

Lijnvoering van de toekomst voor het Nederlandse spoornetwerk

Verkenning met een genetisch optimalisatiemodel

Niek Guis

Technische Universiteit Delft/Nederlandse Spoorwegen¹

Bart de Keizer

Nederlandse Spoorwegen²

Rob van Nes

Technische Universiteit Delft³

Samenvatting

De Intercitylijnvoering van NS is de afgelopen 40 jaar nauwelijks veranderd, maar de vervoersvraag wel. Het is onduidelijk in hoeverre de bestaande lijnvoering nog aansluit bij de vervoersvraag.

De bestaande vervoersvraag is deels het gevolg van de bestaande diensten. Om die reden wordt een *potentiële* vervoersvraag bepaald, onafhankelijk van de bestaande diensten. Hiervoor worden twee methoden gepresenteerd. Eén methode maakt gebruik van NS prognoses en veronderstelt een zo kort mogelijke reistijd op alle relaties. Met behulp van de reistijdelasticiteit wordt vervolgens de potentiële vervoersvraag in kaart gebracht. De tweede methode maakt gebruik van prognoses uit het Landelijk Model Systeem. Hierbij is de potentiële vervoersvraag bepaald door de modal split van goed verbonden relaties te projecteren op de slechter verbonden relaties.

In de volgende stap wordt met behulp van een genetisch algoritme een nieuwe lijnvoering ontwikkeld. Er wordt een set met oplossingen gegenereerd en vervolgens worden steeds twee oplossingen gecombineerd en gemuteerd, zodat een nieuwe *generatie* ontstaat. Hoe beter een oplossing scoort, hoe groter de kans dat deze *overleeft*. Dit proces gaat door tot de oplossing niet verder verbetert.

Ondanks verschillende uitgangspunten zijn de resultaten vrij constant. Zo blijken ringlijnen en pendeltreinen vaak goed te scoren, worden vaak dezelfde nieuwe doorkoppelingen gevonden en worden frequenties in de Randstad hoger en in de rest van het land lager. De nieuwe inzichten

¹ Technische Universiteit Delft / Nederlandse Spoorwegen, E: niekguis@gmail.com

² Nederlandse Spoorwegen, E: Bart.deKeizer@ns.nl

³ Technische Universiteit Delft, E: r.vannes@tudelft.nl

worden door NS meegenomen in haar dienstregelingsstudies voor de lange termijn. Verder wordt momenteel onderzocht hoe de methode kan worden verfijnd en binnen het bedrijf praktisch toepasbaar kan worden gemaakt.

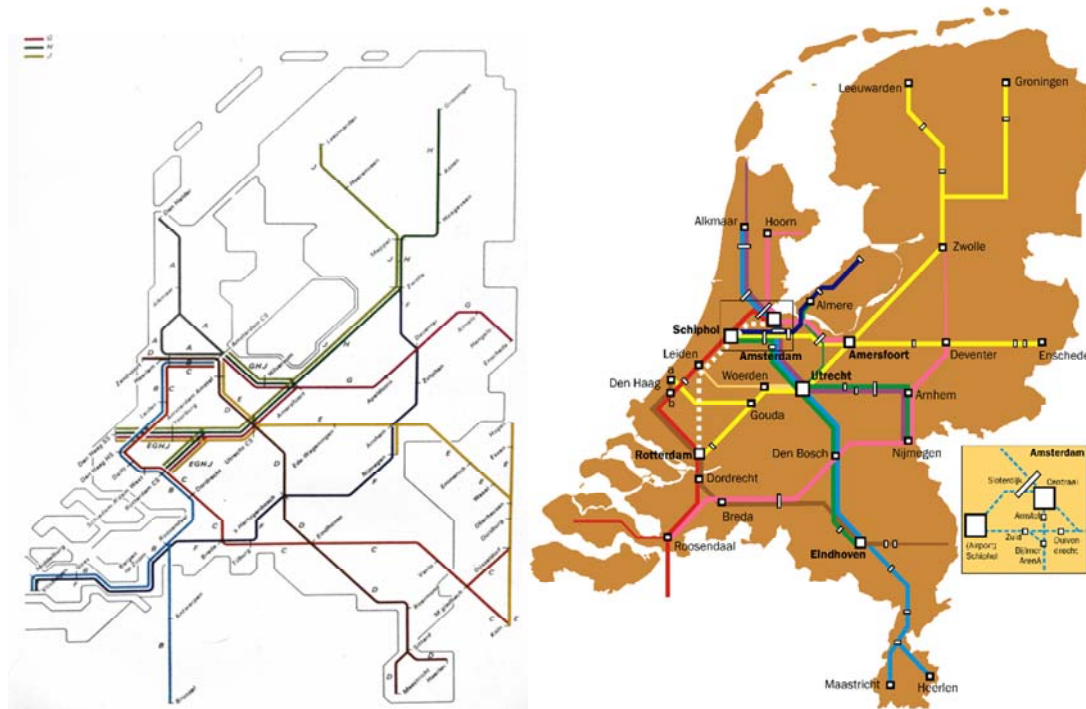
Trefwoorden: Algoritme, Genetisch, Intercity, Lijnvoering, Optimalisatiemodel, Vervoersvraag

