

**Dynamische toedeling en toetsing van grootschalige
multimodale vervoerssystemen**

Gijsbert van Eck
Technische Universiteit Delft
G.vanEck@TUDelft.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
24 en 25 november 2011, Antwerpen**

Samenvatting

Dynamische toedeling en toetsing van grootschalige multimodale vervoerssystemen

De toenemende vervoersvraag in de Randstad, en in het bijzonder de hoeveelheid autoverkeer, leidt tot een minder goede bereikbaarheid en hoge sociale kosten. Het huidige openbaar vervoerssysteem biedt bovendien op veel plaatsen geen volwaardig alternatief voor de auto. Vaak is er sprake van een sterke scheiding tussen de auto en het openbaar vervoer. Een alternatief is het ontwikkelen van een multimodaal vervoerssysteem. Hierin worden de verschillende vervoerswijzen optimaal op elkaar afgestemd door het aanbieden van snelle en comfortabele overstapmogelijkheden. De kans om verschillende vervoerswijzen te combineren (binnen één verplaatsing) maakt het mogelijk optimaal te profiteren van de sterke punten van elke vervoerswijze. Railgebonden vervoer heeft een hoge capaciteit, neemt relatief weinig ruimte in en heeft een beperkte impact op het milieu. Stedelijke openbaar vervoer heeft ook een hoge capaciteit en kan net als de fiets bijdragen aan de leefbaarheid van een gebied. De auto is vooral aantrekkelijk door zijn flexibiliteit.

Concrete mogelijkheden om verschillende vervoerswijzen beter op elkaar af te stemmen zijn het synchroniseren van openbaar vervoersdiensten, het aanbieden van snelle en comfortabele overstapvoorzieningen en het leveren van multimodale reisinformatie. Om in te schatten in hoeverre dergelijke multimodale concepten bijdragen aan de duurzaamheid van het transportsysteem, is een geschikt vervoersmodel nodig. Het is essentieel dat een dergelijk vervoersmodel in staat is multimodale verplaatsingen te voorspellen en te analyseren. Toepassing binnen de Randstad stelt extra eisen op het gebied van dynamische modellering, capaciteitsbeperkingen en rekenefficiëntie. Dit paper presenteert een theoretisch raamwerk voor het toetsen van grootschalige multimodale vervoerssystemen. Dit raamwerk wordt vertaald naar een operationeel model dat toegepast zal worden voor het beantwoorden van multimodale vraagstukken binnen de Randstad.

De voorgestelde modelopzet is gebaseerd op de representatie van het netwerk als supernetwerk. Een supernetwerk is een unieke netwerkrepresentatie waarin alle vervoerswijzen zijn geïntegreerd. De verschillende vervoerswijzen zijn via het voetgangersnetwerk met elkaar verbonden door middel van extra schakels. Deze schakels representeren de reistijd of reiskosten die verbonden zijn aan het maken van een overstap (zoals parkeren, wachten of het vinden van het juiste perron). Een voordeel van deze netwerkrepresentatie is dat de vervoerswijze nu onderdeel wordt van de routekeuze. Hierdoor kunnen verschillende reizigerskeuzes (verplaatsing, route, vervoerswijze en tijdstip) gemodelleerd worden als één simultane keuze. In tegenstelling tot bestaande modellen zijn er geen beperkingen meer aan het aantal mogelijke multimodale alternatieven (vervoerswijzecombinaties). Bovendien wordt de impact van overstappen, een belangrijk onderdeel binnen een multimodale verplaatsing, automatisch meegenomen. In dit paper zijn de hoofdcomponenten van de modelopzet beschreven. Daarnaast is de werkwijze toegelicht en wordt vooruitgekeken naar concrete toepassingen van het model.

1. Multimodaal vervoer

De Randstad is een stedelijk gebied dat wordt gekenmerkt door een hoge concentratie van wonen, werken en voorzieningen. De vervoersvraag is hierdoor hoog met een groot aantal autoverplaatsingen per dag ten gevolg. Vertragingen en onbetrouwbaarheid in het vervoersnetwerk zorgen ervoor dat de bereikbaarheid op de meeste plaatsen niet optimaal is. Economische ontwikkelingen worden belemmerd door hoge transportkosten (OECD, 2007). Daarnaast zorgt het vele autoverkeer voor hoge sociale kosten als het gaat om energieverbruik, luchtvervuiling, veiligheid en leefbaarheid. De verwachting is dat de vervoersvraag, en voornamelijk de hoeveelheid auto's op de weg, de komende jaren door blijft groeien (CPB, MNP, RPB, 2006).

1.1 Een multimodaal vervoerssysteem voor de Randstad

Uitbreiding van het wegennet en het beter benutten van de aanwezige wegcapaciteit alleen, is niet genoeg om de toenemende vervoersvraag op te vangen. Knelpunten in het wegennet zullen blijven bestaan omdat een grote capaciteitstoename gelimiteerd wordt door politieke, financiële, ruimtelijke en milieutechnische beperkingen. Tegelijkertijd heeft de Randstad een aantal kenmerken die het gebruik van openbaar vervoer aantrekkelijk maken. Vanwege de beperkte ruimte in de steden is het aantal parkeervoorzieningen beperkt en is parkeren duur. Daarnaast bieden de grote vervoersstromen tussen dichtbebouwde centra de mogelijkheid voor hoogfrequente bus- en railverbindingen op middellange en lange afstanden. In de Randstad leidt dit tot het gebruik van een groot aantal verschillende vervoerswijzen, zoals trein, bus, tram en fiets. Op een aantal verbindingen resulteert dit nu al in een hoog openbaar vervoer aandeel. Desondanks lijkt het huidige openbaar vervoerssysteem lang niet overal een volwaardig alternatief te bieden voor veel automobilisten. Door zijn flexibiliteit blijft de auto een erg aantrekkelijke vervoerswijze.

