

Ontwerp van stedelijke openbaar vervoer netwerken

**Herontwerp van het Utrechtse buslijnnet met
behulp van een genetisch algoritme**

Gijsbert van Eck
Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Afdeling Transport & Planning
E-mail : G.vaneck@tudelft.nl

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

Samenvatting

Ontwerp van stedelijke openbaar vervoer netwerken: herontwerp van het Utrechtse buslijnnet met behulp van een genetisch algoritme

Door de toenemende mobiliteit komt in veel steden de balans tussen bereikbaarheid, leefbaarheid en veiligheid steeds verder onder druk te staan. Steden zijn daarom gebaat bij sterk openbaar vervoer dat kan concurreren met de auto. Het beschikbare budget voor stedelijk openbaar vervoer is niet onbeperkt, daarom is een goed en efficiënt servicenetwerk belangrijk. In veel grote steden is het netwerk door de jaren heen historisch gegroeid. Aanpassingen en uitbreidingen zijn voornamelijk gebaseerd op kennis en ervaring, terwijl een goede theoretische grondslag vaak ontbreekt. De veronderstelling is dat binnen deze handmatig ontworpen netwerken ruimte voor verbetering aanwezig is. Deze paper beschrijft een mathematische ontwerpapplicatie die als ondersteuning kan dienen bij het (her)ontwerpen van stedelijke openbaar vervoer netwerken. De achterliggende doelstelling is om de rekenkracht van computers zo optimaal mogelijk te combineren met de kennis van ontwerpers.

De gepresenteerde ontwerpmethodologie bestaat uit twee stappen. In de eerste stap stelt de ontwerper handmatig een set kandidaat-lijnen samen. Dit zijn alle lijnen die in het netwerk kunnen worden opgenomen. Behalve de routevoering krijgt elke lijn een lijntype mee. Daarnaast bepaalt de ontwerper per lijntype een constante halteafstand. Tenslotte wordt een doelstellingsfunctie opgesteld waaraan netwerken tijdens het ontwerpen worden getoetst. Behalve kosten en opbrengsten, speelt de kwaliteit vanuit reizigersperspectief een belangrijke rol. Daarom wordt voorafgaand aan elke beoordeling het reizigersgedrag met betrekking tot vervoerswijze-, route- en lijnkeuze gemodelleerd. Als tweede stap wordt een optimalisatiealgoritme toegepast om de optimale combinatie van lijnen en bijbehorende frequenties te selecteren. Vanwege de complexiteit van de optimalisatieopgave is het niet mogelijk een exacte methode toe te passen. Er is daarom voor een genetisch algoritme gekozen. Dit is een benaderingsalgoritme dat op een efficiënte wijze het optimale netwerk ontwerp benadert.

De operationele ontwerpapplicatie is toegepast om een aantal nieuwe busnetwerken voor de stad Utrecht te ontwerpen. Hiervoor zijn varianten opgesteld. De kandidaat-lijnen set van een variant bestaat alleen uit lijnen die qua functie aansluiten bij een vooraf gekozen netwerkstructuur. Uit de resultaten komt naar voren dat de variant waarbij zo min mogelijk beperkingen aan de netwerkstructuur zijn opgelegd het beste scoort. De geschatte toename van het aantal reizigers en reizigerskilometers bedraagt respectievelijk 4,5 en 7,5 procent. Van de varianten met een duidelijke netwerkstructuur voldoet het radiale netwerk, aangevuld met enkele tangenten, het beste aan de doelstelling. Verder blijkt dat de gewogen reistijd van deur tot deur afneemt als ten opzichte van het huidige netwerk voor een lagere halte-, netwerk- en lijndichtheid wordt gekozen.

1. Introductie

Door de toenemende mobiliteit komt op veel plaatsen de balans tussen bereikbaarheid, leefbaarheid en veiligheid steeds meer onder druk te staan. In veel grote steden zorgt het autoverkeer voor congestie, een slechte luchtkwaliteit en onveilige verkeerssituaties. Openbaar vervoer heeft per reiziger een minder belastend effect op bereikbaarheid en milieu. Dit is voor veel overheden een reden om in te zetten op sterker openbaar vervoer. In de praktijk hebben verantwoordelijke overheden hiervoor meestal maar een beperkt budget beschikbaar. Het is daarom belangrijk dit budget optimaal te benutten door het openbaar vervoer in een stad zo efficiënt mogelijk in te richten. In het bijzonder het ontwerpen van het service netwerk verdient hierbij aandacht. Als gevolg van het aantal ontwerpvariabelen en het heterogene verplaatsingspatroon in veel steden is dit een complex optimalisatieprobleem.

In veel steden is het bestaande netwerk historisch ontwikkeld. Dit wil zeggen dat het netwerk door de jaren heen langzaam met de stad is meegegroeid. Bij uitbreiding van de stad of aanleg van nieuwe infrastructuur zijn aanpassingen gedaan op basis van ervaring en kennis van het bestaande netwerk en de stad. In veel gevallen ontbreekt een theoretische onderbouwing. Gezien de complexiteit van het ontwerpprobleem wordt verondersteld dat binnen handmatig ontworpen stedelijke openbaar vervoer netwerken voldoende ruimte voor verbetering aanwezig is. Deze paper beschrijft een mathematische ontwerppapplicatie die als ondersteuning kan dienen bij het (her)ontwerpen van stedelijke openbaar vervoer netwerken. Het zo optimaal mogelijk combineren van de rekenkracht van computers en de kennis van ontwerpers is hierbij de achterliggende doelstelling. Het gebruik van een rekenapplicatie maakt het mogelijk om op een efficiënte en snelle manier naar een optimaal netwerk te zoeken en daarbij netwerkontwerpen kwantitatief te beoordelen. De ontwerper kan op basis van zijn ervaring het optimalisatieproces versnellen en beheersbaar houden.

Deze paper is als volgt opgebouwd: paragraaf 2 beschrijft de ontwerpogave. In paragraaf 3 wordt de toegepaste ontwerpmethodiek gepresenteerd. Voor het ontwerpen is een benaderingsalgoritme toegepast. Dit optimalisatiealgoritme is beschreven in paragraaf 4. Om tijdens de optimalisatie netwerken volledig te kunnen beoordelen, is kennis van het reizigersgedrag nodig. De modellering van dit reizigersgedrag is onderwerp van paragraaf 5. De paragrafen 6 en 7 beschrijven de toepassing van de gepresenteerde ontwerppapplicatie om een nieuw buslijnnennet voor de stad Utrecht te ontwerpen. Deze paper sluit af met de conclusie en referenties.

2. De ontwerpogave

Voorafgaand aan het ontwerpen is het essentieel om een goede doelstelling te formuleren. Deze doelstelling kan vertaald worden in een doelstellingsfunctie om netwerken mee te beoordelen. Deze paragraaf benoemt eerst de belangrijkste elementen van een goede doelstellingsfunctie en definieert vervolgens de netwerkvariabelen die worden meegenomen in het ontwerpproces.

