

**Optimalisatie van het multimodale vervoersnetwerk in de
Randstad, rekening houdend met meerdere doelstellingen**

Ties Brands
Universiteit Twente
t.brands@utwente.nl

Eric van Berkum
Universiteit Twente
e.c.vanberkum@utwente.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
25 en 26 november 2010, Roermond**

Samenvatting

Optimalisatie van het multimodale vervoersnetwerk in de Randstad, rekening houdend met meerdere doelstellingen

Deze paper geeft een onderzoeksapproach om te komen tot een geoptimaliseerd multimodaal personenvervoersnetwerk in de Randstad. Deze approach houdt rekening met meerdere doelstellingen, die de verschillende aspecten van duurzaamheid in relatie tot verkeer representeren (bereikbaarheid, milieu en leefbaarheid). Uitgangspunt is het huidige netwerk van openbaar vervoer, auto en fiets. Verbeteringen aan het openbaar vervoernetwerk en aan overstapknooppunten zijn de beslisvariabelen, het netwerk voor auto en voor fiets wordt constant verondersteld. De effecten van deze verbeteringen worden gemodelleerd door een verkeersmodel dat expliciet kan omgaan met multimodale verplaatsingen. Dit resulteert in een toegedeeld netwerk, van waaruit de waarden van de doelfuncties worden berekend met behulp van effectmodellen. De toe te passen optimalisatietechniek houdt rekening met meerdere doelstellingen, wat resulteert in een Pareto optimale set: een set oplossingen met bijbehorende netwerken en doelfunctiewaarden, waarvan elke oplossing bij een bepaalde waardering van de doelstellingen optimaal kan scoren. Omdat exacte methoden te rekenintensief zijn, wordt er in de oplossingsruimte gezocht door middel van een heuristische optimalisatiemethode, zoals bijvoorbeeld genetisch algoritme, simulated annealing, tabu search. Er kunnen clusteringstechnieken worden toegepast om de set te reduceren tot een presentabele hoeveelheid oplossingen. De paper eindigt met enkele mogelijke scenario's die uit het optimalisatiealgoritme zouden kunnen voortkomen. De beoogde resultaten van dit onderzoek kunnen input zijn voor beleid in de Randstad: ze laten de samenhang tussen de verschillende doelstellingen zien en geven voor elk van de oplossingsrichtingen aan hoe effectief ze zijn op de verschillende duurzaamheidsdoelstellingen.