In het huidige vervoerssysteem is op veel plaatsen sprake van een behoorlijk strikte scheiding tussen de auto en het openbaar vervoer. Een veelbelovend alternatief is het ontwikkelen van een multimodaal vervoerssysteem (Van Nes, 2002). Hierin worden de verschillende vervoerswijzen optimaal op elkaar afgestemd door het aanbieden van goede overstapmogelijkheden met een minimale weerstand. Dit stimuleert het maken van multimodale verplaatsingen waarin gebruik wordt gemaakt van meerdere vervoerswijzen die onderling verschillen in techniek (zoals fiets, auto, bus en trein) of functie (bijvoorbeeld stoptrein en intercity). Het combineren van verschillende vervoerswijzen biedt de mogelijkheid om optimaal te profiteren van de sterke punten van elke vervoerswijze terwijl hun zwakheden worden vermeden. Railgebonden vervoerssystemen hebben een hoge capaciteit, vereisen relatief weinig ruimte en zijn minder belastend voor het milieu. Deze voordelen worden vooral benut op verbindingen tussen dichtbevolkte centra. Stedelijk openbaar vervoer heeft ook een grote capaciteit en heeft net als de fiets een positief effect op de leefbaarheid in de stad. De auto is flexibel en vooral efficiënt in laag bevolkte gebieden met een gespreid verplaatsingspatroon. Al deze vervoerswijzen zijn dus niet per definitie concurrerend maar kunnen elkaar ook versterken. Reizigers vanuit

het landelijke gebied kunnen bijvoorbeeld de auto gebruiken als voortransport naar het station, over het spoor naar het stadscentrum reizen en vervolgens per fiets of stedelijk openbaar vervoer de eindbestemming bereiken. Op deze manier is een groot aantal vervoerswijzeketens denkbaar waarin ondermeer gebruik gemaakt kan worden van P&R locaties of ov-fietsen.

Nu al is het aandeel multimodale verplaatsingen tussen steden relatief hoog (Van Nes, 2002). Door een betere coördinatie en integratie van de verschillende vervoerswijzen kan dit aandeel verder toenemen. Concrete mogelijkheden hiertoe zijn het synchroniseren van openbaar vervoersdiensten, het aanbieden van snelle en comfortabele overstapvoorzieningen en het leveren van multimodale reisinformatie (OV-bureau, 2010). De verwachting is dat meer multimodale verplaatsingen leiden tot een toename van het openbaar vervoer gebruik. Deze toename vindt vooral plaats op locaties waar de nadelen van autogebruik het grootst zijn. Comfortabele en snelle overstapmogelijkheden bieden de mogelijkheid om op delen van een verplaatsing wel te profiteren van de flexibiliteit van de auto. Uiteindelijk zal dit leiden tot een duurzamer vervoerssysteem: de bereikbaarheid, veiligheid en leefbaarheid nemen toe, terwijl de milieu-impact en het energieverbruik dalen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008).

1.2 Toetsing van multimodale netwerkconcepten op duurzaamheid

Nieuwe multimodale concepten voor de Randstad zullen eerst getoetst moeten worden. Beleidsmakers hebben hiervoor de beschikking over vervoersmodellen die grofweg uit twee delen bestaan. Het eerste deel modelleert de verschillende keuzes die reizigers hebben: wel of geen reis, welke vervoerswijze, welke route en op welk tijdstip. Op basis hiervan worden reizigers toegedeeld aan het netwerk, waarna reizigersvolumes op het wegennet en bezettingen binnen het openbaar vervoer berekend kunnen worden. In het tweede deel worden de resultaten van deze toedeling vertaald naar duurzaamheidskenmerken. Hierbij gaat het niet alleen om bereikbaarheid (of reistijd) maar ook om milieu, veiligheid en leefbaarheid.

Het is essentieel dat een dergelijk vervoersmodel in staat is multimodale verplaatsingen te voorspellen en te analyseren. Een multimodale aanpak is bijvoorbeeld nodig voor het analyseren van de effecten van beprijzingsmaatregelen op auto en ov-gebruik, optimale locaties voor overstapvoorzieningen en de gevolgen van een betere synchronisatie tussen ov-diensten. Een veelgebruikte methode is het vooraf specificeren van mogelijke combinaties van vervoerswijzen (Florian et al. 2000). Deze combinaties worden beschouwd als aparte (kunstmatige) vervoerswijzen, waardoor de vervoerswijzekeuze nu is uitgebreid met extra alternatieven. Het voordeel hiervan is dat klassieke viertraps modellen (verplaatsings-, bestemmings-, vervoerswijze- en routekeuze) nog steeds toegepast kunnen worden. Een nadeel is dat alle mogelijke combinaties van vervoerswijzen vooraf gedefinieerd moeten worden. In een uitgebreid netwerk zoals dat van de Randstad is dit erg inefficiënt en wordt het aantal multimodale opties beperkt. Door de scheiding tussen vervoerswijzen omvat dit type modellen niet de volledige

complexiteit van multimodale verplaatsingen. Naast het multimodale karakter heeft de Randstad nog een aantal eigenschappen (onder andere hoge concentraties, dynamische vraag en aanbod en vervoerscapaciteiten die niet altijd toereikend zijn) die het modelleren van het vervoerssysteem extra complex maken.