2.1 Doelstelling

Bij het formuleren van een doelstelling moet in de eerste plaats rekening worden gehouden met de verschillende belangen van reizigers en vervoersbedrijven. Reizigers willen bij voorkeur zo snel mogelijk reizen tussen hun herkomst- en bestemmingsadres. Vanuit het perspectief van de vervoerder is de verhouding tussen inkomsten en uitgaven

belangrijk. Deze verhouding wordt bepaald door de exploitatiekosten en de inkomsten uit betalende reizigers. Een goede doelstelling houdt daarom rekening met zowel de kwaliteit van het netwerk (reizigersperspectief) als de kosten en opbrengsten van de exploitatie (vervoerdersperspectief). In Van Nes (2002) worden een aantal veel toegepaste doelstellingsfuncties onderscheiden: het minimaliseren van de totale kosten gegeven een vast aantal reizigers, maximaliseren van het aantal reizigers binnen een beperkt budget of welvaartsmaximalisatie. Een andere methode om netwerken te beoordelen is het toepassen van een multi-criteria analyse. Het voordeel hiervan is dat eenvoudig extra beoordelingscriteria meegenomen kunnen worden.

In de tweede plaats hebben reizigers ook onderling verschillende belangen. Een openbaar vervoer netwerk kan beschreven worden met een aantal geaggregeerde kenmerken zoals haltedichtheid (aantal haltes per km²), netwerkdichtheid (aantal km ov-infrastructuur per km²), lijndichtheid (aantal km ov-lijn per km²), frequentie en voertuigsnelheid. Deze netwerkkenmerken hebben zowel invloed op de exploitatiekosten als op de kwaliteit van het netwerk. De genoemde kenmerken kunnen meerdere reistijdelementen (voor- en natransport, wachttijd, rijtijd en overstaptijd) beïnvloeden. Netwerkkenmerken die voor de ene reiziger voordelig zijn, kunnen voor andere reizigers leiden tot een toenemende reistijd. Dit is door Egeter (1993) vertaald in een aantal ontwerpdilemma's:

- Haltedichtheid: Een grotere halteafstand betekent over het algemeen een toenemende voor- en natransporttijd. Daar staat tegenover dat voertuigen minder vaak halteren, waardoor de exploitatiesnelheid toeneemt.
- Netwerkdichtheid: Als de afstand tussen lijnen onderling groot is, leidt dit tot een grotere voor- en natransporttijd. Het totale aantal lijnen is echter kleiner. Als er sprake is van een gelimiteerd budget, kunnen per lijn meer voertuigen ingezet worden. Deze hogere frequentie zorgt voor kortere wachttijden.
- Lijndichtheid: Als veel bestemmingen direct met elkaar verbonden zijn, hoeft er relatief weinig te worden overgestapt. Veel directe verbindingen betekent echter ook veel verschillende lijnen. Gegeven een beperkt budget zal de frequentie per lijn minder hoog zijn en de gemiddelde wachttijd groter.

Het hangt van het verplaatsingspatroon en de geformuleerde kwaliteitsdoelstelling af wat de optimale waarden voor de genoemde netwerkkenmerken zijn. Uiteindelijk is het aan de reizigers om wel of geen gebruik te maken van het netwerk. Voor een volledige beoordeling van een netwerk, waarbij rekening gehouden wordt met de vervoersprestatie, is daarom een inschatting van het reizigersgedrag (aantal reizigers of reizigerskilometers) nodig.

2.2 Ontwerpvariabelen

Om realistische stedelijke netwerken te ontwerpen, is het niet voldoende om alleen geaggregeerde netwerkkenmerken te bepalen. Tijdens het ontwerpproces is het verplaatsingspatroon maatgevend. Omdat dit patroon niet gelijkmatig is verdeeld over de stad, zullen netwerkkenmerken locatieafhankelijk moeten zijn. Daarnaast bepaalt de bestaande infrastructuur voor een groot deel de netwerkdichtheid die mogelijk is. Het ontwerpen gebeurt daarom op lijnniveau in plaats van op netwerkniveau. Geaggregeerde netwerkeigenschappen volgen na het ontwerpproces uit het ontworpen netwerk. De lijngebonden ontwerpvariabelen zijn:

- Lijnvoering: De set lijnen waaruit het netwerk is opgebouwd en hun route door de stad. Samen bepalen deze lijnen de netwerk- en lijndichtheid van het netwerk.

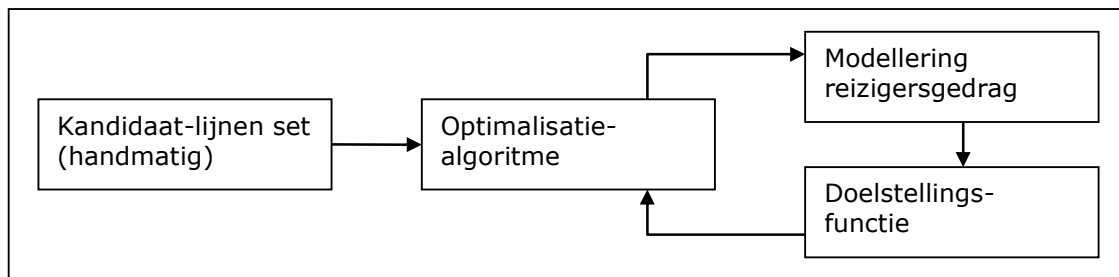
- Lijntype: Drie lijntypen zijn onderscheiden: stadslijnen, expreslijnen en zonelijnen. Stadslijnen hebben een kleine halteafstand, hun belangrijkste functie is om stadsdelen zo goed mogelijk te ontsluiten. Expreslijnen hebben een grote halteafstand en zijn geschikt voor snelle verplaatsingen tussen twee locaties. Zonelijnen vormen een combinatie van bovengenoemde lijntypen. In buitenwijken heeft dit type lijnen een kleine halteafstand om deze gebieden te ontsluiten. Vervolgens lopen zonelijnen met een grotere halteafstand door naar de binnenstad.
- Halteafstand: Dit is de afstand tussen haltes op een lijn. Samen met de lijnvoering bepaalt de halteafstand de gemiddelde haltedichtheid in het netwerk. Er is aangenomen dat de afstanden tussen haltes op een lijn(deel) constant zijn.
- Frequentie: De frequentie waarmee een lijn bediend wordt, heeft invloed op de wacht- en overstaptijd en bepaald de capaciteit van de vervoerslijn.

3. Ontwerpmethodiek

Met de genoemde ontwerpvariabelen is een nagenoeg oneindig aantal netwerken mogelijk. Op basis van logica kan een groot deel van deze netwerken worden uitgesloten. Daarom is gekozen voor een methode waarbij de ontwerper vooraf het aantal mogelijkheden beperkt om gericht naar een optimaal netwerk te zoeken. In de volgende subparagrafen zijn de twee stappen van de voorgestelde ontwerpmethodiek beschreven. De toegepaste methodiek is schematisch weergegeven in figuur 1.