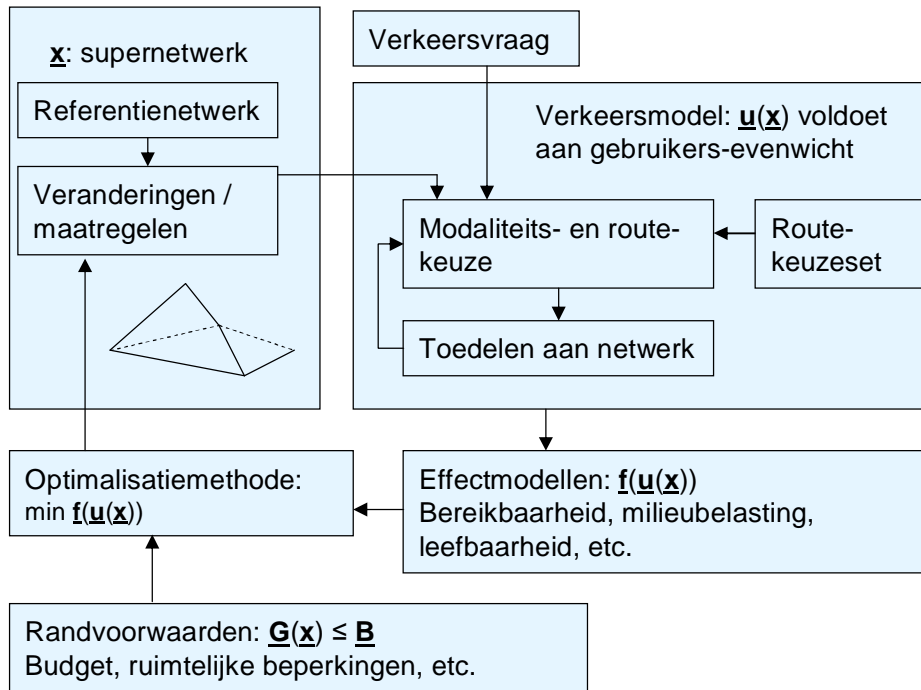
1. Aanleiding onderzoek

Dit onderzoek vindt plaats in het kader van het NWO programma 'Duurzame Bereikbaarheid van de Randstad' (DBR). In de aanvraag voor dit onderzoek wordt gesteld dat de Randstad een regio is van een dusdanige stedelijke aard, dat het niet mogelijk is alleen te rusten op een autogebaseerd vervoerssysteem. In een stad is de ruimte namelijk schaars, en een autogebaseerd systeem neemt veel van die stedelijk ruimte in, voor parkeren en voor infrastructuur. Aan de andere kant is de ruimtelijke structuur van de Randstad, met zijn meerdere stedelijke kernen, niet erg geschikt voor een openbaar vervoerssysteem. Binnen stedelijke kernen is de fiets erg geschikt, maar voor verplaatsingen tussen de stedelijke kernen is de afstand vaak te groot voor de fiets. Al met al wordt er voor verplaatsingen binnen de Randstad nog (te) vaak voor de auto gekozen. Dit is aanleiding geweest voor een multi disciplinair onderzoek naar het multi modale vervoerssysteem in de Randstad: 'Strategy towards sustainable and reliable multi-modal transport in the Randstad' (SRMT). Dit onderzoek is een deelproject van SRMT, waarvan het doel is om te komen tot ontwerprichtlijnen voor dit multi modale systeem, waarmee in 2040 zo goed mogelijk aan verschillende (duurzaamheids-) doelstellingen wordt voldaan. Dit gebeurt in samenspraak met de andere deelprojecten binnen SRMT, die gaan over de economische effecten van multimodale verkeerssystemen, de mogelijkheden voor 'Transit Oriented Development' in Nederland, de ontwikkeling van een dynamisch, multimodaal toedelingsmodel en het synchroniseren van dienstregelingen op overstapknooppunten.

Het onderzoek is nog in een beginfase op dit moment. In deze paper wordt een indruk gegeven van het uit te voeren onderzoek: van de bouwstenen, het verwachte resultaat. Daardoor kunnen geïnteresseerden vast kennis maken met het onderzoek en kan in een vroeg stadium van het onderzoek nog input worden verzameld vanuit andere bezoekers van dit congres of anderen. Zowel vanuit de praktijk als vanuit de wetenschap zijn suggesties meer dan welkom.

2. Onderzoeksraamwerk

In het onderzoek wordt het probleem benaderd als een wiskundig optimalisatievraagstuk met meerdere doelfuncties: er worden oplossingen gezocht die het meest aan de doelstellingen voldoen, binnen gegeven randvoorwaarden. Daarbij wordt het verkeerssysteem multimodaal gemodelleerd. Een overzicht van de componenten van dit onderzoek is gegeven in het schema in figuur 1. Enkele van deze componenten worden binnen deze studie ontwikkeld, terwijl andere componenten al bestaan en worden ingebracht in het raamwerk. In deze paragraaf wordt ingegaan op de componenten van het onderzoeksraamwerk. Op de optimalisatiemethode wordt verder ingegaan in paragraaf 3.



Figuur 1: Onderzoeksraamwerk

\underline{x}	Vector van beslisvariabelen die het supernetwerk representeren
\underline{u}	Vector van linkbelastingen in het supernetwerk
\underline{f}	Vector van doelfunctiewaarden
\underline{G}	Vector van functies voor de randvoorwaarden
\underline{B}	Vector van grenswaarden voor de randvoorwaarden

Tabel 1: overzicht gebruikte variabelen

Multimodaal supernetwerk

Het uitgangspunt is het bestaande multimodale netwerk, inclusief de op dit moment bekende plannen voor de toekomst: het referentienetwerk. Op de schaal van de Randstad zijn vooral auto en openbaar vervoer belangrijk. De fiets is belangrijk op de korte verplaatsingen, maar daar ligt hier niet de focus op. In de modellering van voor- en natransport wordt wel rekening gehouden met de fiets. De netwerken van openbaar vervoer, auto en een deel van het fietsnetwerk zullen gecombineerd worden tot een zogenaamd supernetwerk (Sheffi, 1985, Benjamins et al., 2001). Dit supernetwerk bevat autolinks, openbaar vervoer links en fietslinks. De links van de verschillende modaliteiten zijn met elkaar verbonden door middel van overstaplinks. Deze stellen bijvoorbeeld looptijden, wachttijden, parkeertarieven, etc. voor. Het supernetwerk \underline{x} stelt een dus een multimodaal netwerk voor.

Beslisvariabelen

Tijdens de optimalisatie worden veranderingen aangebracht in dit netwerk \underline{x} : de beslisvariabelen van het optimalisatieproces. Elke beslisvariabele kan verschillende waarden aannemen. We kiezen in dit project als beslisvariabelen voor investeringen in openbaar vervoer voorzieningen (nieuwe OV infrastructuur, herrouteren van OV lijnen, frequentie van OV lijnen, Intercity status van een station) of in overstapvoorzieningen die

uitwisseling tussen modaliteiten kunnen realiseren (P+R voorzieningen, nieuwe stations). Voor al deze voorzieningen zullen vooraf kandidaatlocaties worden gedefinieerd. In dit onderzoek wordt het autonetwerk en het fietsnetwerk dus als gegeven beschouwd en wordt onderzocht in hoeverre maatregelen, gerelateerd aan het openbaar vervoer netwerk en rekening houdend met de aanwezige auto- en fietsnetwerken, kunnen bijdragen aan het realiseren van duurzaamheidsdoelstellingen.