1.3 Doelstelling

Tot op heden is er geen volledig multimodaal toedelingsmodel dat toepasbaar is voor het oplossen van dynamische vraagstukken op de schaal van de Randstad. Het doel van dit onderzoek is daarom het opzetten van een theoretisch raamwerk voor het toetsen van grootschalige multimodale transport systemen en dit vervolgens te vertalen naar een operationeel vervoersmodel voor middenlange en lange termijn planning. In dit paper wordt de opzet van het modelraamwerk gepresenteerd en wordt het vervolg van het onderzoek verder toegelicht. Paragraaf 2 geeft een overzicht van de belangrijkste eisen aan het model. Vervolgens beschrijft paragraaf 3 het modelraamwerk en de belangrijkste componenten hierin. Paragraaf 4 behandelt tenslotte de gevolgde werkwijze binnen het onderzoek en de geplande toepassing van het ontwikkelde vervoersmodel. Dit paper wordt afgesloten met een aantal conclusies.

2. Eisen aan een multimodaal vervoersmodel

De eigenschappen van grootstedelijke gebieden, in dit geval de Randstad, stellen een aantal specifieke eisen aan een geschikt vervoersmodel. De hoge concentraties van wonen, werken en voorzieningen leiden tot grote vervoersstromen. Deze reizigers maken gebruik van een uitgebreid netwerk dat bestaat uit een groot aantal verschillende private (lopen, fiets, auto) en publieke (bus, tram, metro en trein) vervoerswijzen. Zowel het auto- als het openbaar vervoernetwerk heeft een hiërarchische structuur (Van Nes, 2002), waarin elk niveau zijn eigen functie heeft. Op de schaal van de Randstad ligt de focus voornamelijk op interstedelijke verplaatsingen. Lagere niveaus vervullen echter een belangrijk voor- en natransport functie en kunnen daarom niet genegeerd worden. Zowel de omvang van de vraag (het aantal reizigers) als de kwaliteit van het aanbod (het netwerk) kan variëren gedurende de dag. Tijdens de spits is het aantal reizigers zo groot, dat het netwerk niet altijd in staat is deze reizigersstroom goed te verwerken. Tenslotte gaat het om een grootschalig gebied, waarin relatief kleine netwerkaanpassingen geanalyseerd moeten kunnen worden. Deze eigenschappen leiden tot de volgende eisen aan het vervoersmodel:

Multimodaal – Reizigers in de Randstad maken gebruik van een groot scala aan vervoerswijzen en combinaties daartussen. Een goede modellering vereist dat er geen beperkingen zijn aan het aantal multimodale reisalternatieven. Omdat overstappen een belangrijk deel van een multimodale verplaatsing vormt, is het correct modelleren van overstapweerstand essentieel.

Dynamisch – Elke reiziger heeft de voorkeur voor een bepaald vertrek- of aankomst tijdstip. Omdat deze tijdstippen vaak zijn aangepast op werk- en onderwijstijden,

varieert de vervoersvraag gedurende de dag. Ov-lijnen met een lage frequentie, onregelmatige dienstregelingen en mogelijke beprijzingsmaatregelen zorgen ervoor dat ook de kwaliteit van het netwerk niet constant is tijdens de dag. Bovendien kan congestie ontstaan op plaatsen waar de afstemming tussen vraag en aanbod niet goed is. Een dynamische modellering vraagt daarom het volgende:

- De keuze van reizigers wordt tijdsafhankelijk gemodelleerd, waarbij intervallen met een orde van grootte van 15 minuten worden toegepast. Variatie in beschikbaarheid en kwaliteit van reisalternatieven wordt hiermee ondervangen.
- De keuze voor een vertrek- of aankomsttijdstip is onderdeel van de modellering. Reizigers kunnen ervoor kiezen om af te wijken van hun gewenste vertrektijd als de verwachte reistijden op een eerder of later tijdstip aanzienlijk groter zijn. Dezelfde tijdsintervallen kunnen hier toegepast worden.
- De propagatie van reizigers over het netwerk wordt gesimuleerd. Congestie is het resultaat van een groot aantal verplaatsingen (elke met hun eigen herkomst en bestemming) die gebruik maken van dezelfde infrastructuur. De interactie tussen deze reizigers leidt tot grotere reistijden. Voor deze simulatie is een tijdstap van enkele seconden vereist.

Gelimiteerde capaciteit - Tijdens spitsuren is de belasting op het netwerk hoog. Het is aannemelijk dat de beschikbare capaciteit niet overal toereikend zal zijn. Dit geldt niet alleen voor wegen, maar ook voor het openbaar vervoer en parkeervoorzieningen. Deze capaciteitsbeperkingen hebben invloed op reistijden (auto), comfort (openbaar vervoer) en overstapmogelijkheden (parkeerplaatsen). Het is daarom belangrijk capaciteitsbeperkingen mee te nemen in de modellering.

Efficiënte rekenmethoden - Efficiënte datastructuren en rekenmethoden zijn essentieel om grootschalige netwerken door te rekenen. De omvang van de Randstad, het dichte wegennet en nauw met elkaar verweven openbaar vervoersnetwerken leiden tot een grote hoeveelheid data. Tegelijkertijd vereisen multimodale ontwerpvoorbeeldstukken een relatief gedetailleerde modellering. Er dient daarom een goede balans tussen detailniveau en nauwkeurigheid gevonden te worden.

