 1992. The influence of anticipating regret and responsibility on purchasing decisions. *Journal of Consumer Research*, 19(1), 105-119
- Starver, T., 2008. Anticipating regret: Why fewer options may be better. *Econometrica*, 76(2), 263-305
- Train, K.E., 2003. *Discrete choice methods with simulations*. Cambridge University Press, Cambridge UK
- Wernerfelt, B., 1995. A rational reconstruction of the compromise effect: Using market data to infer utilities. *Journal of Consumer Research*, 21(4), 627-633
- Zeelenberg, M., 1999. The use of crying over spilled milk: A note on the rationality and functionality of regret. *Philosophical Psychology*, 12(3), 325-340
- Zeelenberg, M., Pieters, R., 2007. A theory of regret regulation 1.0. *Journal of Consumer Psychology*, 17(1), 3-18

Noten

- De afgeleide van de Likelihoodfunctie, die berekend moet worden als onderdeel van het optimalisatieproces, bestaat immers niet op die punten waar de functie discontinue is.
 - Aan het software-pakket NLOGIT van Bill Greene, dat een groot marktaandeel heeft zowel binnen en buiten het transport-vakgebied: is door Greene onlangs zelfs een routine toegevoegd die het mogelijk maakt om na het schatten van een RRM-model op zeer eenvoudige wijze spijtgebaseerde elasticiteiten te berekenen (zie Hensher, Greene en Chorus, in review).
 - In hetzelfde project zijn ook data verzameld voor andere reismotieven en voor treinreizigers; die worden in dit artikel niet gebruikt, net zomin als de observaties betreffende vertrektijdstopkeuzes onder specifieke prijsbeleidcondities.
 - Deze is gecorrigeerd voor het aantal geschatte parameters.
 - Omdat deze door middel van simulatie wordt geschat, kan de geschatte standaarddeviatie negatief zijn. Dit min-teken heeft geen betekenis, en de standaarddeviatie dient uiteraard als positief te worden geïnterpreteerd.
- * Sectie Transport en Logistiek, TU Delft, Postbus 5015, 2600 GA, Delft
- ** ITS, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, UK; Significance, Koninginnegracht 23, 2514 AB Den Haag, Nederland; Centre for Transport Studies, VTI/KTH, Postbus 55685, SR-102 15, Stockholm, Zweden; NEA, Postbus 276, 2700 AG Zoetermeer, Nederland

RECENTE DISSERTATIES

Adaptatie aan klimaatverandering in de binnenvaart

Taal: Nederlands, na overleg Engels

Auteur: Olaf Jonkeren

Universiteit en faculteit waar promotie plaatsvond en datum: Vrije Universiteit, Amsterdam, Faculteit der Economische Wetenschappen en Bedrijfskunde, 29/10/2009.

Promotor(res): Piet Rietveld, Jos van Ommeren

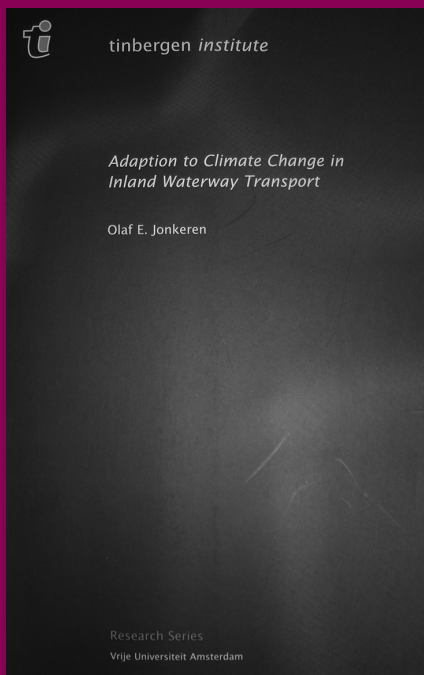
Kennis rondom de effecten van klimaatverandering op de economie is zeer relevant voor overheden op nationaal en internationaal niveau omdat deze effecten grote implicaties kunnen hebben. Een van de sectoren welke verondersteld wordt gevoelig te zijn voor klimaatverandering is de transportsector in het algemeen en de binnenvaartsector in het bijzonder. Het is waarschijnlijk dat klimaatverandering de bevaarbaarheid van waterwegen in noordwest Europa negatief zal beïnvloeden. Verwacht wordt dat in de toekomst (rond het jaar 2050) het aantal dagen per jaar met hoge waterstanden licht zal stijgen terwijl het aantal dagen met lage waterstanden licht tot sterk zal toenemen, afhankelijk van de mate van klimaatverandering. Dit impliceert dat binnenvaartschepen vaker met een beperking van de beladingsgraad zullen worden geconfronteerd. Omdat de kosten van een reis per binnenvaartschip bij een daling van de beladingsgraad niet veel veranderen, zullen deze kosten over een kleiner aantal tonnen moeten worden verdeeld, waardoor de transportkosten per ton, en daarmee de transportprijs per ton, stijgt.