Verkeersvraag

Voor de voorspelling van de verkeersvraag in 2040 sluiten we aan bij de bestaande WLO scenario's, inclusief bijbehorende voorspellingen voor de herkomst bestemmings matrix. Tijdens het optimalisatieproces wordt de totale verkeersvraag als constant verondersteld. De vraag kan binnen het proces zowel toegedeeld worden aan het autonetwerk als aan het openbaar vervoer netwerk. Binnen subproject 1 van het SRMT project worden de ruimtelijk economische effecten van wijzigingen in multimodale infrastructuur geanalyseerd, waardoor het mogelijk wordt een of enkele iteratieslagen aan te brengen om het evenwicht tussen infrastructuurontwikkelingen en ruimtegebruik te modelleren.

Verkeersmodel

Voor het bepalen van de verkeersstromen wordt gebruik gemaakt van TRANSFER, een evenwichtsmodel voor het modelleren van ketenverplaatsingen (Carlier et al., 2005). Dit is een statisch model, wat de HB matrix (wordt constant verondersteld) toedeelt aan het supernetwerk. Dit model combineert stap 3 en 4 van het traditionele vierstapsmodel: een toedeling aan het supernetwerk bevat zowel modal split als routekeuze, inclusief trips die uit meerdere modaliteiten bestaan. In het toegedeelde netwerk heerst gebruikersevenwicht.

Effectmodellen

De toedeling levert een \underline{u} , de vector met linkbelastingen in het supernetwerk. Voor het berekenen van de doelfunctiewaarden \underline{f} wordt zo veel mogelijk aangesloten bij bestaande maten, indien nodig berekend met behulp van bestaande effectmodellen (zie ook paragraaf 3.2). De hieruit volgende relatie $\underline{f}(\underline{u})$ bepaalt de waarde van de verschillende doelfuncties. De kwaliteit van elk netwerk wordt dus beoordeeld door de doelfunctiewaarden \underline{f} te berekenen, op basis van \underline{u} .

Randvoorwaarden

Tenslotte is niet elke denkbare combinatie van waarden voor \underline{x} toegestaan door andere randvoorwaarden, zoals een beperkt budget, ruimtelijke aspecten, etc. Deze randvoorwaarden worden wiskundig weergegeven door functies \underline{G} van \underline{x} , die onder een bepaalde grenswaarde \underline{B} moeten blijven: $\underline{G}(\underline{x}) \leq \underline{B}$. Bijvoorbeeld de kosten zijn afhankelijk van de netwerkconfiguratie \underline{x} , en moeten daarbij onder de grenswaarde van het toegestane budget blijven.

3. Optimalisatiemethode met meerdere doelstellingen

3.1 Wiskundige technieken

Bij het optimaliseren met meerdere doelstellingen is het doel het vinden van een zogenaamde Pareto optimale set. Voor elke oplossing in deze set geldt dat er geen andere oplossing in de set bestaat die op alle doelstellingen beter of gelijk scoort. Zonder

informatie over beleidsvoorkeuren is dan ook niet te bepalen welke oplossing uit de Pareto set de voorkeur heeft: iedere oplossing in de set scoort immers beter dan een andere op minstens één doelstelling.

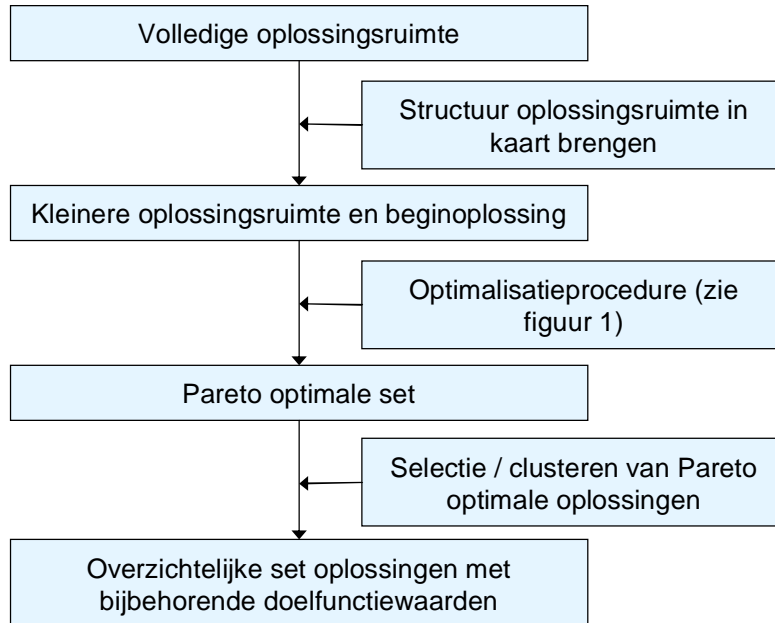
Daarnaast wordt dit probleem gezien als een bi-level probleem. Dat wil zeggen dat het probleem twee niveau's heeft: in het upper-level bepaalt de overheid / netwerkbeheerder hoe het netwerk er uit ziet: deze optimaliseert systeemdelen. In het lower-level bepalen de individuele reizigers hoe het systeem wordt gebruikt. Zij optimaliseren ieder in hun eigen belang, waardoor het eerder genoemde gebruikersevenwicht ontstaat. De netwerkbeheerder optimaliseert dus het netwerk, terwijl hij weet dat de individuele gebruikers volgens gebruikersevenwicht zullen reageren op een nieuw netwerk.