3.1 Handmatige invoer door de ontwerper

Over de infrastructuur van een stad is een nagenoeg oneindig aantal routes voor buslijnen mogelijk. Het merendeel van deze routes is niet logisch of relevant. Daarom wordt door de ontwerper een set met kandidaat-lijnen opgesteld. Dit zijn alle lijnen die opgenomen kunnen worden in het uiteindelijke netwerkontwerp. De ontwerper bepaalt de route en geeft elke lijn één van de drie lijntypes mee. Omdat het lijntype veel zegt over de functie van een lijn, kan de ontwerper het ontwerpproces hiermee gericht sturen. Tenslotte bepaalt de ontwerper vooraf per lijntype een constante halteafstand. Als de halteafstand in het optimalisatieproces vrij is, zal dit niet leiden tot een duidelijk onderscheid tussen de verschillende lijntypen. Om een helder netwerk te ontwerpen, is het verstandiger de halteafstand per lijntype als netwerkvariabele te beschouwen. Wel kan de ontwerpmethodiek meerdere keren met verschillende halteafstanden worden toegepast om op die manier het effect van de gekozen halteafstanden in kaart te brengen. In de kandidaat-lijnen set zijn dus de lijnvoering, de lijntypen en de halteafstanden meegenomen. De laatste variabele is de frequentie. De frequentie heeft invloed op de reistijd, maar bepaalt ook de capaciteit van een verbinding. De frequentie moet daarom per lijn bepaald worden en is een lijnvariabele die wordt meegenomen in het optimalisatieproces.



Figuur 1 – Schematische weergave van de ontwerpmethode

3.2 Het optimalisatieproces

De tweede stap is het optimalisatieproces. Hierin wordt voor elke lijn bepaald of deze opgenomen moet worden in het netwerk en met welke frequentie. Dit betekent dat gezocht wordt naar de combinatie van lijnen uit de kandidaat-lijnenset die met een bepaalde frequentie per lijn het best aan de vooraf gestelde doelstelling voldoet. Het optimalisatieproces kan beschouwd worden als een bi-level probleem. Op het bovenste niveau wordt het netwerk ontworpen. Netwerkontwerpen kunnen worden getoetst aan de doelstellingsfunctie en op basis hiervan worden aangepast. Voor deze beoordeling zijn in ieder geval kosten, opbrengsten en een maat voor de netwerkqualiteit nodig. Opbrengsten en, afhankelijk van de formulering, netwerkqualiteit zijn afhankelijk van het aantal reizigers dat gebruik maakt van het openbaar vervoer. Daarom is het noodzakelijk het keuzegedrag van reizigers te modelleren. Dit is het onderste niveau van het bi-level probleem. Op dit niveau maken reizigers keuzes met betrekking tot bestemming, tijdstip en route. Tijdens het optimalisatieproces wordt daarom steeds het reizigersgedrag gemodelleerd voor tussenontwerpen. Aan de hand van de resultaten worden deze netwerken beoordeeld. Het toegepaste optimalisatiealgoritme is beschreven in paragraaf 4 en de modellering van het reizigersgedrag in paragraaf 5. De eerste stap, waarin de ontwerper een kandidaat-lijnenset samenstelt, komt aan bod in de case study.

4. Optimalisatiealgoritme

In de literatuur zijn verschillende optimalisatietechnieken beschreven voor toepassing bij het ontwerpen van openbaar vervoer netwerken. Guihaire en Hao (2008) geven hiervan een overzicht. Door de omvang van de opgave is het zonder grote vereenvoudigingen niet mogelijk om op analytische wijze het optimale netwerk te vinden binnen een acceptabele rekentijd. Er is daarom voor gekozen om een benaderingsalgoritme toe te passen. Benaderingsalgoritmen proberen de optimale oplossing op een efficiënte manier zo dicht mogelijk te benaderen.

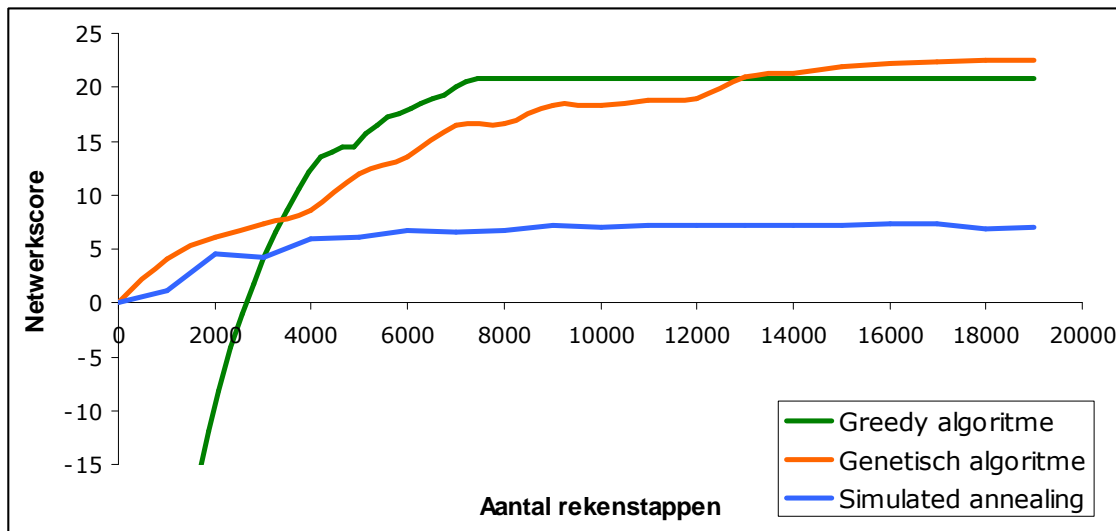
4.1 Benaderingsalgoritmen

Binnen dit onderzoek zijn drie methoden uit de literatuur met elkaar vergeleken:

1. Genetische algoritmen zijn gebaseerd op de theorie van natuurlijke selectie. Deze door Charles Darwin geïntroduceerde theorie beschrijft het mechanisme dat in de natuur evolutie veroorzaakt. Eigenschappen met een positief effect op de overlevingskans van een soort worden vaker overgedragen op volgende generaties. Dit principe kan ook worden toegepast om vanuit een initiële set openbaar vervoer netwerkontwerpen steeds nieuwe generaties van netwerken te genereren met betere eigenschappen. Bieli et al. (2000) geven een toepassing van deze methode.
2. Simulated Annealing is een algoritme dat gebaseerd is op een proces dat wordt toegepast in de metaalbewerking. In dit proces van verhitting en gecontroleerd afkoelen, neemt de bewegingsvrijheid van atomen langzaam af totdat de atoomstructuur volledig vast zit. Net als bij het genetische algoritme is ook dit principe toepasbaar voor het ontwerpen van netwerken. De afnemende 'temperatuur' zorgt ervoor dat de ruimte waarin naar een oplossing gezocht wordt steeds verder afneemt. Een voorbeeld hiervan is uitgewerkt door Fan en Machemehl (2006).
3. Greedy algoritmen verdelen het probleem op in losse stappen. In het geval van het selecteren van lijnen uit een lijnenset en het toewijzen van frequenties, begint het greedy algoritme met een lijnennet waarin alle frequenties op nul zijn gesteld. In elke stap wordt op één van de lijnen de frequentie met één stap verhoogd. Deze verhoging

wordt doorgevoerd op de lijn waar het positieve effect op de doelstellingsfunctie het grootst is. Er wordt geen rekening gehouden met het effect van deze keuze op latere stappen. Van Nes et al. (1988) geven een voorbeeld van een greedy algoritme.