Empirische analyses tonen aan dat de transportprijs per ton voor een schip van gemiddelde grootte met 94% kan toenemen bij extreem lage waterstanden (lager dan 180 cm) in vergelijking met transportprijzen voor reizen die plaatsvinden bij 'normale' waterstanden. Voor grote schepen vertoont de transportprijs per ton een nog grotere relatieve stijging. Dit resulteert in welvaartsverliezen voor de economie. Onder de aanname van een perfect competitieve binnenvaartmarkt met een perfect elastisch aanbod, is door middel van een welvaartsanalyse berekend dat het welvaartsverlies voor de Rijn- en Moezelmarkt samen tussen de €194 en €263 miljoen ligt voor het jaar 2003. Dit jaar kan als representatief worden beschouwd voor het meest extreme KNMI'06 klimaatscenario.

Het blijkt dat de mate waarin de transportprijzen per ton stijgen, als gevolg van lage waterstanden, gevoelig is voor de mate van onbalans in vervoersstromen in de binnenvaartmarkt. Voor de praktijk betekent deze bevinding dat voor verladers die gevestigd zijn in het Duitse achterland (vooral de Moezel en Neckar regio's), en die betalen voor binnenvaartvervoer vanaf de zeehavens naar het achterland, de toename in de transportprijs als gevolg van lage waterstanden tot bijna een factor twee hoger kan zijn dan voor verladers die betalen voor vervoer in tegengestelde richting.

Als gevolg van de transportprijsstijgingen lijken transportstromen in noordwest Europa zich aan te passen. De resultaten laten zien dat de vraag naar transport per binnenvaart (gemeten in tonnen) met 5,4% daalt in een jaar in het meest extreme KNMI klimaatscenario in vergelijking met een jaar onder huidige klimaatomstandigheden. De tonnen die de binnenvaart verliest, verschuiven naar de concurrerende modaliteiten weg en spoor en een deel is vraaguitval.

Een fenomeen welke we observeren in de zeevaart, namelijk dat de vaarsnelheid toeneemt in perioden met hoge transportprijzen, vinden we niet terug in de binnenvaart. De vaarsnelheid van binnenvaartschepen past zich nauwelijks aan, aan hogere transportprijzen in perioden met lage waterstanden.



Bestelinformatie: exemplaar op te vragen bij promovendus.

Adresgegevens van promovendus:

Olaf Jonkeren
Afdeling Ruimtelijke Economie
Vrije Universiteit, Amsterdam
Kamer 4A-41
De Boelelaan 1105
1081 HV, Amsterdam
Tel: +31 (0)20 5986190
E-mail: ojonkeren@feweb.vu.nl

EUOPARUBRIEK

Patrick Verhoeven

Terugblikkend op zijn eerste jaar als Europees President, verklaarde Herman Van Rompuy onlangs in een toespraak dat hij het gevoel heeft voortdurend een crisismanager te zijn en dus geen tijd vindt om een strategisch lange termijn beleid te ontwikkelen. Dat moet ons niet verwonderen. De financiële crisis en de instabiele economische situatie in een aantal lidstaten veroorzaakt een regelrechte bedreiging voor de toekomst van de Eurozone en daarmee ook voor de Europese Unie als dusdanig.

Het werkprogramma van de Europese Commissie

De crisissfeer waarin Europa zich bevindt, belet alvast de Europese Commissie niet om verder te werken aan de implementatie van haar lange termijnstrategie 'Europa 2020'. Deze ijvert voor economisch herstel, duurzame groei en werkgelegenheid. In dit verband publiceerde de Commissie enkele weken geleden haar werkprogramma voor 2011. Centraal element in het programma is de uitwerking van een financieel perspectief voor de periode 2014-2020. De onenigheid tussen lidstaten en parlement over de begroting voor 2011 is alvast een voorsmaakje van de veldslag waarin het debat over de toekomstige financiële slagkracht van de EU ongetwijfeld zal ont-aarden.