De omvang van de oplossingsruimte groeit exponentieel met het aantal variabelen, dus als een case van realistische omvang wordt genomen, is deze erg groot. Vanwege de enorme omvang is het niet mogelijk om met zekerheid het globale optimum te vinden. Daarom is het nodig een heuristisch te gebruiken om de oplossing van het probleem te benaderen. Zelfs als een heuristisch wordt toegepast, worden er grote rekentijden verwacht. Om de rekestijd acceptabel te houden, wordt de strategie in figuur 2 gevolgd. Hierin worden eerst enkele rekenexercities gedaan om de structuur van de oplossingsruimte duidelijker te krijgen. Hier moet uit volgen hoe de verschillende doelfuncties met elkaar samenhangen (of ze elkaar tegenwerken of versterken), zodat vooraf doelstellingen gecombineerd kunnen worden tot een kleiner aantal doelstellingen. Daarnaast wordt een indruk opgedaan in welke richting de oplossing zich bevindt, wat er toe moet leiden dat delen van de oplossingsruimte vooraf kunnen worden uitgesloten. Bij deze rekenexercities kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het indelen van de oplossingsruimte in partities, het optimaliseren naar slechts een doelstelling of het groeperen van variabelen.

Daarna kan de optimalisatieprocedure uit figuur 1 worden uitgevoerd. Voor de optimalisatiemethode zijn in de literatuur verschillende mogelijkheden beschikbaar. Er bestaan verschillende vormen van genetische algoritmes die kunnen omgaan met meerdere doelstellingen (NSGA-II (Deb et al., 2002), SPEA+ (Fieldsend et al., 2001)). Voordeel hiervan is dat ze niet in een lokaal minimum vast kunnen komen te zitten en dat het niet nodig is een buurruimte te definiëren. Nadeel is dat ze een grote willekeurige component hebben, waardoor je beperkt gebruik maakt van de structuur van het probleem. Uitgebreidere beschrijving van de werking van genetische algoritmes is te vinden in (Wismans et al., 2009). Methodes als Simulated Annealing (Fan and Machemehl, 2006) en Tabu search (Fan and Machemehl, 2008) gebruiken wel die structuur van het probleem om een volgende oplossing te selecteren. Deze twee methodes gebruiken een buurruimte die door de gebruiker gedefinieerd dient te worden. Deze kan bijvoorbeeld gekoppeld zijn aan de geografische ligging van met de variabelen overeenkomstige infrastructuurontwikkelingen. Deze methodes kunnen in een lokaal minimum terecht komen, maar bevatten mechanismes die hier mee om kunnen gaan: ze kunnen ook weer uit een lokaal minimum ontsnappen. Het resultaat van het optimalisatieproces is een zogenaamde Pareto Optimale Set.

Waarschijnlijk bestaat de verkregen Pareto Optimale Set uit te veel oplossingen om aan een beleidsmaker te presenteren. Deze zal behoefte hebben aan een verdere inperking

van mogelijke beleidsopties. In de literatuur zijn een clusteringtechniek en enkele selectiemethoden gevonden (Taboada et al., 2007) die zullen worden toegepast om te komen tot een beleidsmatig behapbaar aantal mogelijke oplossingsrichtingen.



Figuur 2: Implementatiestrategie optimalisatieproces

Tenslotte zal worden bekeken hoe robuust de oplossingsrichtingen zijn voor de input van het model, door bijvoorbeeld onderzoek te doen naar de volgende vragen. Komen de zelfde oplossingsrichtingen naar voren bij een toekomstige verkeersvraag van een ander WLO scenario? Wat gebeurt er bij een kleiner beschikbaar budget? Wat gebeurt er als een andere combinatie van doelstellingen wordt gebruikt?