Meerdere gebruikersklassen - Elke reiziger heeft zijn of haar eigen voorkeuren. Dit speelt mee in de keuze voor een bepaalde vervoerswijze of een het wel of niet maken van een overstap. Daarnaast hebben reizigers verschillende reismotieven en niet allemaal dezelfde mogelijkheden omdat ze bijvoorbeeld geen auto bezitten. Het apart modelleren van elke reiziger is inefficiënt en vereist een onrealistische hoeveelheid data. Wel worden reizigers met vergelijkbare eigenschappen (binnen een bepaalde bandbreedte) onderverdeeld in een aantal gebruikersklassen.

Evenwichtstoedeling - Het model zal vooral toegepast worden voor middellange en lange termijn planning. Het is daarom praktisch om uit te gaan van een evenwichtsberekening. Het toetsen van de duurzaamheid wordt hierdoor eenvoudiger en verschillende netwerken kunnen goed met elkaar vergeleken worden.

De onderliggende aanname is dat reizigers goed op de hoogte zijn van het netwerk (op basis van ervaring of reisinformatie) en intelligente keuzes maken om hun reisweerstand te minimaliseren.

Kwantitatieve duurzaamheidstoetsing – Modelresultaten moeten beleidsmakers een gedetailleerd overzicht bieden van de kwaliteit van een netwerk. Dit vereist een kwantitatieve aanpak waarbij helder geformuleerde scores voor duurzaamheidskenmerken worden berekend. Hierbij gaat het om bereikbaarheid, milieu-impact, energieverbruik, veiligheid en leefbaarheid.

Flexibel – Toepassingen kunnen variëren in netwerken (combinaties van vervoerswijzen, vraagpatronen en gedragskenmerken). Er is daarom een generiek model nodig dat eenvoudig afgestemd kan worden op een specifieke toepassing. Daarnaast moet er ruimte zijn voor uitbreiding met nieuwe inzichten en technieken zodat het model geschikt is voor verder praktisch en theoretisch onderzoek.

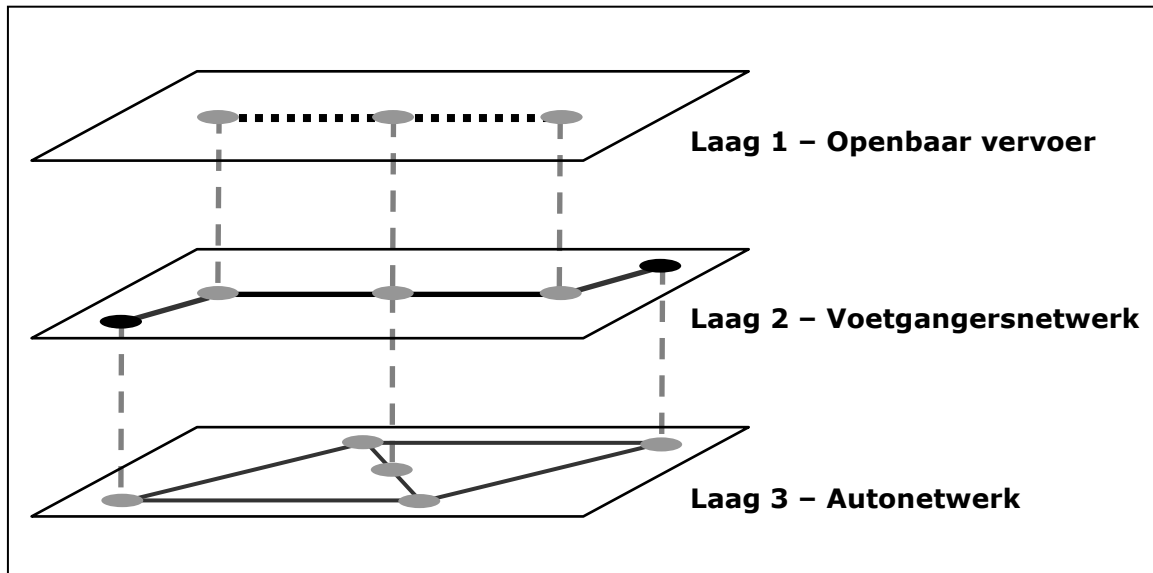
3. Basisprincipes en opzet van het vervoersmodel

Klassieke voervoersmodellen modelleren de verplaatsings-, bestemmings-, vervoerwijze- en routekeuze in achtereenvolgende stappen. Soms wordt hier de keuze voor vertrek- of aankomsttijdstip aan toegevoegd. Dit type modellen is gebaseerd op een scheiding tussen modaliteiten en vervoerskeuzes en voldoet niet aan alle genoemde eisen. In deze paragraaf wordt een nieuwe modelopzet gepresenteerd.