Dit zal ook gevolgen hebben voor het Europees vervoersbeleid en, in de eerste plaats, voor de infrastructuurplannen. De Commissie werkt nu al een tijdje aan een fundamentele herziening van de Trans-Europese Vervoersnetwerken, beter bekend als TEN-T. Het voorstel daarover zou tegen de lente van volgend jaar op tafel moeten liggen, hoewel we weten dat de seizoenen in Brussel nogal eens langer durven duren dan de meteorologische. Zoals ik in de vorige rubriek al vermeldde, ligt het in de verwachting dat het voorstel een multimodaal kernnetwerk van grensoverschrijdend Europees belang zal uittekenen. Daarmee moet dan eindelijk de oorspronkelijke betekenis van de TEN-T ingevuld worden. Gesteld dat hierover politieke eensgezindheid zal gevonden worden, wat verre van zeker is, dan is ook hier het financieringsvraagstuk cruciaal. De omvang van het beschikbare budget zal bepalen in hoeverre de nieuwe TEN-T plannen een oefening op papier blijven of daadwerkelijk gerealiseerd kunnen worden. Vervoerscommissaris Siim Kallas heeft alvast de lidstaten op hun verantwoordelijkheden voor de huidige TEN-T projecten gewezen door Europese steun terug te schroeven of zelfs te schrappen voor projecten die buitensporige vertraging opgelopen hebben. Ondermeer de IJzeren Rijn dreigt daarvan het slachtoffer te worden.

Het Witboek vervoer en andere (strategische) initiatieven voor 2011

Naast het financieringsvraagstuk omvat het werkprogramma van de Commissie een reeks andere strategische initiatieven die in 2011 gerealiseerd moeten worden. Het Witboek inzake vervoersbeleid is er daar één van. Deze nieuwe strategie voor de Europese transport-politiek is ondergebracht in het hoofdstuk 'duurzame groei' wat al duidelijk maakt dat het algemene Leitmotiv niet fundamenteel anders zal zijn dan dat van de vorige edities uit 1992 en 2001. Duurzaamheid zal nu dan vooral betrekking hebben op klimaatverandering en zich concreet richten op uitstoot van broeikasgassen. Maar het geliefkoosd beleidsinstrument blijft naar alle verwachtingen de internalisering van externe kosten. Daarnaast zal de klemtoon ook liggen op het invoeren van groene technologie en innovatie. Het Witboek zal ook uitgebreid aandacht besteden aan de voltooiing van de interne markt. Spoorvervoer blijft daarbij prominent in beeld, maar ook lucht- en zeehavens komen aan bod. Dadelijk meer daarover. Het derde luik van het Witboek zal de kwaliteit van het vervoer aanpakken, met maatregelen over veiligheid, dienstverlening en tewerkstelling. Tenslotte volgen nog pakketten over stedelijk vervoer en de externe dimensie van het Europees vervoersbeleid.

Laten we even terugkeren naar de lucht- en zeehavens. Het werkprogramma van de Commissie kondigt, naast het Witboek, een tweede strategisch initiatief in de vervoerssfeer aan. Dit bestaat uit een pakket maatregelen voor luchthavens. Concreet gaat het om een evaluatie van de capaciteit van de Europese luchthavens en een reeks herzieningen van bestaande regelgeving, ondermeer inzake het toekennen van slots, toegang tot de markt van grondafhandeling en geluidsnormen. Niet expliciet vermeld, maar wel voorzien, is een evaluatie en mogelijke aanpassing van de bestaande richtsnoeren inzake staatssteun aan luchthavens. Dit laatste is nu een bevoegdheid geworden van het directoraat-generaal voor mededinging.

Het valt op hoe luchthavens op Europees vlak veel meer gereguleerd zijn dan zeehavens. Daar zit de ervaring van het ports package natuurlijk voor een heel groot stuk tussen. De ongeziene dubbele nederlaag die dit voorstel in het Europees Parlement onderging veroorzaakte een waar haven-trauma bij de Commissie. Als alternatief werd voor een soft law aanpak gekozen die uiteraard door de sector warm onthaald werd. Maar niets is voor eeuwig en zo kan ik met een aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid melden dat de Commissie in haar Witboek zal aankondigen dat zij het huidige zeehavenbeleid grondig gaat evalueren. Het belangrijkste aspect blijft daarbij de toegang tot de markt van havendiensten. Een studie over havenarbeid is al uitgezet en een studie over de technisch-nautische diensten (loodsen, slepen en vastmaken) zal volgen. Als deze en andere onderzoeken aantonen dat de toegang tot de markt in havens

ernstige gebreken vertoont, dan is de komst van een derde 'ports package' heel waarschijnlijk. Ook de financiële transparantie van zeehavenbesturen staat op de agenda.