Deze drie algoritmen zijn vergeleken op basis van de complexiteit van de doelstellingsfunctie die mogelijk is, de benodigde rekestijd en het vermogen om lokale optima te vermijden. Hiervoor zijn alle methoden toegepast op hetzelfde ontwerpprobleem, namelijk het Utrechtse buslijnnet. Details van deze toepassing zijn beschreven in de case study (paragraaf 6). De score van het beste netwerk tijdens het optimalisatieproces is in figuur 2 uitgezet tegen het aantal rekenstappen dat nodig was om deze score te bereiken. Aan de resultaten is duidelijk te zien dat het genetische algoritme tot het best scorende netwerk leidt. Het simulated annealing algoritme blijft steken in een lokaal optimum dat beduidend minder goed scoort. Het greedy algoritme convergeert het snelst, maar kan minder goed omgaan met de complexe doelstellingsfunctie. Hierdoor blijft de score van het resulterende netwerk iets achter. In de case study zal daarom een genetisch algoritme worden toegepast.



Figuur 2 – Vergelijking van verschillende benaderingsalgoritmen

4.2 Het genetische algoritme

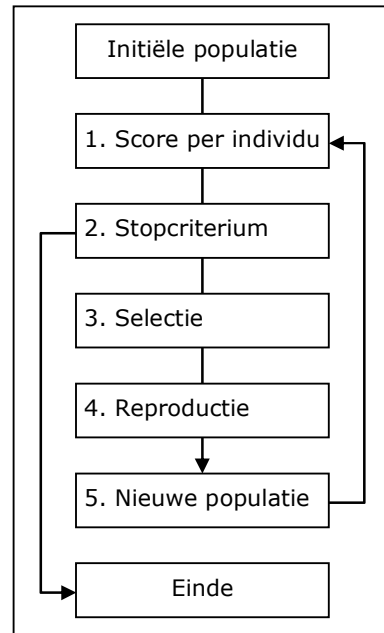
Elke kandidaat-lijn kan worden beschreven met twee variabelen: in de eerste plaats of de lijn wel (1) of niet (0) is opgenomen in het netwerk en ten tweede de frequentie van de lijn. Deze twee getallen worden genen genoemd. Elke kandidaat-lijn heeft twee genen. Als de genen van alle kandidaat-lijnen aan elkaar geplakt worden, ontstaat een chromosoom. Dit chromosoom beschrijft een volledig netwerk. Het genetische algoritme begint met een set van chromosomen, ofwel netwerken, die samen de initiële populatie vormen. Deze netwerken kunnen willekeurig gegenereerd zijn of specifiek ingevoerd door de ontwerper. Vervolgens doorloopt het algoritme iteratief de volgende stappen:

1. Beoordeling - Elk individu binnen de populatie wordt gewaardeerd door met behulp van de doelstellingsfunctie een score te berekenen.
2. Stopcriterium - Het algoritme stopt als aan een vooraf aangegeven stopcriterium wordt voldaan. Als dit niet het geval is, gaat het algoritme verder met stap 3.
3. Selectie - Uit de populatie worden op stochastische wijze een aantal 'ouders' geselecteerd. Goed scorende netwerken hebben hierbij een grotere kans om geselecteerd te worden.

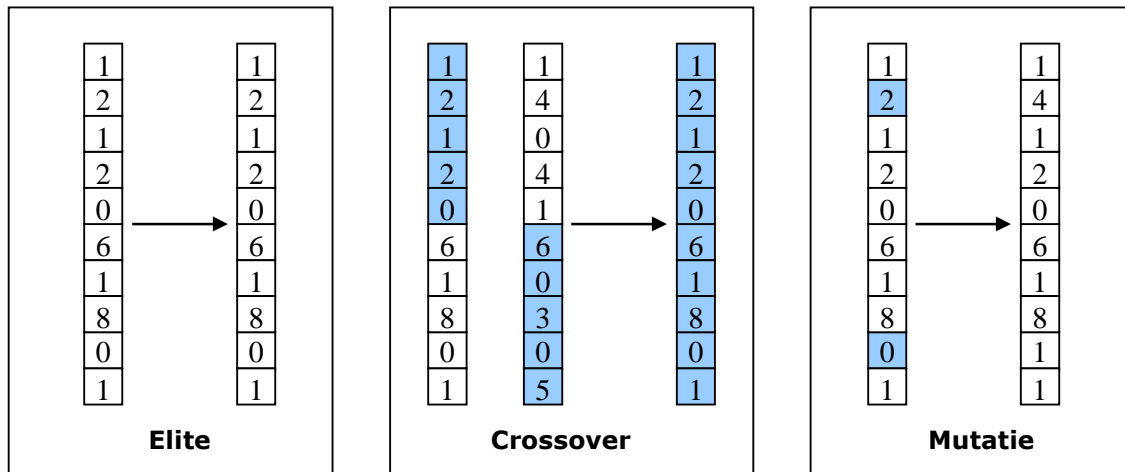
4. Reproductie - De geselecteerde netwerken worden gebruikt om 'nageslacht' te creëren. Dit gebeurt op drie manieren: Elite-individueen gaan rechtstreeks naar de volgende generatie, crossover is een methode waarbij twee 'ouders' gecombineerd worden en door mutatie worden willekeurig eigenschappen in geselecteerde netwerken aangepast (zie figuur 4).

5. Nieuwe populatie - De huidige generatie wordt vervangen door de nieuwe netwerken die zijn gecreëerd door middel van reproductie. Op deze manier wordt in elke stap een nieuwe populatie aan netwerken gecreëerd. Hierna begint het algoritme weer bij stap 1 waarin alle netwerken binnen de nieuwe generatie beoordeeld worden.

Figuur 3 geeft een overzicht van deze stappen. In elke iteratieronde wordt, vanuit de aanwezige oplossingen in een populatie, een nieuwe set oplossingen gegenereerd. Deze nieuwe populatie vervangt de vorige generatie. Goed scorende netwerken hebben een grotere kans om hun eigenschappen (lijnen en frequenties) over te dragen op volgende generaties. Hierdoor convergeert het beste netwerk ontwerp in opeenvolgende generaties uiteindelijk naar een netwerk dat het optimum benadert.



Figuur 3 – Stappenschema



Figuur 4 – De drie verschillende reproductiemethoden

5. Modelling van het reizigersgedrag

Tijdens het toepassen van het genetische algoritme worden constant netwerken beoordeeld. Het aantal reizigers dat gebruik zal maken van het netwerk vormt een belangrijke invoer voor deze beoordeling. Daarom moet voorafgaand aan een beoordeling het reizigersgedrag met betrekking tot vervoerswijze-, route- en lijnkeuze gemodelleerd worden.