1. Introductie

Het is voor ontwerpers van openbaar vervoer netwerken een blijvende uitdaging om het netwerk goed af te stemmen op de vervoersvraag. Als vervoerder is het van groot belang om de beste diensten aan te bieden waar de vraag het grootste is. Ontwerpers ondervinden hierbij echter vele restricties, waaronder beperkingen in budget, infrastructuur, materieel en personeel. Daarom is het erg belangrijk om een goede balans te vinden tussen het aanbieden van deze diensten en de restricties. Ook de Nederlandse Spoorwegen ondervinden dit dilemma in het ontwerpen van een goede lijnvoering.

Een lijnvoering wordt gedefinieerd als een set van lijnen, die de treinen planmatig rijden. In drukke netwerken als dat van Nederland heeft de lijnvoering vaak een cyclisch karakter, met lijnen die ieder uur terugkomen. Een lijn heeft een start- en een eindpunt en een zekere route met daartussen vaste tussenstations. Iedere lijn heeft daarnaast een frequentie.

In het Nederlandse treinnetwerk zijn de afgelopen 40 jaar slechts een handvol grote wijzigingen geweest, waarbij in de dienstregeling werd voortgeborduurd op het basisontwerp uit 1970. Zelfs na de grote wijzigingen in de dienstregeling in 2007, bleef de intercity lijnvoering zeer vergelijkbaar. Zie figuur 1. Ondertussen is de vervoersvraag niet meer hetzelfde als in 1970. Het is onduidelijk in hoeverre de bestaande lijnvoering nog aansluit bij de vervoersvraag van vandaag. Wanneer de dienstregeling helemaal 'from scratch' wordt ontworpen, in plaats van als uitbreiding op het bestaande, kan dit leiden tot nieuwe inzichten. In dit onderzoek wordt gebroken met de oude traditionele methode voor het ontwerpen van de lijnvoering. Er wordt een nieuwe methode ontwikkeld voor het ontwerpproces, gericht op de vervoersvraag van nu en de toekomst, vanuit een theoretisch perspectief. Hierbij worden invloeden van politiek en historische keuzes zoveel mogelijk weggelaten.



Figuur 1: Intercitylijnvoering 1970 (links) en 2010 (rechts)

1.1 Onderzoeksvragen

Het onderzoek gebruikt 3 onderzoeksvragen als kapstok:

1. Hoe ziet de potentiële vervoersvraag er in de toekomst uit, onafhankelijk van de bestaande diensten?
2. Hoe ziet een optimale lijnvoering eruit, gebaseerd op deze potentiële vervoersvraag?
3. Wat kunnen we hiervan leren voor de lijnvoering in de toekomst?

Ad 1: Tussen sommige stations wordt nu een zeer goede verbinding geboden, wat geresulteerd heeft in een grote vervoersvraag. Er zijn echter ook stationsparen met een slechtere verbinding. Hier is mogelijk wel een grote potentiële vervoersvraag, maar wordt deze nu niet gefaciliteerd. Om een goed ontwerp te kunnen maken, moet de vervoersvraag onafhankelijk worden gemaakt van de kwaliteit van de huidige verbinding. Zo kan de potentiële vervoersvraag in kaart worden gebracht.