3.1 De Supernetwerkrepresentatie

Een goede representatie van het vervoerssysteem vormt de basis voor elk vervoersmodel. De aanwezige infrastructuur en vervoersdiensten worden vertaald in een set van knooppunten en schakels. Deze netwerkrepresentatie wordt gebruikt om aantrekkelijke routes te vinden en de reistijd en kosten hiervan te berekenen. In plaats van aparte netwerkmodellen per vervoerswijze is er gekozen om gebruik te maken van een supernetwerk. Een supernetwerk is een unieke netwerkrepresentatie waarin alle vervoerswijzen geïntegreerd zijn (Sheffi, 1985; Abdelghany, 2001; Lozano and Storch, 2001). De verschillende, private en openbare, vervoerswijzen zijn verbonden aan het voetgangersnetwerk door middel van kunstmatige (overstap) schakels. Op deze manier zijn alle vervoerswijzen via het voetgangersnetwerk met elkaar verbonden. De toegevoegde schakels representeren de reistijd of reiskosten die zijn verbonden aan het maken van een overstap zoals parkeren, wachten of het vinden van het juiste perron. Figuur 1, op de volgende pagina, laat een schematisch voorbeeld zien van een supernetwerk waarin drie verschillende vervoerswijzen zijn opgenomen. Op eenvoudige wijze kunnen hieraan meerdere vervoerswijzen worden toegevoegd. Een belangrijk voordeel van deze netwerkrepresentatie is dat de vervoerswijze nu een onderdeel wordt van de routekeuze. Een route in het netwerk beschrijft niet alleen de fysieke schakels die gebruikt worden, maar ook de vervoerswijzen en overstappen daartussen. Als er naar routes gezocht wordt in het supernetwerk, zijn er geen beperkingen meer aan het aantal mogelijke multimodale

opties en de impact van overstappen wordt automatisch meegenomen.



Figuur 1 – Schematische weergave van een supernetwerk met drie vervoerswijzen

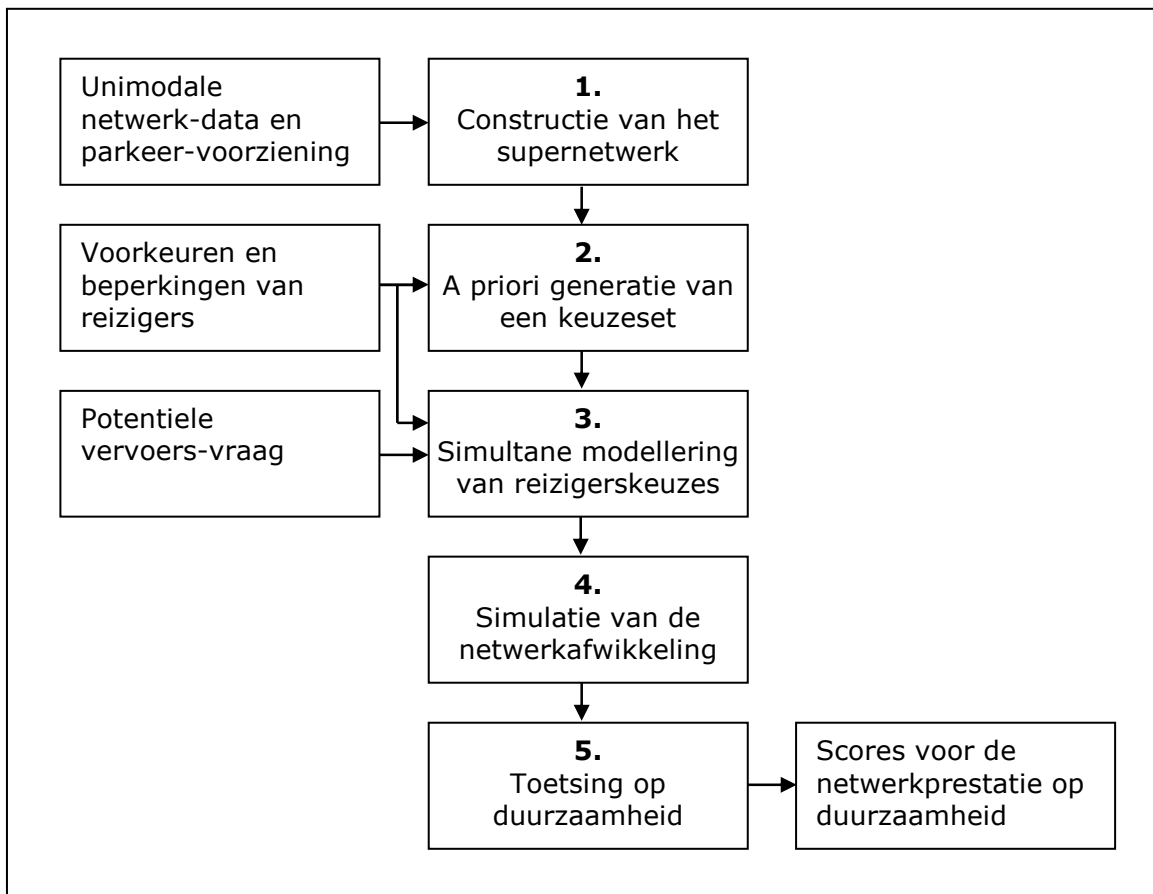
3.2 De componenten van het model

Figuur 2 geeft de opzet van het model weer. Deze opzet is modulair en bestaat uit vijf componenten: constructie van het supernetwerk, a priori generatie van de route set, simultane modellering van reizigerskeuzes, simulatie van de netwerkafwikkeling en toetsing op duurzaamheid. Elk onderdeel voert één taak uit binnen het volledige toedeling- en toetsingsproces. De uitvoer van de ene component levert de invoer voor de volgende component.