3.2 Selectie van doelstellingen

In dit stadium van het onderzoek is nog geen selectie gemaakt van te onderzoeken doelstellingen. Wel is hieronder een overzicht gegeven van de mogelijke doelstellingen aan de hand van de drie poten van duurzaamheid (people, planet, prosperity), gerelateerd aan bereikbaarheidsproblematiek.

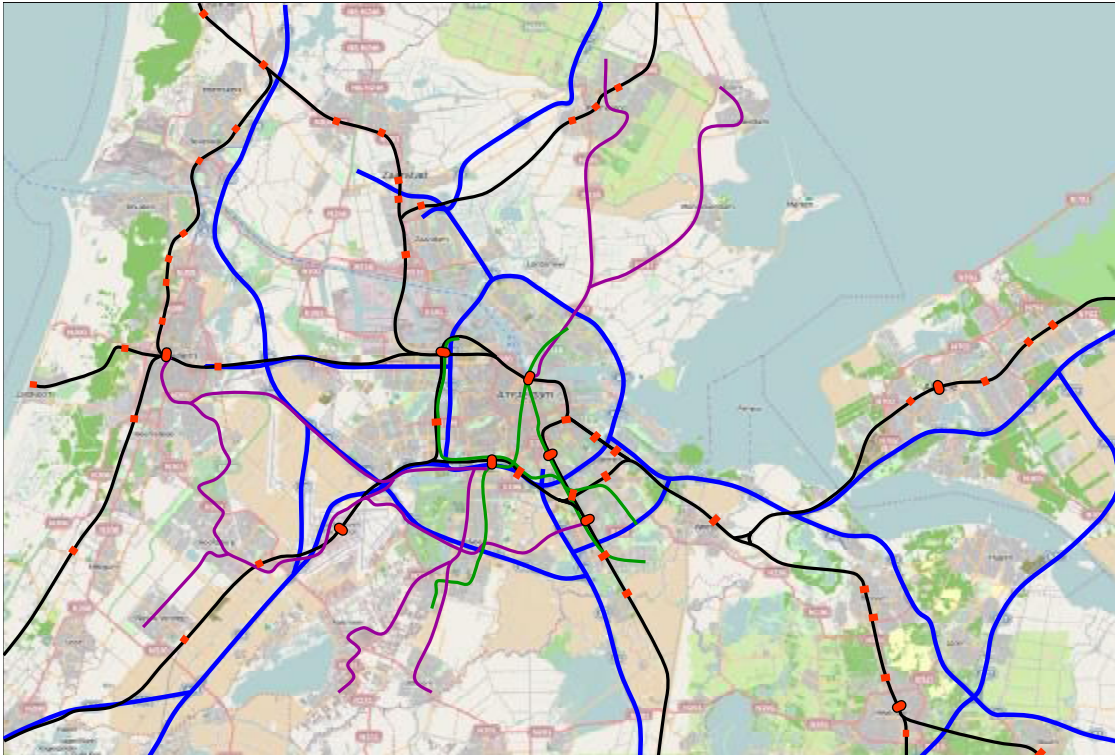
- Planet: milieubelasting
 - CO₂ uitstoot
 - Energiegebruik
 - Locale vervuilers als NO_x, fijnstof
- People: leefbaarheid
 - Verkeersveiligheid
 - Externe veiligheid
 - Ruimtelijke kwaliteit (vooral in steden)
 - Geluidsoverlast
- Prosperity: bereikbaarheid
 - Gemiddelde reistijd in het systeem

- Aantal arbeidsplaatsen / inwoners dat binnen een gestelde tijd te bereiken is
- Investeringskosten, onderhoudskosten, exploitatiekosten (publiek geld)
- Reistijdverlies bij vertraging

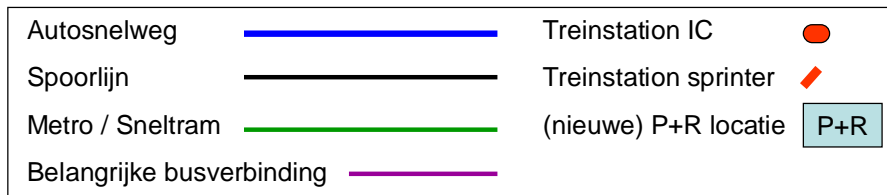
Een selectie van deze doelstellingen wordt opgenomen in de optimalisatieroutine. Andere van deze doelstellingen kunnen worden opgenomen als randvoorwaarde. Tenslotte is het mogelijk meerdere deeldoelstellingen te clusteren tot een gecombineerde doelstelling. Sommige van deze maten zijn eenvoudig te berekenen vanuit de (toegedeelde) netwerkgegevens, zoals de gemiddelde reistijd in het netwerk. Daarnaast zijn externaliteiten van het openbaar vervoer veelal niet afhankelijk van het gebruik van het systeem, maar van de hoeveelheid OV die wordt aangeboden en zijn dus ook relatief eenvoudig te bepalen. Naar andere maten is eerder onderzoek gedaan. (Wismans et al., to be published) geeft bijvoorbeeld een overzicht van externaliteiten van het autoverkeer. Voor het OV zijn verschillende bereikbaarheidsmaten bekend (Curtis and Scheurer, 2010).