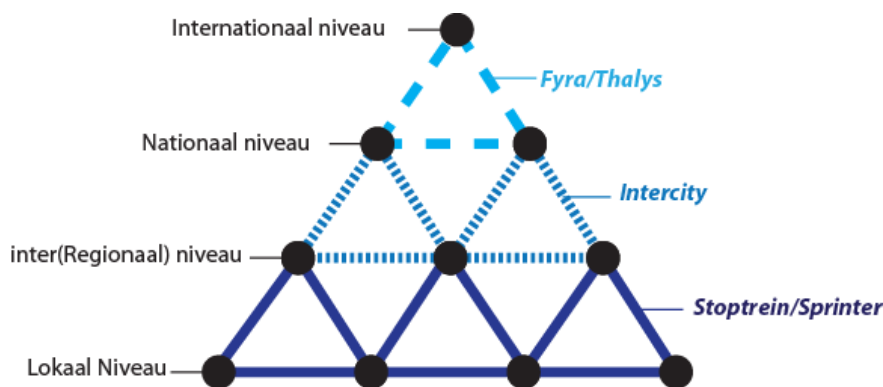
Ad 2: Om tot een objectief resultaat te komen, is het belangrijk om de lijnvoering 'from scratch' te ontwerpen, dat wil zeggen: met een leeg infrastructuur netwerk en de berekende potentiële vervoersvraag. Daarnaast zal gedefinieerd moeten worden wat een optimale lijnvoering is. Aan welke criteria moet voldaan worden en hoe zwaar wegen die criteria?

Ad 3: Wanneer resultaten bekend zijn, kunnen deze op basis van de gedefinieerde criteria met elkaar en met het bestaande ontwerp vergeleken worden. Waar vinden we de overeenkomsten en waar de verschillen? Op die manier kunnen ideeën voor een lange termijn visie worden ontwikkeld.

1.2 Kader

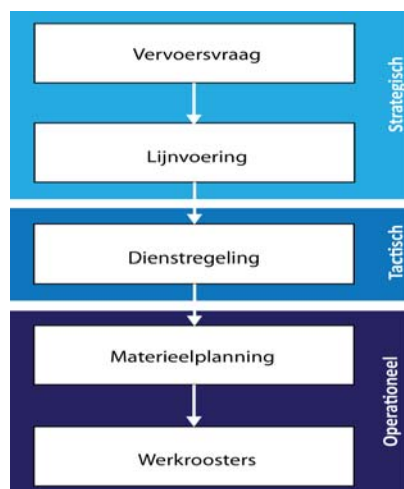
Doel is het ontwerp van een netwerk voor de middellange- en langeafstand. Momenteel wordt dat verzorgd door de Intercity en enkele treinen van een hoger netwerkniveau. Deze keuze wordt niet vertaald in een beperking tot verplaatsingen van een minimale verplaatsingsafstand, maar in de selectie van toegangspunten (stations) van het netwerk. De bestaande en een aantal toekomstige baanvakken worden als randvoorwaarde gebruikt. Capaciteiten en verbindingbogen worden echter niet als randvoorwaarde gebruikt.

Het ontwerp richt zich op het jaar 2020. De kennis van deze resultaten kan ook al een belangrijke input leveren voor het ontwerp van lijnvoeringen op de kortere termijn (2013-2020).



Figuur 2: Theoretische ideale structuur, (vrij naar Van Nes (2007))

Het onderzoek bevindt zich in de strategische fase van het ontwerpproces. Zie figuur 3. De vervoersvraag en de lijnvoering worden onderzocht. Het verder uitwerken tot een dienstregeling met materieel- en personeelroosters valt buiten de scope van het onderzoek. Dit betekent dat het onderzoek geen kant-en-klare dienstregeling zal opleveren. Dit geldt ook voor de toets of er voldoende capaciteit op de infrastructuur beschikbaar is. Het doel van het onderzoek is immers het ontwerpen van een toekomstvisie, zoveel mogelijk onafhankelijk van de beperkingen van vandaag.