5.1 Keuzeset generatie

Om het gedrag van reizigers te modelleren, is het als eerste noodzakelijk in beeld te brengen uit welke alternatieven reizigers kunnen kiezen. De alternatieven om per fiets of auto te reizen, worden als bekend verondersteld. Het beschouwde netwerk ontwerp

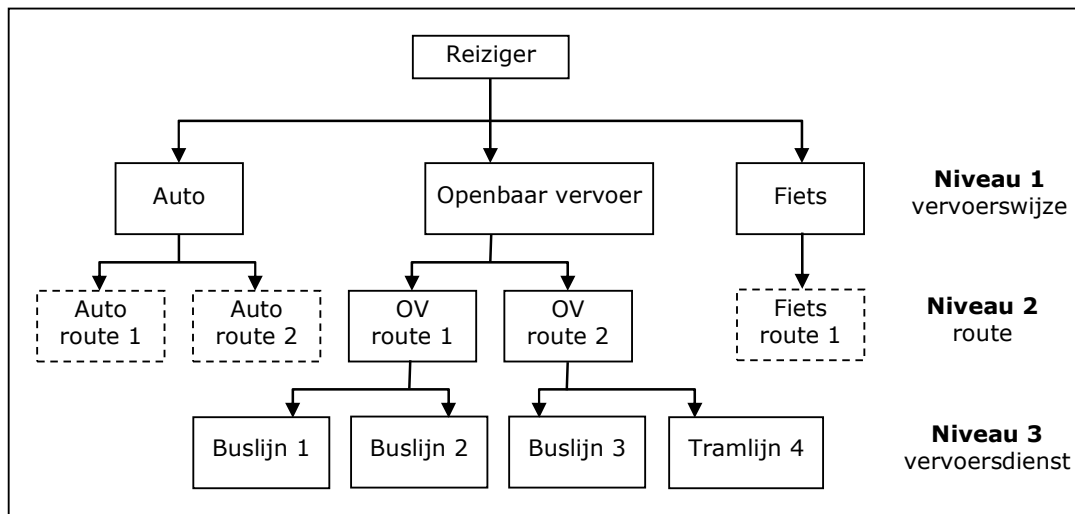
bepaalt welke alternatieven er zijn om met het openbaar vervoer te reizen. Daarom worden voor elke herkomst en bestemmingscombinatie de relevante reisalternatieven per openbaar vervoer geselecteerd. Samen vormen al deze alternatieven de keuzeset voor ov-reizigers. Voor het genereren van deze keuzeset wordt een branch & bound techniek toegepast, vergelijkbaar met de methoden van Friedrich et al. (2001) en Hoogendoorn-Lanser (2005). Hiervoor is het fysieke netwerk geschematiseerd tot een stelsel van knooppunten en schakels en is de beschouwde stad opgedeeld in zones. Verplaatsingen vanuit en naar zones zijn geconcentreerd in de zone-centra. Vervolgens worden de volgende stappen doorlopen:

1. Het netwerk wordt beschreven volgens de methode van De Cea en Fernandez (1993). Tussen elke twee knooppunten die direct (zonder overstap) met elkaar zijn verbonden per openbaar vervoer, wordt een verbinding aangebracht. Deze verbinding kan bestaan uit meerdere lijnen. Voor de eigenschappen (frequentie en rijtijd) van deze verbindingen worden geaggregeerde waarden bepaald.
2. Niet alle knooppunten in het netwerk zijn direct met elkaar verbonden. In de volgende stap worden directe verbindingen daarom met elkaar gecombineerd. Hierdoor ontstaan reisalternatieven met één of twee overstappen. Na deze stap kunnen meerdere verbindingen tussen knooppunten zijn ontstaan. Om alleen realistische alternatieven over te houden, worden alle verbindingen waarvan de gewogen reistijd (bestaande uit rij- en overstaptijd) een bepaald percentage boven de minimale gewogen reistijd ligt uit de keuzeset verwijderd.
3. De gevonden verbindingen worden vervolgens door voortransportschakels verbonden met de zone-centra. Op deze manier ontstaan volledige routes tussen zones. Opnieuw worden routes die niet concurrerend zijn op basis van de reistijd (ditmaal inclusief voor- en natransport en wachttijd) verwijderd uit de keuzeset.
4. Bij het modelleren van de routekeuze kan een grote overlap tussen alternatieven tot problemen leiden. Als twee alternatieven voor een groot deel over hetzelfde traject rijden en alleen verschillen in opstap- of overstap locatie, wordt daarom slechts één van beide routes in de definitieve keuzeset opgenomen.

Het resultaat is een set ov-routes met per herkomst en bestemmingscombinatie één of meerdere routes. Verder is van elke route de gewogen reistijd en de reiskosten bekend.

5.2 Keuzemodellering

De volgende stap is het verdelen van de verplaatsingen uit de (statische) herkomst-bestemmingsmatrix over de verschillende reisalternatieven. Een verplaatsing kan gemaakt worden met het openbaar vervoer, de auto of per fiets. Binnen deze vervoerswijzen zijn vaak weer verschillende routes en, in het geval van openbaar vervoer, vervoersdiensten mogelijk. Voor het modeleren van deze keuzes wordt een discreet keuzemodel toegepast. Het uitgangspunt is dat een individu aan elk reisalternatief een waardering toekent. Deze waardering wordt utiliteit genoemd en hangt af van de eigenschappen van het alternatief. Vervolgens kiest een individu het alternatief dat in zijn of haar beleving de hoogste utiliteit heeft. Meer specifiek is gekozen voor het logit keuzemodel zoals beschreven door Ben-Akiva (1985). Omdat het niet waarschijnlijk is dat alle eigenschappen die invloed uitoefenen op de utiliteit zijn meegenomen en verschillende individuen de alternatieven verschillend kunnen beoordelen, wordt voor elk alternatief een stochastische stoorterm aan de utiliteit toegevoegd. Het logit keuzemodel berekent vervolgens met behulp van een gesloten functie welk deel van de reizigers voor een bepaald alternatief kiest.