4. Mogelijk resultaat: voorbeelden van extreme scenario's

Nadat de ontwerptimalisatieprocedure is uitgevoerd, zullen daar voor de specifieke case optimale netwerken uitkomen. Hoe deze netwerken er uit gaan zien is op dit moment nog niet bekend, maar hieronder staan wel enkele mogelijke uitkomsten voor de case Metropoolregio Amsterdam. Elk van de onderstaande scenario's is een extreme richting een bepaalde beleidsrichting, die tot stand kan komen als er extra randvoorwaarden aan het probleem worden toegevoegd. Er wordt dan geoptimaliseerd binnen een deelgebied van het oorspronkelijke toegestane gebied. Hierdoor worden de potenties van deze beleidsrichting in kaart gebracht. In de uiteindelijke optimalisatie in de volledige oplossingsruimte zal het optimale netwerk waarschijnlijk uitkomen op een combinatie van onderstaande maatregelen. In figuur 3 is het referentienetwerk weergegeven, daarna komen achtereenvolgens een P+R scenario, een sprintersscenario en een scenario nieuwe infrastructuur aan bod.



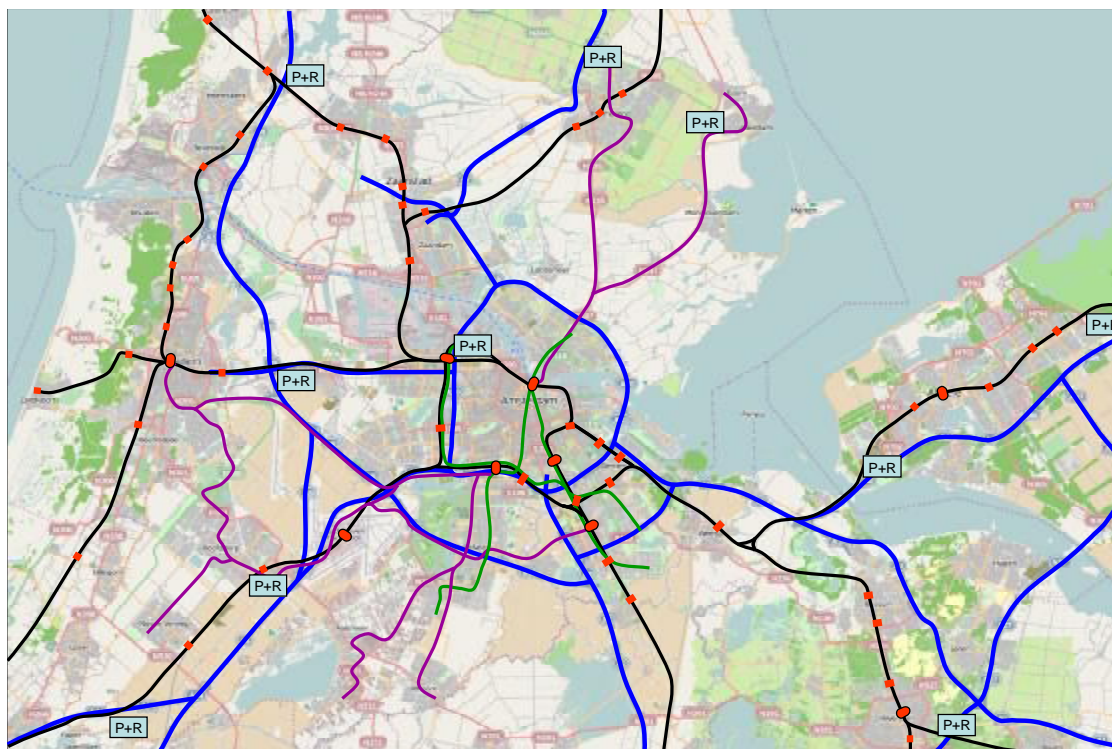
Figuur 3: referentiesituatie



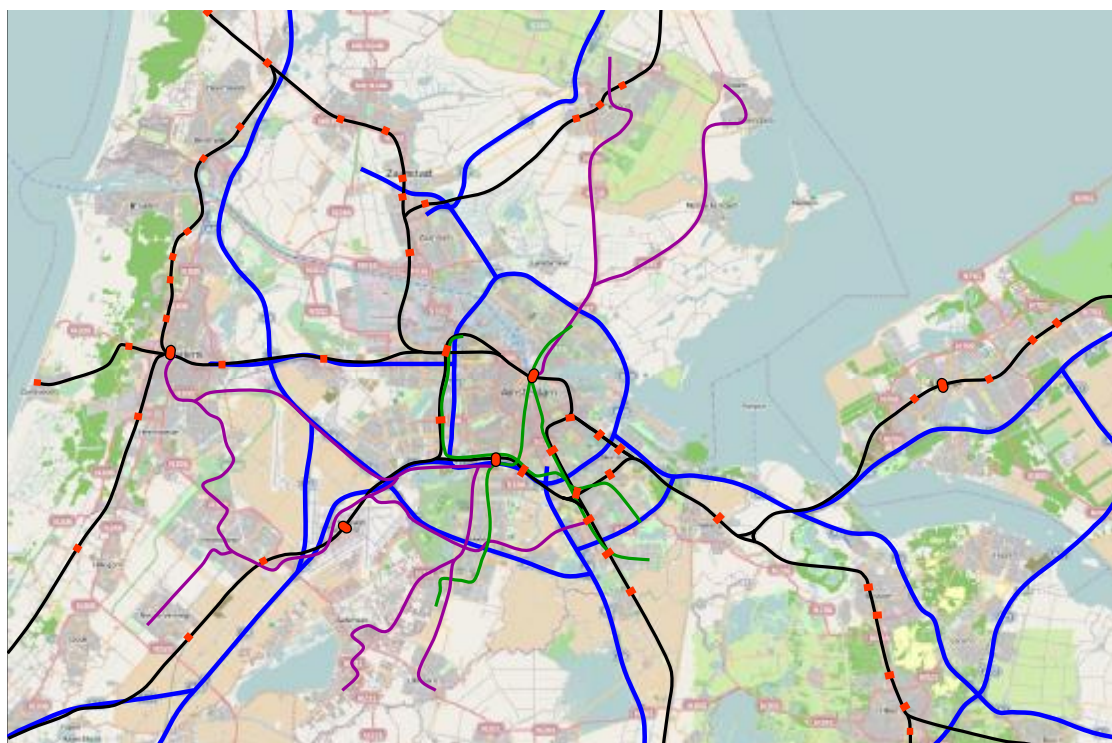
Figuur 4: legenda bij de kaarten

4.1 P+R scenario

In dit scenario is het op een groot aantal locaties mogelijk om over te stappen van het autonetwerk (of eventueel fietsnetwerk) naar het openbaar vervoer netwerk. De locaties zijn zodanig gekozen dat deze in de buurt liggen van het hoofdwegennet (meestal snelweg) en ook in de buurt liggen van een OV halte. Voor de OV halte kan dat een bestaande halte zijn, maar ook een nieuw te bouwen station. In het laatste geval betekent dat dus dat bestaande OV diensten iets langzamer zullen worden, ten bate van de P+R voorziening. In het voorbeeld voor Metropoolregio Amsterdam zijn alleen de nieuwe P+R voorzieningen weergegeven. Deze voorzieningen zijn op plaatsen gerealiseerd waar OV en hoofdwegen dicht bij elkaar komen en waar eventueel ruimte is voor een voorziening. Als er nog geen station aanwezig was, is bijbehorende sprinterstation is opgenomen op de kaart.