Figuur 3: Ontwerpproces dienstregeling

2. De potentiële vervoersvraag

Bij NS zijn betrouwbare prognoses van het reizigersvervoer per trein bekend voor 2020. Deze gegevens hebben als nadeel dat hierin geen vervoersvraag is opgenomen in gebieden waar NS geen diensten biedt. Het Landelijk Model Systeem, ontwikkeld door Rijkswaterstaat, bevat wel de vervoersvraag in het hele land, maar is minder nauwkeurig omdat het hier om een modelstudie gaat.

Er wordt daarom met 2 verschillende methoden een schatting van de potentiële vervoersvraag gemaakt:

1. Elasticiteit-methode
2. LMS-methode

2.1 Elasticiteitsmethode

De eerste methode maakt gebruik van een door NS geschatte vervoersvraag voor 2020. Voor iedere stationsrelatie wordt de gegeneraliseerde reistijd (GRT) berekend van de meest waarschijnlijke dienstregeling in 2020 (een scenario van het Programma Hoogfrequent Spoor). De GRT is een indicator voor het disnut dat een reiziger ervaart in een reis. De GRT omvat de reistijd in de trein, maar voegt hier een straftijd aan toe bij wachttijden en overstappen.

Vervolgens wordt een virtuele dienstregeling aangenomen. In deze dienstregeling wordt tussen ieder stationspaar een directe lijn over de beschikbare infrastructuur verondersteld. Deze lijn heeft een frequentie van 6 treinen per uur en kent geen tussenstops. Uiteraard is deze situatie een theoretisch experiment. Het zou immers betekenen dat van ieder station ongeveer 2500 treinen per uur vertrekken en aankomen. Uitgangspunt is dat de dienstverlening nooit mag verslechteren in de gevallen waar nu al een betere verbinding is dan hierboven beschreven. Daar waar deze nieuwe GRT dus groter is dan de bestaande GRT, wordt de bestaande vervoersvraag gehandhaafd.

Nu wordt ook voor deze situatie de GRT bepaald. Met behulp van onderstaande functie voor de reistijdelasticiteit, wordt nu een schatting gemaakt van het aantal reizigers in deze ideale situatie.

$$V_{i,j,potentieel} = V_{i,j,origineel} \left(\frac{GRT_{+i,j}}{GRT_{i,j}} \right)^{-0.9}$$

| | |
|----------------------|--|
| $V_{i,j,potentieel}$ | Potentiële vervoersvraag tussen i en j [reizen] |
| $V_{i,j,origineel}$ | Originele vervoersvraag tussen i en j [reizen] |
| $GRT_{i,j}$ | Gegeneraliseerde reistijd tussen i en j [min] |
| $GRT_{+i,j}$ | Optimale gegeneraliseerde reistijd tussen i en j [min] |

Het resultaat van dit model is een grote groei. De meeste stationsparen kennen een potentiële groei van meer dan 100%. Op sommige relaties is de groei zelfs meer dan 300%. Het gaat daar echter vaak om stationsparen met minder dan 1 potentiële reiziger per dag. Wanneer we alleen de 30 drukste stations selecteren, dan blijkt dat de grootste groei in twee regio's gevonden wordt. Ten eerste zijn dit verschillende stationsparen in de regio Amsterdam. Hier zijn veel stations op relatief korte afstand van elkaar. Toch is er vaak geen directe treinverbinding tussen deze stations. Zo wordt een grote potentiële groei gevonden tussen Amsterdam Amstel en Amsterdam Zuid. Deze stations liggen op slechts enkele kilometers van elkaar, maar er is geen directe

verbinding. Het is echter de vraag in hoeverre deze markt door NS bediend zou moeten worden. De afstanden zijn meer geschikt voor vervoer met bus, metro of tram. Ten tweede zijn dit stationsrelaties in het oosten van het land. Er zijn veel missende verbindingen tussen de regio Enschede en Arnhem/Nijmegen en tussen Apeldoorn, Arnhem en Zwolle. Wanneer hier directe verbindingen zouden zijn, zou het aantal reizigers volgens deze benadering sterk kunnen toenemen.