Constructie van het supernetwerk

Het supernetwerk is opgebouwd uit verschillende unimodale netwerken. Voor het construeren van het supernetwerk zijn dus gegevens nodig per vervoerswijze. Dit zijn wegen, haltes, stations, vervoersdiensten en parkeervoorzieningen. Elke laag in het supernetwerk representeert een vervoerswijze. Er is onderscheid gemaakt in vijf lagen: voetgangers, fiets, auto en twee lagen voor het openbaar vervoer. Binnen het openbaar vervoer is onderscheid gemaakt tussen het onderliggende netwerk en het hoofdnetwerk. Het hoofdnetwerk wordt gedetailleerd gemodelleerd, elke vervoerdienst tussen twee haltes of stations wordt gerepresenteerd door een aparte schakel (Fearnside and Draper, 1971). Daarnaast zijn er losse schakels voor halteren, instappen en uitstappen. Deze modellering biedt de mogelijkheid om tijdens het toedelingsproces rekening te houden met de exacte dienstregelingen en om het aantal reizigers per voertuig te berekenen. Het onderliggende netwerk is minder gedetailleerd gerepresenteerd. Schakels beschrijven hier de gemiddelde reistijd tussen twee haltes of stations die direct met elkaar verbonden zijn (De Cea and Fernandez, 1993). De in- en uitstaptijd en wachttijd zijn indirect opgenomen in deze schakels. Deze manier van modelleren is efficiënter maar biedt niet de mogelijkheid exact te berekenen hoeveel mensen gebruik maken van een bepaald voertuig. De

centra van herkomst- en bestemmingszones bevinden zich in het voetgangersnetwerk. Dit voetgangersnetwerk wordt met kunstmatige schakels verbonden aan de overige netwerkklagen. Voor de private netwerken (fiets en auto) geldt dat er een overstapschakel gecreëerd wordt als er gelegenheid is om het voertuig te parkeren. Openbaar vervoer wordt verbonden aan het voetgangersnetwerk ter hoogte van haltes en stations. Elke link in het uiteindelijke supernetwerk wordt beschreven door een begin- en eindknooppunt en heeft een reistijd, variabele kosten (kilometerprijs zoals ov-kosten, benzine of beprijzing) en vaste kosten (bijvoorbeeld parkeerkosten, het opstaptarief voor ov of de huur van een ov-fiets).



Figuur 2 – De vijf componenten van het multimodale vervoersmodel

A priori generatie van de routeset

Nadat het supernetwerk is geconstrueerd, wordt a priori een routeset gegenereerd. Dit is de set van alle attractieve routes tussen herkomst en bestemming. Het vooraf genereren van routes bespaart tijd, omdat geen iteratief routezoek-algoritme nodig is tijdens de toedeling. Daarnaast zijn er een grote vrijheid om geavanceerde keuzemodellen toe te passen om reizigers te verdelen over de verschillende routes. Dit maakt het eenvoudiger om rekening te houden met overlap. Tenslotte kan de totale utiliteit van een route eenvoudig uitgebreid worden met niet-lineaire

componenten (bijvoorbeeld de voorkeur voor een unimodale of multimodale route). De gevonden routes worden beschreven als achtereenvolgende schakels uit het supernetwerk en beschrijven daarom zowel de route, de vervoerswijzen als de overstaplocaties. Het multimodale karakter van het model brengt extra eisen aan een goede route set met zich mee. Het is belangrijk dat er voldoende ruimtelijke en multimodale variatie in de set aanwezig is. Dat wil zeggen dat er niet alleen verschillende routes per vervoerswijze wenselijk zijn, maar dat ook de verschillende mogelijke multimodale combinaties vertegenwoordigd moeten zijn in de routeset. Het dynamische karakter van het model vereist daarnaast dat de routeset robuust is in de tijd. In de eerste plaats zijn aantrekkelijke ov-alternatieven niet altijd beschikbaar als de frequentie relatief laag is. Voor bepaalde vertrektijdstoppen kunnen andere alternatieven sneller of goedkoper zijn. Ook deze alternatieven moeten opgenomen worden in de route set. Ten tweede dient de routeset nog steeds volledig te zijn als er congestie op het netwerk ontstaat waardoor sommige reizigers voor alternatieve routes zullen kiezen.

Simultane modellering van de reizigerskeuzes

De volgende stap is het verdelen van reizigers over de verschillende reisalternatieven. Er is aangenomen dat het aantal potentiële reizen en bijbehorende bestemmingen bekend zijn. Wat overblijft, zijn de keuze voor een route, vervoerswijze, verplaatsing en vertrektijdstop. Alle routes en vervoerswijzen (en combinaties daarvan) zijn al opgenomen in de route set. De verplaatsingskeuze is meegenomen door hieraan een 'nul' alternatief toe te voegen, dit is de mogelijkheid om geen verplaatsing te maken. De vertrektijdstopkeuze wordt beschouwd door elk alternatief meerdere keren mee te nemen voor verschillende vertrektijdstoppen. Reizigers kunnen er voor kiezen om eerder of later dan gepland te vertrekken als dit sneller of goedkoper is. Dit gaat wel ten kosten van een penalty voor het afwijken van het gewenste vertrektijdstop. Op deze manier ontstaat een dynamische set alternatieven die zowel de route, vervoerswijze als het vertrektijdstop beschrijven. Bovendien is er de optie om geen verplaatsing te maken. Elk alternatief krijgt een utiliteit die is opgebouwd uit reistijd, reiskosten en vervoerswijze specifieke voorkeuren. Alle reizigers worden verdeeld over de beschikbare alternatieven op basis van hun utiliteit. Alle reizigerskeuzes worden dus simultaan in één stap gemodelleerd. De volgorde van deze keuzes speelt geen rol meer en het wordt eenvoudiger om overlap tussen alternatieven mee te nemen in de keuzemodellering.