Figuur 5: P+R scenario



Figuur 6: sprintersscenario

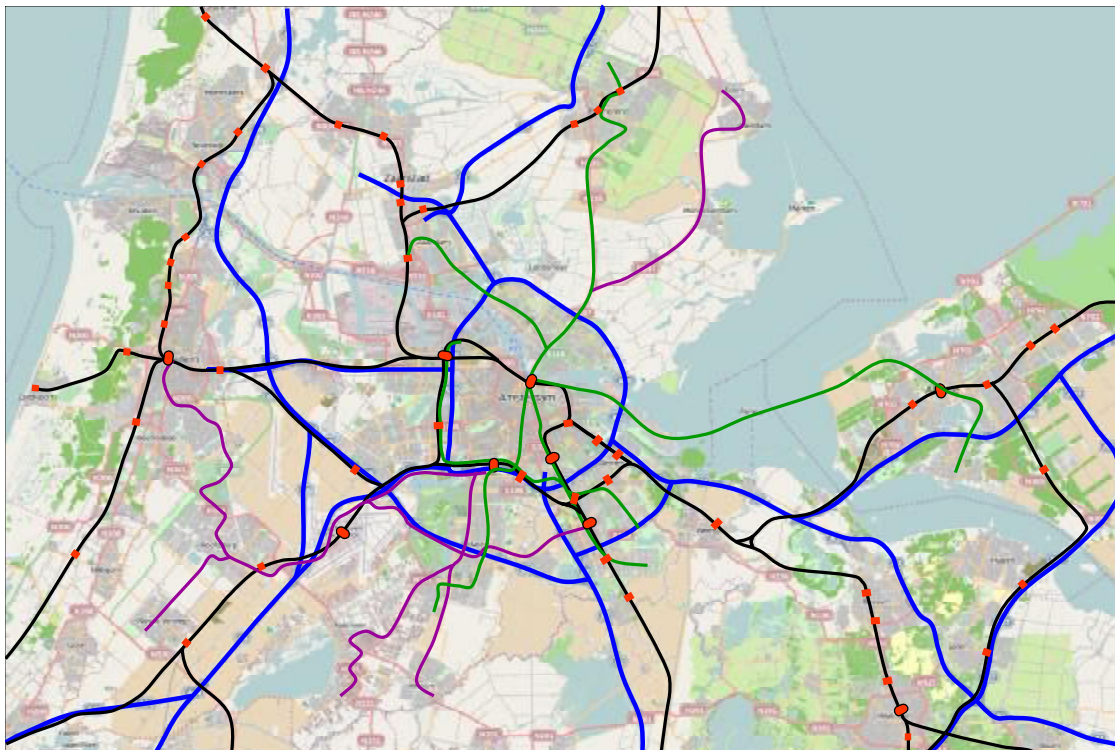
4.2 Sprinter scenario

In dit scenario wordt zwaar ingezet op de sprinters: deze zullen hoge frequenties krijgen en meer rechtstreekse verbindingen. Een ander voordeel hiervan is dat de intercity's op

minder stations hoeven te stoppen, waardoor deze sneller worden. Enkele mogelijke nieuwe railverbindingen worden meegenomen in de optimalisatieroutine, dus wellicht worden er bij een dergelijk scenario nieuwe sprinterverbindingen in gebruik genomen. In het voorbeeld voor Metropoolregio Amsterdam betekent dat alleen Amsterdam Centraal, Amsterdam Zuid, Schiphol, Haarlem en Almere overblijven als intercitystation.

4.3 Scenario nieuwe railinfrastructuur

Dit scenario heeft hoge investeringskosten en zal dus waarschijnlijk niet binnen het budget vallen. Toch wordt hier een indruk gegeven van hoe een dergelijk netwerk er uit zou kunnen zien, als maximaal wordt ingezet op nieuwe, kwalitatief hoogwaardige openbaar vervoer verbindingen. Het zal op vele relaties reistijden flink verkorten. Mogelijk zullen er voor dit scenario ook meer nieuwe overstapstations nodig zijn, waardoor sommige relaties door een extra halte iets langzamer worden. In het voorbeeld zijn zowel nieuwe treinverbindingen opgenomen als nieuwe metro / sneltram verbindingen.



Figuur 7: scenario nieuwe infrastructuur

5. Conclusie

De beoogde resultaten van dit onderzoek kunnen input zijn voor beleid in de Randstad: ze geven een optimale invulling van het netwerk, behorende bij een door doelstellingen gevormde beleidsstrategie. Het is daarmee mogelijk om meer te doen dan varianten door te rekenen: de beleidsdoelstellingen worden in het optimalisatieproces zo veel mogelijk nagestreefd, waardoor inzicht ontstaat in wat het maximaal haalbare is binnen de gestelde randvoorwaarden. Er ontstaat inzicht in hoe verschillende doelen met elkaar samenhangen en welk maatregelenpakket het meest effectief is.

Literatuur

- Benjamins, M., Lindveld, C. & Van Nes, R. 2001. Multimodal travel choice modelling: a supernetwork approach. *Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*.
- Carlier, K., Schrijver, J. & Catalano, S. 2005. TRANSFER, evenwichtsmodel voor het analyseren van ketenverplaatsingen. *Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*. Antwerpen.
- Curtis, C. & Scheurer, J. 2010. Planning for sustainable accessibility: Developing tools to aid discussion and decision-making. *Progress in Planning*, 53-106.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6, 182-197.
- Fan, W. & Machemehl, R. 2006. Using a simulated annealing algorithm to solve the transit route network design problem. *Journal of transportation engineering*, 132, 122.
- Fan, W. & Machemehl, R. 2008. A Tabu Search based heuristic method for the transit route network design problem. *Computer-aided Systems in Public Transport*, 387-408.
- Fieldsend, J., Everson, R. & Singh, S. 2001. Extensions to the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. *IEEE Trans. Evol. Comp*, 2001.
- Sheffi, Y. 1985. *Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods.*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
- Taboada, H., Baheranwala, F., Coit, D. W. & Wattanapongsakorn, N. 2007. Practical solutions for multi-objective optimization: An application to system reliability design problems. *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 314-322.
- Wismans, L., Berkum, E. C. & Bliemer, M. to be published. Modeling externalities using dynamic traffic assignment models: a review.
- Wismans, L. J. J., Berkum, E. C. & Bliemer, M. C. J. 2009. Optimaliseren van bereikbaarheid en externe effecten mogelijk met DVM? *Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*. Antwerpen.