Wanneer naar absolute groei wordt gekeken, blijkt dat de toename in potentiële reizigers bij de meeste stationsparen slechts enkele reizigers per dag omvat of zelfs minder dan 1. De grootste absolute potentiële groei wordt gevonden in de nu al drukke stationsparen in de Randstad. Ook wanneer naar reizigerskilometers gekeken wordt, wordt de grootste potentiële groei hier gevonden.

2.2 LMS-methode

De tweede methode gebruikt data van het Landelijk Model Systeem, ontwikkeld door Rijkswaterstaat, als input. Dit model omvat alle verplaatsingen binnen Nederland, van alle belangrijke vervoerswijzen. Hiertoe is Nederland opgedeeld in 345 zones.



Figuur 4: Verdeling relatietypes

Aangenomen wordt dat het potentiële aandeel van de trein binnen de totale vervoersvraag afhankelijk is van de afstand tussen de steden en het type relatie (niet Randstad naar Randstad, Randstad naar grote stad, etc). Zie figuur 4. Een haalbaar aandeel binnen de vervoersvraag wordt geschat door de modal split van stationsparen te vergelijken met goed verbonden relaties van dezelfde afstand en hetzelfde type. Hiervoor wordt met behulp van een regressieanalyse een lineaire relatie verondersteld tussen de afstand en het treinaandeel voor ieder relatietype. Vervolgens wordt deze lineaire relatie gebruikt om de potentiële vervoersvraag op alle relaties te bepalen. Net als bij de elasticiteitsmethode wordt gecorrigeerd voor dalende vervoersvraag. In die gevallen wordt de door het LMS voorspelde vervoersvraag gehandhaafd.

Bij deze methode zijn de relatieve verschillen groter dan bij de elasticiteitsmethode. Dit wordt vooral veroorzaakt doordat de stromen voor een aantal relaties erg klein zijn. Verder is opvallend dat vooral van en naar de Rotterdamse haven een grote groei mogelijk is. Dus ook bij deze methode is het zinvoller om naar absolute cijfers te kijken. De grootste absolute potentiële groei wordt gevonden tussen de grote steden en hun voorsteden, zoals tussen Rijswijk en Den Haag, Amstelveen en Amsterdam, etc.

Tabel 1: Overzicht grootste absolute groeirelaties (> 20 km)

| Herkomst | Bestemming | LMS Basis | Na regressie | Vershil | Hemelsbrede afstand |
|----------------|-------------|-----------|--------------|---------|---------------------|
| Almere | Amsterdam | 5265 | 6551 | 1286 | 25 |
| Beverwijk | Amsterdam | 1558 | 2660 | 1102 | 21 |
| Papendrecht | Rotterdam | 1019 | 2107 | 1088 | 21 |
| Amsterdam | Almere | 5213 | 6232 | 1019 | 25 |
| Hellevoetsluis | Rotterdam | 106 | 1122 | 1016 | 25 |
| Rotterdam | Papendrecht | 1009 | 2022 | 1013 | 21 |
| Blaricum | Amsterdam | 653 | 1643 | 990 | 26 |
| Rotterdam | Den Haag | 8399 | 9381 | 982 | 22 |
| Amsterdam | Beverwijk | 1542 | 2485 | 943 | 21 |
| Den Haag | Rotterdam | 8365 | 9307 | 942 | 22 |