Op vervoersgebied zijn het Witboek en het luchthavenpakket de belangrijkste strategische initiatieven voor 2011. Maar het werkprogramma van de Commissie kondigt ook een hele reeks maatregelen aan die volgend jaar 'in overweging' zullen genomen worden. Het is met andere woorden niet zeker dat ze in 2011 al het daglicht zullen zien, maar de kans is groot. Zo noteren we ondermeer de herziening van de richtsnoeren voor staatssteun aan de scheepvaart, een pakket sociale maatregelen voor de maritieme sector, het vervoersbeleid met betrekking tot de buurlanden van de EU, een strategisch plan voor vervoerstechnologie, een wetgevend voorstel inzake maritieme ruimtelijke ordening en nog veel meer. Bijzondere aandacht verdient het plan om het uitgeven van concessies te reguleren. Dit kan mogelijks verregaande gevolgen hebben voor heel wat vervoerstakken. Ik kom er dan ook graag in een volgende rubriek wat uitgebreider op terug.

Tenslotte kondigt het werkprogramma al maatregelen voor de periode 2012-2014 aan. Opmerkelijk daar is de intentie om scheepvaart integraal op te nemen in de Europese maatregelen om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen, tenzij er tegen die tijd een internationaal akkoord over bestaat. Vermeldenswaard zijn ook andere milieu-initiatieven, zoals de herziening van de richtlijn over het beoordelen van milieu-effecten, een richtlijn die op de meeste infrastructuurprojecten van toepassing is. Vergeten we tenslotte niet de voorstellen van het directoraat-generaal visserij en maritieme zaken, zoals de geplande mededeling over duurzame groei in kustregio's en maritieme sectoren, een mededeling inzake integratie van maritieme surveillance en een verordening over maritieme kennis.

Gaat de EU aan vlijt ten onder ?

De Europese Unie mag zich dan politiek en financieel al in een crisis bevinden en een duidelijke lange termijnstrategie ontberen, toch kan ik mij bij het lezen van het werkprogramma van de Commissie niet van de indruk ontdoen dat het alleszins op papier niet ontbreekt aan strategische plannen en initiatieven. Misschien zijn er zelfs zoveel dat we door de bomen het bos niet meer zien. De versnippering van bevoegdheden in de Commissie speelt daarbij een rol. Een goed voorbeeld vinden we in de maritieme sector. Naast het directoraat-generaal mobiliteit en vervoer, is daar sinds enkele jaren nadrukkelijk het directoraat-generaal visserij en maritieme zaken bijgekomen dat met een eigen strategisch beleid systematisch tracht een aantal bevoegdheden naar zich toe te trekken. Aanvankelijk gebeurde dit op een doordachte manier met een groenboek dat op veel bijval kon rekenen. Maar sinds het aantreden van de nieuwe Commissie blijft daar nog maar weinig van over, het visserijbeleid buiten beschouwing gelaten. Toch blijft de betrokken administratie allerlei initiatieven op maritiem vlak produceren welke dan weer tegenvoorstellen uitlokken van de collega's in de vervoersadministratie. Bij deze turf war moet ik onwillekeurig denken aan de titel van dat heerlijke boek van Max Dendermonde, 'De wereld gaat aan vlijt ten onder'. Ik wil natuurlijk geen pleidooi voor luiheid houden zoals het hoofdpersonage in het boek doet. Maar enige rationalise-

ring van activiteit zou geen kwaad kunnen. Herman Van Rompuy is een belezen man, hij zal dit als geen ander begrijpen. Maar hij bestuurt de Raad, niet de Commissie.

Het werkprogramma van de Europese Commissie voor 2011 is beschikbaar op de volgende website: http://ec.europa.eu/atwork/programmes/index_nl.htm

Uitgever

Stichting Vervoerswetenschap

Correspondentieadres:

TNO

Postbus 49

2600 AA Delft

Tel 015 269 6811

Fax 015 269 6050

stichting.vervoerswetenschap@gmail.com

De uitgave van het Tijdschrift Vervoerswetenschap wordt financieel ondersteund door:



Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid



TNO Mobiliteit en Logistiek