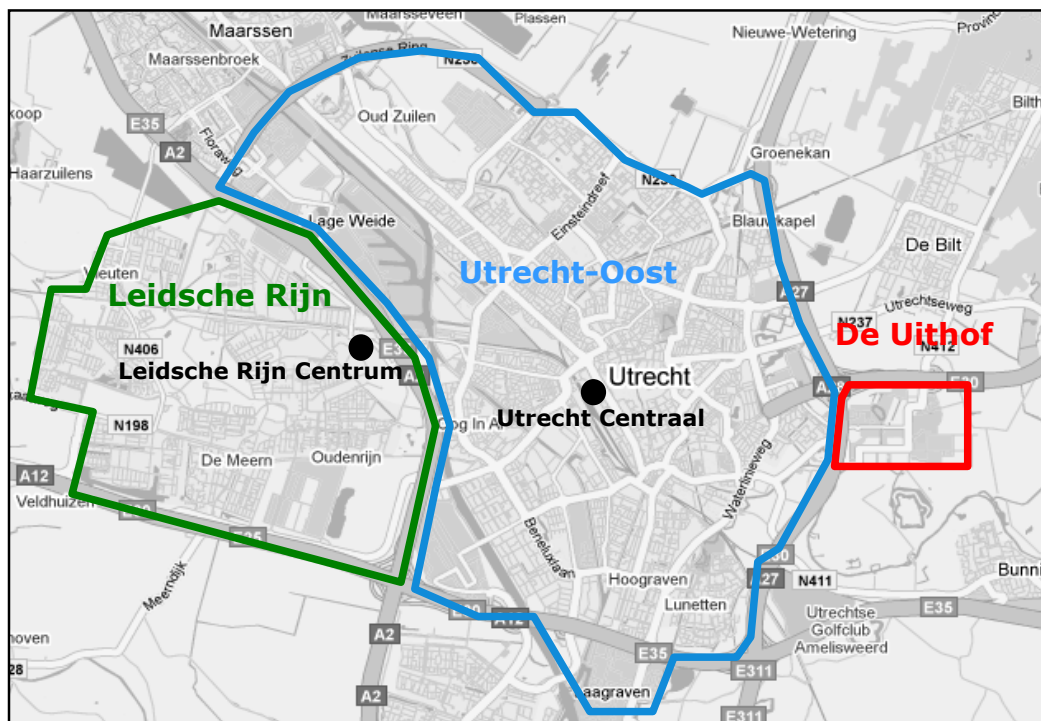
Figuur 5 – Het geneste keuzeproces van reizigers

Er is voor gekozen om de keuze van reizigers op te delen in drie niveaus. De opdeling in meerdere keuzeniveaus is een methode om rekening te houden met overlap tussen alternatieven. Het hoogste niveau is de vervoerswijzekeuze. Reizigers maken een keuze tussen het openbaar vervoer, de auto en de fiets. Deze keuze heeft betrekking op het dominante deel van een verplaatsing en niet op de vervoerswijze tijdens voor- en natransport. Voor deze keuze wordt de utiliteit van elke vervoerswijze bepaald op basis van reistijd, reiskosten, parkeergelegenheid en een vervoerswijzespecifieke factor. Per zonecombinatie kunnen meerdere routes met het openbaar vervoer aanwezig zijn. Daarom wordt een geaggregeerde utiliteit van het openbaar vervoer berekend voor dergelijke zonecombinaties. Na de vervoerswijzekeuze wordt voor ov-reizigers de keuze voor een route gemodelleerd. Overlap binnen de routeset zelf is zoveel mogelijk opgevangen door vooraf overlappende routes uit de keuzeset te verwijderen. De routekeuze wordt uitgevoerd op basis van reistijd en reiskosten. Voor zowel de keuze tussen vervoerswijzen als tussen routes wordt een logit keuzemodel toegepast. Op het laatste niveau, de keuze tussen vervoersdiensten (of lijnen), is geen logit keuzemodel toegepast. Hier zijn reizigers toegedeeld op basis van de frequentie van een vervoersdienst. Het volledige keuzeproces is weergegeven in figuur 5. Na de toedeling is precies bekend hoeveel reizigers gemiddeld gebruik maken van een bepaalde openbaar vervoersdienst.

6. Case study: Het Utrechtse buslijnnennet

Op basis van de beschreven theorie is een operationele ontwerppapplicatie ontwikkeld in het rekenprogramma Matlab. Deze ontwerppapplicatie is toegepast om een nieuw stedelijk buslijnnennet voor de stad Utrecht te ontwerpen. Met ongeveer 300.000 inwoners is Utrecht in omvang de vierde stad van Nederland. Figuur 6 op de volgende pagina toont de stad Utrecht. Voor het ontwerpen van een nieuw stadslijnnennet is het studiegebied opgedeeld in 170 zones: de stad Utrecht in 147 zones, de regio in 22 zones en het overige deel van Nederland in een aparte zone. Voor deze zones is het verplaatsingspatroon bepaald. Er is uitgegaan van het verwachte verplaatsingspatroon in 2020 gedurende de middagspits. Verder is aangenomen dat ov-reizigers met een herkomst of bestemming buiten de regio via Utrecht Centraal reizen. Vervolgens is de infrastructuur geschematiseerd tot een stelsel van knopen en schakels. Op een aantal

uitzonderingen na is als uitgangspunt genomen dat er alleen bussen mogen rijden op infrastructuur waar dit ook nu al het geval is. Bestaande treindiensten, busdiensten van en naar de regio en de aanwezige sneltram zijn als randvoorwaarde meegenomen. Tenslotte zijn gegevens over reistijd en kosten van auto- en fietsverplaatsingen overgenomen uit het huidige vervoersmodel (Verkeersmodel Regio Utrecht) dat de gemeente Utrecht gebruikt.



Figuur 6 – De stad Utrecht

6.1 Multi-criteria analyse

De gemeente Utrecht heeft een aantal subdoelstellingen voor het busnetwerk geformuleerd. De belangrijkste hiervan is dat meer mensen de auto thuis laten staan en gebruik gaan maken van het openbaar vervoer. Omdat het aantal reizigers gerelateerd is aan de gewogen reistijd, betekent dit dat kortere reistijden van deur tot deur aangeboden moeten worden. De tweede subdoelstelling is een toename van het aantal reizigerskilometers per openbaar vervoer. Hiervoor is geen onbeperkt budget beschikbaar, bij voorkeur moet het netwerk exploitatiebaar blijven binnen het bestaande budget. Verder is het wenselijk dat alle inwoners en bezoekers van de stad gebruik kunnen maken van het openbaar vervoer. Dit betekent dat de hele stad ontsloten moet worden. Als laatste is het belangrijk rekening te houden met de beperkte capaciteit van station Utrecht Centraal. Ook na realisatie van de geplande nieuwe openbaar vervoer terminal blijft het aantal bussen dat hier maximaal kan halteren beperkt. Deze subdoelstellingen zijn gecombineerd tot een doelstellingsfunctie door middel van een multi-criteria analyse. De gebruikte variabelen zijn uitgedrukt als een geschaalde verhoudingen tussen de eigenschappen van het netwerk ontwerp en het huidige netwerk. Bij het beoordelen van de kosten en het aantal bussen op Utrecht Centraal is er rekening mee gehouden dat extra (of grotere) bussen nodig zijn als de capaciteit kleiner is dan de vraag. De toegepaste multi-criteria analyse ziet er in formulevorm als volgt uit:

$$S_n = 0.15 \cdot RA_n + 0.15 \cdot RK_n + 0.3 \cdot K_n + 0.3 \cdot OR_n + 0.1 \cdot BC_n$$

Waarin:

S_n = Score netwerk n

RA_n = Maat voor het aantal reizigers dat gebruik maakt van netwerk n

RK_n = Maat voor het aantal reizigerskilometers dat in netwerk n wordt afgelegd

K_n = Maat voor de totale exploitatiekosten van netwerk n

OR_n = Aandeel onbediende reizigers in netwerk n

BC_n = Aantal bussen dat per uur op station Utrecht Centraal halteert

6.2 Varianten

Vooraf zijn een aantal ontwerpvarianten opgesteld die onderling verschillen in netwerkstructuur. In de bijbehorende kandidaat-lijnssets zijn alleen lijnen opgenomen die qua functie aansluiten bij de opzet van een variant. Er is voor deze aanpak gekozen om netwerken met een heldere structuur te ontwerpen. De verwachting is dat een dergelijk netwerk in de praktijk herkenbaarder zal zijn en meer wordt gewaardeerd door reizigers. Achteraf kunnen de ontworpen netwerken met elkaar vergeleken worden om de beste structuur te bepalen. De verschillende varianten zijn gebaseerd op de volgende netwerkstructuren:

1. Radiaal – Deze variant is volledig gericht op station Utrecht Centraal. Een radiale netwerkstructuur sluit aan bij de sterk radiaal gerichte vervoersvraag. De kandidaat-lijns set bevat alleen radiale en transversale lijnen die station Utrecht Centraal aandoen.
2. Radiaal plus enkele tangenten - Tangenten kunnen een deel van de ontsluiting van buitenwijken overnemen en locaties met een sterke vervoersrelatie verbinden buiten het centrum om. Tangenten ontzien bovendien de beperkte haltecapaciteit van Utrecht Centraal. Behalve radiale lijnen zijn bij deze variant daarom ook een aantal tangenten en ringlijnen in de kandidaat-lijnsset opgenomen.
3. Extra centrum Leidsche Rijn – De verwachting is dat Leidsche Rijn Centrum zich de komende jaren tot een tweede centrum van de stad ontwikkelt. Het is daarom logisch om hier ook een belangrijk ov-knooppunt van te maken. Deze netwerkstructuur bestaat daarom uit twee radiale netwerken met Utrecht Centraal en Leidsche Rijn Centrum als middelpunten.
4. OV-knooppunten – In deze netwerkstructuur zijn ov-knooppunten aan de rand van de stad gecreëerd. Deze knooppunten zijn met elkaar verbonden door directe expreslijnen. Het regionale buslijnennet is direct aangesloten op de nieuwe knooppunten. Het doel van deze structuur is dat minder reizigers, ook vanuit de regio, via het centrum reizen.
5. Vrij – Als laatste is een totaal vrije netwerkstructuur bekeken. Dat wil zeggen dat vooraf geen netwerkstructuur is opgelegd door specifieke kandidaat-lijnen mee te nemen. In plaats daarvan zijn alle kandidaat-lijnen van de varianten 1 t/m 4 meegenomen in het ontwerpproces.

Tabel 1 geeft verschillende soorten kandidaat-lijnen weer. Per variant is aangegeven of deze lijnen zijn opgenomen in de kandidaat-lijnsset en met welk lijntype. Op basis van het huidige netwerk is vastgesteld dat een halteafstand van 500 meter voor stadslijnen en 1000 meter voor expreslijnen gemiddeld de kortste gewogen reistijden oplevert. Deze afstanden zijn daarom aangehouden tijdens het optimalisatieproces. Tijdens dit proces wordt ook de frequentie van elke geselecteerde lijn geoptimaliseerd. Frequenties kunnen de waarden 6, 8, 10, 12, 15 of 20 voertuigen per uur aannemen.

Tabel 1 – Samenstelling kandidaat-lijnen per variant

| Type kandidaat-lijnen | Ontwerpvarianten | | | | |
|---|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Variant 1 | Variant 2 | Variant 3 | Variant 4 | Variant 5 |
| Ontsluitende radialen | S/E/Z | - | S/E | S | S/E/Z |
| Ontsluitende transversalen | S | - | S | S | S |
| Rechtstreekse radialen | - | S/E/Z | - | - | S/E/Z |
| Rechtstreekse transversalen | - | S | - | - | S |
| Radialen naar Leidsche Rijn Centrum | - | - | S | - | S |
| Transversalen via Leidsche Rijn Centrum | - | - | S | - | S |
| Tangenten en ringlijnen | - | S | - | - | S |
| Snelle lijnen tussen ov-knooppunten | - | - | - | E | E |
| Ontsluitende lijnen tussen ov-knooppunten | - | S | - | S | S |
| Tramlijn | E | E | E | E | E |

S = Stadslijn, E = Expreslijn en Z = Zonelij

7. Resultaten

Tabel 2 laat zien hoe de ontworpen netwerken scoren op de toegepaste beoordelingscriteria. Aan de totaalscore van de multi-criteria analyse is te zien dat variant 5 het beste scoort. Dit is logisch omdat in deze variant de minste beperkingen qua netwerkstructuur zijn opgelegd. De toename van het aantal reizigers en reizigerskilometers bedraagt respectievelijk 4,5 en 7,5 procent ten opzichte van het huidige netwerk. Exploitatiekosten nemen licht af en het aandeel onbediende reizigers daalt met 2,7 procent. Daar staat tegenover dat ten opzichte van het huidige netwerk elk uur 3 extra bussen halteren op station Utrecht Centraal. Van de vooraf specifiek omschreven varianten 1 t/m 4 scoort variant 2 (radiaal netwerk met enkele tangenten) het beste. In dit netwerk neemt het aantal reizigers met 3,5 procent toe en het aantal reizigerskilometers met ruim 5 procent. In de volgende subparagraaf worden alle varianten kort toegelicht, daarna worden een aantal geaggregeerde netwerkeigenschappen bekeken.

Tabel 2 – Lijntypen per netwerkontwerp

| Beoordelingscriteria | Ontwerpvarianten | | | | | |
|------------------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Huidig | Var. 1 | Var. 2 | Var. 3 | Var. 4 | Var. 5 |
| Aantal reizigers | 22175 | 22339 | 22912 | 22186 | 22203 | 23161 |
| Aantal reizigerskilometers (km) | 108046 | 110395 | 113607 | 110210 | 110442 | 115931 |
| Kosten (€/uur) | 18211 | 17457 | 18196 | 18202 | 18099 | 17684 |
| Onbediende reizigers (%) | 4,1 | 1,6 | 1,4 | 1,5 | 2,4 | 1,4 |
| Aantal bussen op CS per uur | 244 | 224 | 224 | 214 | 223 | 227 |
| Totaalscore multi-criteria analyse | 0 | 6,56 | 17,73 | 4,87 | 5,18 | 22,5 |

7.1 Beschrijving per variant

Als eerste is een volledig radiale netwerkstructuur (variant 1) onderzocht. Omdat alle lijnen binnen dit netwerk via Utrecht Centraal lopen, is de capaciteit bij het station hiervoor te beperkt. In het ontworpen netwerk worden daarom minder bussen ingezet dan het budget toelaat. Een oplossing hiervoor is het toevoegen van tangenten aan het netwerk (variant 2). In het netwerk dat voor deze variant ontworpen is, wordt nog steeds

de volledige capaciteit van Utrecht Centraal benut, maar zijn ook een aantal tangenten opgenomen. Deze tangenten zijn niet alleen het gevolg van de gelimiteerde capaciteit van Utrecht Centraal, maar voegen zelf daadwerkelijk kwaliteit aan het netwerk toe. Dit is onderzocht door het aantal bussen dat halteert op Centraal Station weg te laten uit de doelstellingsfunctie, dit levert nog steeds een aantal tangenten op. Een netwerkstructuur met Leidsche Rijn als tweede centraal ov-knooppunt (variant 3) scoort het minste. Een belangrijke reden hiervoor is dat dit netwerk veel reizigers dwingt tot een extra overstap. De als laatst onderzochte netwerkstructuur gaat uit van extra ov-knooppunten aan de rand van de stad. Hierbij takt het regionale buslijnnet aan op deze knooppunten. Deze netwerkstructuur levert een beperkte verbetering op ten opzichte van het huidige netwerk. Dit komt omdat veel reizigers vanuit de regio een extra overstap moeten maken. Tabel 3 laat zien uit welk type lijnen de verschillende netwerkontwerpen bestaan.