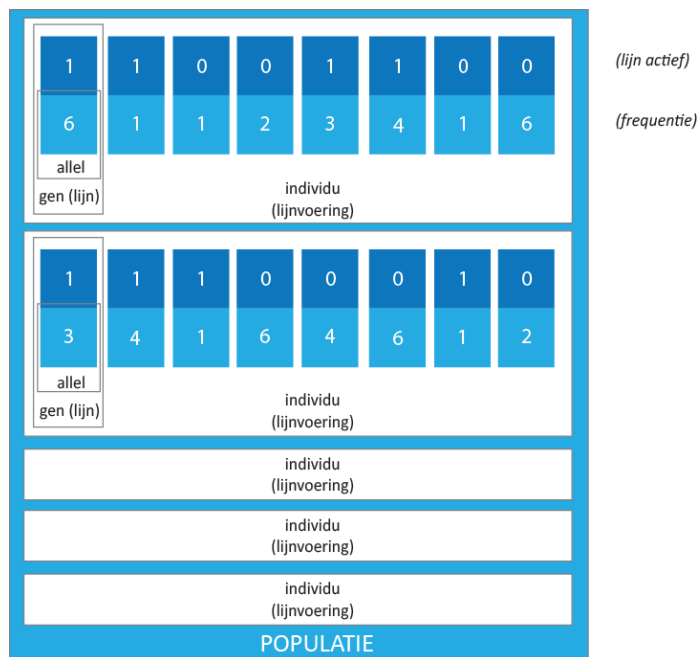
3. Genetisch algoritme

Het lijnvoeringsprobleem is NP-volledig. Dat wil zeggen dat het met exacte oplossingsmethoden niet oplosbaar is. Een zeer compleet bewijs hiervoor wordt gegeven door Bussieck (1998). Om deze reden wordt gezocht naar een heuristische methode om het probleem op te lossen. Na een literatuuronderzoek is gekozen voor het gebruik van een genetisch algoritme. Deze techniek gebruikt de principes van de evolutieleer om een optimale oplossing te vinden. Bielli *et al.* (2000) hebben met succes een genetisch algoritme toegepast op een busnetwerk. Deze methodiek is door G. van Eck (2010) in aangepaste en zeer uitgebreide vorm gebruikt voor een optimalisatie van het busnetwerk van Utrecht. Deze techniek is echter zondermeer ook bruikbaar voor spoornetwerken. Ook in dit onderzoek wordt het werk van Bielli *et al.* dan ook als basis aangehouden.

3.1 Terminologie

Genetische algoritmen hebben hun eigen terminologie: een lijnvoering is in dit model een chromosoom of individu. Elk chromosoom bestaat uit genen, die de lijnen in de lijnvoering representeren. Ieder gen bestaat in deze opzet weer uit twee allelen. Het eerste allel bepaalt of de lijn actief is in de lijnvoering (0/1) en het tweede allel bepaalt de frequentie (1, 2, 3, 4 of 6 per uur). Zie ook figuur 5.

Alle lijnen (actief of niet-actief) kunnen worden gezien als kandidaatlijnen. Voor iedere kandidaatlijn geldt dat deze wel of niet kan worden opgenomen in de lijnvoering. De set van kandidaatlijnen moet dan ook alle mogelijk relevante lijnen omvatten.