Simulatie van de netwerkafwikkeling

Het is nu bekend hoeveel reizigers voor een bepaalde route kiezen. Verschillende routes kunnen gedeeltelijk gebruik maken van dezelfde infrastructuur. Over het algemeen geldt dat boven een bepaald aantal gebruikers de snelheid op het netwerk afneemt. Door deze interactie tussen reizigers kunnen werkelijke en ervaren reistijden groter zijn dan verwacht. Reizigers krijgen te maken met file, het gebrek aan een parkeerplaats of overvolle voertuigen en zullen hun keuzes hierop aanpassen. Daarom wordt de volledige afwikkeling van reizigers op het netwerk in tijd en ruimte gesimuleerd. De gevolgen worden in rekening gebracht in een iteratief

proces. Na het modeleren van de routekeuze (inclusief vervoerswijze en vertrektijdstip) wordt de afwikkeling op het netwerk gesimuleerd. Op basis van de resultaten hiervan worden de reistijden en kosten per schakel aangepast alvorens de routekeuze opnieuw wordt gemodelleerd. Dit proces wordt meerdere malen herhaald totdat een evenwichtssituatie benaderd wordt. Op deze manier wordt ook in rekening gebracht dat de verschillende vervoerswijzen elkaar beïnvloeden. In een multimodale verplaatsing kan het zijn dat een automobilist door vertraging zijn of haar geplande treinverbinding mist en genoodzaakt is om op de volgende trein te wachten. De totale reistijd zal dan langer worden dan gepland.

Toetsing op duurzaamheid

De uitvoer van het toedelingsmodel (bestaande uit de hierboven beschreven componenten) bestaat uit netwerkbelastingen, voertuigbezettingen, reistijden, aantallen reizigers en snelheden. Samen beschrijven deze gegevens de prestaties van het netwerk. De laatste stap is om deze prestaties te vertalen naar duurzaamheidsscores. Voor de verschillende aspecten van duurzaamheid (bereikbaarheid, milieu-impact, energieverbruik, leefbaarheid en veiligheid) worden heldere prestatie-indicatoren opgesteld. Voor elke aspect wordt een score berekend met behulp van eenvoudige rekenmethoden. De verschillende scores geven een compleet overzicht van de prestaties van het totale vervoerssysteem.

4. Verdere invulling van het onderzoek

De volgende stappen binnen het onderzoek zijn de verdere theoretische uitwerking van de modelcomponenten en de vertaling naar een operationeel model. Met beide taken is een begin gemaakt. Deze paragraaf beschrijft de gevolgde werkwijze en de geplande toepassingen van het vervoersmodel.

4.1 Werkwijze

Dit onderzoek is gestart met een uitgebreid literatuuronderzoek. Er is een analyse gemaakt van de eisen aan een multimodaal vervoersmodel, gekeken naar bestaand onderzoek dat benut kan worden en de belangrijkste uitdagingen binnen het project zijn in kaart gebracht. Op basis hiervan is een modelopzet ontwikkeld en is een onderzoeksplan geschreven (Van Eck, 2011). Vervolgens is een model opgezet in het rekenprogramma MATLAB. Dit model bevat een vereenvoudigde versie van alle componenten zoals beschreven in paragraaf 3. Hierna is gestart met het één voor één uitbreiden van de vijf modelcomponenten. De constructie van het supernetwerk is inmiddels volledig geautomatiseerd. Vanuit losse unimodale netwerken en parkeergegevens kan een geïntegreerd supernetwerk opgebouwd worden. Het detailniveau van dit supernetwerk kan bijgestuurd worden en hangt samen met de beschikbare invoergegevens. Vervolgens zijn een aantal routezoek-algorithmen uit de literatuur toegepast om routes te genereren binnen het supernetwerk. Op dit moment wordt onderzocht welke methoden en algoritmen hiervoor het meest geschikt zijn. Een multimodale en dynamische toepassing stelt een aantal extra eisen aan de route set. Voor de simultane keuzemodellering is een utiliteitsfunctie voor multimodale routes ontwikkeld. Vervoerskeuzemodellen, netwerkafwikkeling en

duurzaamheidstoetsing zullen aan bod komen als deze stappen zijn afgerond. Bij het ontwikkelen van het model is in eerste instantie gebruik gemaakt van een klein fictief netwerk om de werking te testen. Vervolgens zijn de uitgebreide modelcomponenten getoetst op een groter, realistisch, netwerk. Dit netwerk beslaat de driehoek tussen Amsterdam, Schiphol en Haarlem. Uiteindelijk is het de bedoeling om vanuit MATLAB over te stappen naar een meer geavanceerde programmeertaal of om de modelcomponenten te implementeren in een bestaand vervoersmodel.