Tabel 3 – Lijntypen per netwerkontwerp

| Lijnsoort | Ontwerpvarianten | | | | | |
|------------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Huidig | Var. 1 | Var. 2 | Var. 3 | Var. 4 | Var. 5 |
| Radiale lijnen | 10 | 6 | 9 | 7 | 7 | 7 |
| Transversale lijnen | 9 | 9 | 8 | 12 | 6 | 10 |
| Tangenten/ringlijnen | 6 | 0 | 8 | 1 | 3 | 0 |
| Lijnen tussen ov-knooppunten | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 4 |
| Stadslijnen | 21 | 11 | 20 | 18 | 10 | 11 |
| Expreslijnen | 4 | 0 | 1 | 2 | 6 | 6 |
| Zonelijnen | 0 | 4 | 4 | 0 | 5 | 4 |
| Totaal aantal lijnen | 25 | 15 | 25 | 20 | 21 | 21 |

7.2 Geaggregeerde netwerkeigenschappen

Uit de in tabel 4 weergegeven resultaten komt naar voren dat de geaggregeerde netwerkeigenschappen van de ontworpen netwerken sterk met elkaar overeenkomen. Hierbij is het opvallend dat de gevonden waarden sterk afwijken van de waarden die zijn terug te vinden in het huidige netwerk. In de eerste plaats is het efficiënter om voor een lagere halte-dichtheid te kiezen. De lagere halte-dichtheid in de ontworpen netwerken is het gevolg van lagere lijndichtheden en grotere halteafstanden. Verder is het effectief om een minder fijnmazig netwerk te exploiteren. Door een lagere netwerkdichtheid, met een kleinere totale lijnlengte, kan de frequentie op lijnen omhoog. Kortere rijtijden (door minder haltes) en wachttijden (door hogere frequenties) wegen op tegen de toename van de gemiddelde voor- en na transporttijd. Op tangenten kan het beste voor frequenties van 6 voertuigen per uur gekozen worden. De overige beschikbare bussen moeten evenredig verdeeld worden over de radiale (en transversale) lijnen. Alleen op verbindingen met een aanzienlijk grotere vervoersvraag is het vanuit capaciteitsoogpunt wenselijk een hogere frequentie toe te passen.

Tabel 4 – Netwerkeigenschappen per netwerkontwerp

| Netwerkeigenschap | Ontwerpvarianten | | | | | |
|---|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Huidig | Var. 1 | Var. 2 | Var. 3 | Var. 4 | Var. 5 |
| Halteafstand stadslijnen (meter) | 250-550 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Halteafstand expreslijnen (meter) | 500-650 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Netwerkdichtheid (km/km ²) | 2,22 | 1,66 | 1,70 | 1,72 | 1,65 | 1,81 |
| Lijndichtheid (km/km ²) | 4,26 | 2,98 | 3,38 | 3,42 | 3,07 | 3,86 |
| Halte-dichtheid (haltes/km ²) | 5,45 | 3,20 | 3,38 | 3,39 | 2,97 | 3,31 |
| Gemiddelde frequentie (vtg/uur) | 5,8 | 8,26 | 7,12 | 8,15 | 8,7 | 6,8 |

8. Conclusie

In deze paper is een methode beschreven om stedelijke openbaar vervoer netwerken te ontwerpen. De nadruk ligt hierbij op het combineren van de rekenkracht van computers met de kennis en ervaring van ontwerpers. Voor het ontwerpproces is een genetisch algoritme toegepast. De beschreven theorie is vertaald naar een operationeel optimalisatiemodel dat is toegepast om een aantal busnetwerken voor de stad Utrecht te ontwerpen. Uit de resultaten komt naar voren dat de veronderstelling dat het huidige netwerk potentie voor verbetering heeft inderdaad correct is. Het ontwerp waarbij vooraf geen netwerkstructuur is opgelegd, scoort het beste. De vraag is of dit opweegt tegen de voordelen van een heldere netwerkstructuur. Van de overige ontwerpen scoort de radiale netwerkstructuur met enkele tangenten het hoogst. Tenslotte blijkt dat lagere halte-, netwerk- en lijndichtheden een positief effect hebben op de gewogen reistijden van deur tot deur.

Verantwoording

Dit onderzoek is uitgevoerd als afronding van de masteropleiding Transport & Planning aan de Technische Universiteit Delft. Een groot deel van het onderzoek is uitgevoerd bij de gemeente Utrecht. De gemeente Utrecht heeft de gegevens verstrekt die zijn gebruikt in de case study.

Referenties

1. Ben Akiva M.E., S.R. Lerman (1985), *Discrete choice analysis, theory and application to travel demand*, The MIT Press, Cambridge.
2. Bieli M., M. Caramia, P. Carotenuto (2000), *Genetic algorithms in bus network optimization*, *Transportation Research Part C* (10), pagina 133-147.
3. Egeter B. (1993), *Systeemopbouw openbaar vervoer in stedelijk gebied; theorie en netwerkoptimalisatie*, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
4. De Cea J., E. Fernández (1993), *Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model*, *Transportation Science* 27 (2), pagina 19-34.
5. Fan W., R. Machemehl (2006), *Using a simulated annealing algorithm to solve the transit route network design problem*, *American Society of Civil Engineers, Journal of Transportation Engineering*, Volume 132, pagina 122.
6. Friedrich M., I. Hofsass, S. Weweck (2001), *Timetable-based transit assignment using branch and bound*, *Transportation Research (Record 1752)*, pagina 100-107.
7. Guihaire V., J.K. Hao (2008), *Transit network design and scheduling: a global review*, *Transportation Research (A/42)*, pagina 1251-1273.
8. Hoogendoorn-Lanser S. (2005), *Modelling travel behaviour in multi-modal networks*, TRAIL Thesis Series, Delft University Press, The Netherlands.
9. Van Nes R. (1988), *Optimalisatie openbaar vervoernetwerken; een optimalisatiemodel voor het ontwerpen van openbaar vervoer*, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
10. Van Nes R. (2002), *Design of multimodal transport networks; a hierarchical approach*, TRAIL Thesis Series, Delft University Press, The Netherlands.