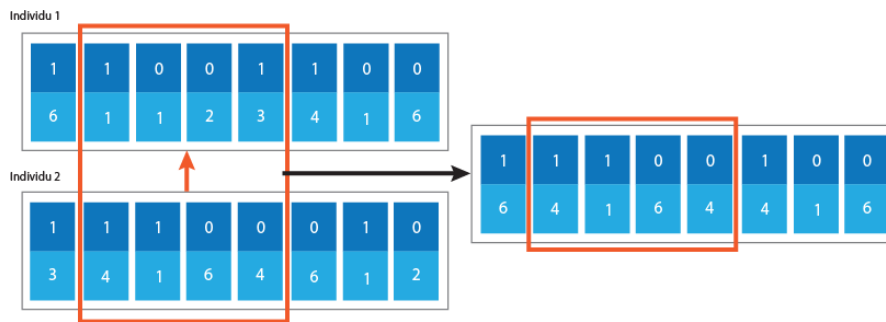


Figuur 5: Terminologie Genetisch Algoritme

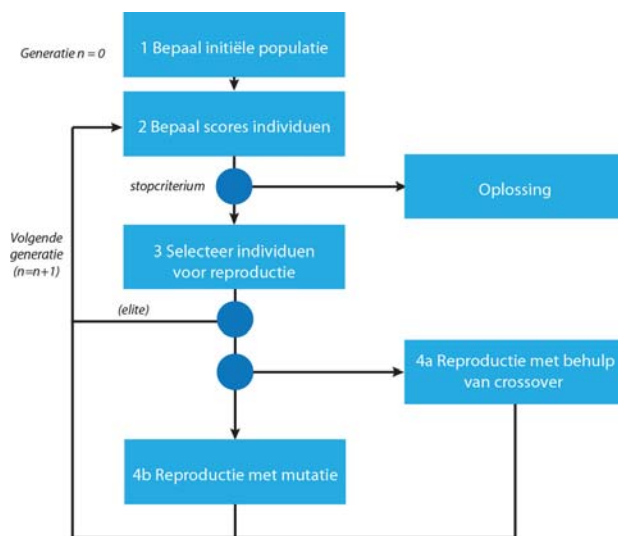
3.2 Het proces

Eerst wordt een initiële populatie gegenereerd. Deze populatie bestaat uit een set van oplossingen (lijnvoeringen/individuen/chromosomen). Deze lijnvoeringen zijn willekeurig opgebouwd, door een willekeurig aantal kandidaatlijnen te activeren en willekeurige frequenties toe te delen aan de lijnen. Ieder individu wordt vervolgens met behulp van het beoordelingsmodel (zie hoofdstuk 5) geëvalueerd en krijgt een score toegekend. Vervolgens kiest een selectie-algoritme willekeurig een aantal oplossingen uit de set voor reproductie, waarbij de kans om gekozen te worden toeneemt met de score. De best scorende oplossingen hebben zo de grootste kans om gereproduceerd te worden. Sommige oplossingen gaan onveranderd door naar de volgende generatie. De meeste oplossingen krijgen echter een kleine genetische aanpassing: crossover of mutatie. In het geval van crossover worden twee oplossingen gecombineerd. Uit deze twee oplossingen ontstaat een "kind" dat van beide ouders eigenschappen heeft. Zie figuur 6. In het geval van mutatie wordt een willekeurig allel veranderd: de frequentie van een lijn wordt verhoogd of verlaagd of de activatie van een lijn verandert. Na deze stap wordt het hele proces herhaald met de volgende generatie. Het beoordelingsmodel zal uitwijzen of de nieuwe oplossingen beter zijn dan de oude oplossingen. Door steeds de best scorende oplossingen onveranderd naar de volgende generatie door te laten gaan wordt gegarandeerd dat de beste oplossing nooit slechter wordt. Dit proces gaat door tot een zeker stopcriterium bereikt wordt. Zie figuur 7.

De rekentijd is afhankelijk van het aantal iteraties, de grootte van de populatie en vooral van de netwerk grootte. Voor deze analyses was de rekentijd al snel 2 dagen per optimalisatie. Het aantal iteraties was 250 en de grootte van de populatie 200. Na circa 150 iteraties werden geen echte verbeteringen in de beoordelingscriteria waargenomen.



Figuur 6: Voorbeeld van reproductie met genetische modificatie: crossover



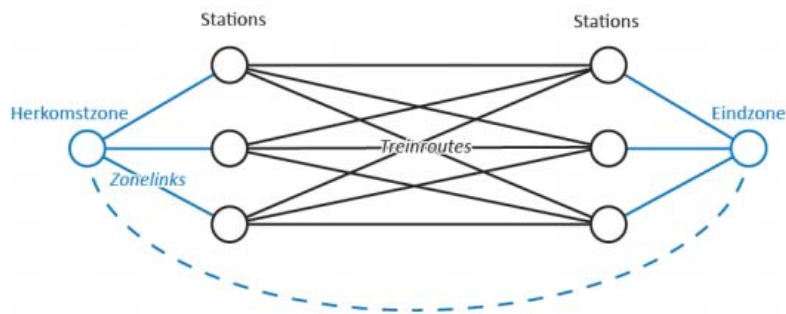
Figuur 7: Doorloopschema Genetisch Algoritme

Strikt genomen is het ook mogelijk om per lijn 1 allel te gebruiken. Dit allel representeert dan de frequentie en een frequentie van 0 betekent dat de lijn niet in gebruik is. Het gebruik van een apart allel voor het wel of niet actief zijn en voor de frequentie maakt de methode flexibeler. Eer is namelijk een grotere kans dat een lijn actief of inactief wordt, terwijl er geen informatieverlies optreedt als een lijn inactief wordt. Bij een volgende mutatie wordt immers de oude frequentie weer gebruikt.