4.2 Toepassingen van het model

Dit onderzoek is onderdeel van het NWO (Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek) programma 'Strategy towards sustainable and reliable multimodal transport in the Randstad' (SRMT). Eén van de hoofdoelen binnen het SRMT programma is het ontwerpen van een duurzaam multimodaal transportnetwerk in de Randstad voor het jaar 2040 (Hansen et al., 2009). Een vereenvoudigde versie van het multimodale vervoersmodel wordt gebruikt tijdens de ontwerpfase om een set van interessante multimodale netwerken te genereren op basis van een aantal ontwerpcriteria (Brands, 2010). Vervolgens zal het volledige model toegepast worden om de duurzaamheid (bereikbaarheid, milieu-impact, energieverbruik, etc.) van deze netwerken meer gedetailleerd te berekenen voor verschillende vraag- en gedragsscenario's. In eerste instantie zullen alle projecten binnen het genoemde onderzoeksprogramma zich richten op de Noordvleugel van de Randstad, ofwel de Metropoolregio Amsterdam. Dit gebied heeft alle kenmerken in zich die de Randstad als geheel ook heeft en biedt voldoende mogelijkheden voor multimodale netwerkconcepten. Er is gekozen om met een kleiner studiegebied te beginnen op basis van rekenkundige overwegingen en de beschikbaarheid van goede invoer data. De gebruikte data is beschikbaar gesteld door de ontwikkelaars van het VENOM (Verkeersmodel Noordvleugel) model (VENOM, 2011). Naast deze toepassing binnen het onderzoeksprogramma wordt er nauw samengewerkt met het promotieproject 'Innovative Roadpricing' (Smits, 2010). Binnen dit project wordt gezocht naar een optimale beprijzingsstrategie voor de Randstad. Hierbij wordt rekening gehouden met de verschillende partijen die hierbij een rol spelen en de doelstellingen die zij hebben. Verschillende vormen van rekeningrijden hebben elk hun eigen invloed op het gedrag van reizigers. Het is aannemelijk dat andere keuzes gemaakt zullen worden als het gaat om vertrektijdstip, vervoerswijze en route. Het multimodale vervoersmodel zal binnen dit onderzoek gebruikt worden om de effecten van beprijzing op de verschillende vervoerskeuzes in kaart te brengen.

5. Conclusie

Het uitgangspunt van dit onderzoek is dat een multimodale netwerkbenadering zal resulteren in een duurzamer transportsysteem voor de Randstad. Het effect van multimodale concepten op milieu, energieverbruik, veiligheid en leefbaarheid kan getoetst worden met behulp van een vervoersmodel. Het analyseren van multimodale verplaatsingen binnen een grootstedelijk gebied stelt echter specifieke eisen aan een vervoersmodel. Naast een goede integratie van de verschillende

vervoerswijzen dient rekening gehouden te worden met het dynamische karakter van de Randstad, een capaciteit die niet overal toereikend is en de grote schaal van het gebied. De toepassing van een supernetwerk biedt de mogelijkheid om het vervoerssysteem van de Randstad te modelleren conform alle eisen die aan een dergelijk model gesteld worden. In deze methode wordt uitgegaan van netwerkrepresentatie waarin alle vervoerswijzen zijn geïntegreerd. Op deze manier kunnen alle mogelijke uni- en multimodale verplaatsingen voorspeld en geanalyseerd worden. Hierbij worden alle onderdelen van een verplaatsing beschouwd, inclusief alle handelingen die horen bij het maken van een overstap. In de gekozen modelopzet worden de verplaatsings-, route-, vervoerswijze-, en tijdstipkeuze simultaan gemodelleerd. Het model is daarom geschikt voor het oplossen van multimodale vraagstukken (bijvoorbeeld netwerkontwerp of beprijzingsmaatregelen) op de schaal van de Randstad.

Verantwoording

Dit onderzoek wordt uitgevoerd als promotieproject aan de Technische Universiteit Delft. NWO (Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek) is samen met de universiteit verantwoordelijk voor de financiering van het project.

Referenties

1. Abdelghany, 2001, Stochastic dynamic assignment for intermodal transportation networks with consistent information supply strategies, Ph.D. Thesis, University of Texas, USA
2. Brands, 2010, Optimalisatie van het multimodale vervoersnetwerk in de Randstad, rekening houdend met meerdere doelstellingen, Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk (CVS) 2010
3. CPB, MNP en RPB, 2006, Welvaart en Leefomgeving (WLO), Planbureau voor Leefomgeving, Den Haag
4. De Cea & Fernandez, 1993, Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model, *Transportation Science*, 27(2), pag. 133-147
5. Fearnside & Draper, 1971, Public transport assignment: a new approach, *Traffic Engineering and Control*, Vol. 12, pag. 298-299
6. Florian et al., 2000, A multi-class multi-mode variable demand network equilibrium model with hierarchical logit structures, *Proceedings of the PTRC Conference*, pag. 211-224
7. Hansen et al., 2009, Strategy towards sustainable and reliable multimodal transport in the Randstad (SRMT), Applications for a full NWO proposal 2nd round, Delft
8. Hilderink et al., 2010, Koken met VENOM: de bereiding van een verkeersprognosemodel voor de Metropoolregio Amsterdam, Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk (CVS) 2010
9. Lozano & Storchi, 2001, Shortest viable path algorithm in multimodal networks, *Transportation Research Part A*, No. 35, pag. 225-241
10. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008, Strategisch Kennis- en

Innovatieagenda Mobiliteit en Water (SKI-agenda), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag

- 11.** OECD, 2007, OECD Territorial Reviews: Randstad Holland, OECD, Paris
- 12.** OV-Bureau Randstad, 2010, Randstadnet 2028, de belofte aan de reiziger, OV-Bureau Randstad, Utrecht
- 13.** Sheffi, 1985, Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods, Prentice Hall Ed., Prentice Hall
- 14.** Smits, 2011, Innovative transport pricing, Research proposal, Delft University of Technology
- 15.** Van Eck, 2011, Dynamic assessment of multimodal transport systems, Research Proposal, Delft University of Technology
- 16.** Van Nes, 2002, Design of multimodal transport networks, a hierarchical approach, T2002/5, TRAIL Thesis Series