4. Beoordelingsmodel

4.1 Netwerk specificatie

Het model gebruikt een gerichte graaf-representatie van het netwerk, met stations als knopen en de baanvakken ertussen als schakels. In iedere richting is 1 schakel. Zie figuur 8. De vervoersvraag bij gebruik van de LMS-methode is gemodelleerd van zone naar zone. Daartoe wordt aan iedere zone een set van kandidaatstations toegewezen. Vanuit de zones kunnen reizigers zo verschillende stations in de omgeving als toegangspunt gebruiken. De schakels tussen de zones en stations hebben een reistijd, als functie van de afstand.



Figuur 8: Opbouw routekeuzeset

4.2 Reisgedrag

Het reisgedrag wordt gemodelleerd met behulp van een logit keuzemodel (Ben-Akiva en Lerman 1985). De reiziger kan kiezen uit de verschillende kandidaatstations bij de herkomstzone en verschillende de kandidaatstations bij de bestemmingszone. Tussen deze stations wordt de kortste route berekend met een kortste pad algoritme. Daarnaast wordt er ook altijd een directe schakel tussen herkomst- en bestemmingzone toegevoegd, zodat de reiziger ook de keuze heeft om de trein niet te gebruiken. De verdeling van de reizigers over de routes wordt bepaald aan de hand van het disnut van de reis. In het disnut zijn zaken opgenomen als reistijd in voor- en natransport, rijtijd in de trein, halteertijd en strafpunten voor overstappen.

4.3 Beoordelingsmodel

Het beoordelingsmodel evalueert de individuen (lijnvoeringen) op de volgende minimalisatie criteria:

- Gemiddelde generaliseerde reistijd
- Totale kwadratische omreis (om lange omreizen te voorkomen)
- Gemiddeld aantal overstappen
- Totaal aantal niet-treinreizen
- Aantal benodigde treinen

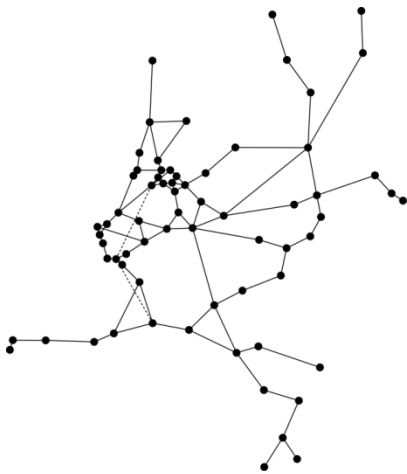
Vier van de 5 optimalisatiecriteria zijn gericht op de reiziger. Dit sluit aan bij de ontwerpfilosofie van het onderzoek, waarbij gezocht wordt naar een lijnvoering gericht op het zo goed mogelijk aansluiten bij de vervoersvraag. Voor het vinden van realistische oplossingen is het echter ook noodzakelijk om een criterium toe te voegen dat doorwerkt aan de kostenkant van het model. In dit geval is dit het aantal benodigde treinen.

5. Toepassing

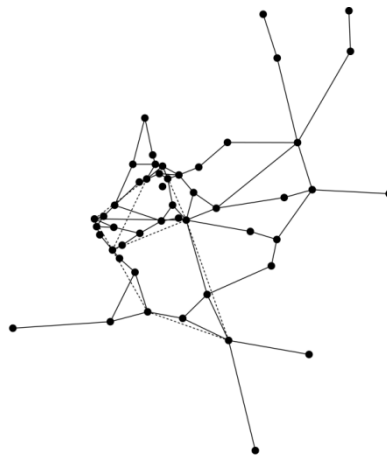
5.1 Ontwerpoarianten

Om de resultaten een brede toepassing te geven, worden vier verschillende varianten ontwikkeld. De resultaten van de eerste variant kunnen relatief snel worden toegepast. De laatste variant moet gezien worden als een lange termijn visie (na 2020). Variant 1 (figuur 9) gebruikt de vervoersvraag uit de LMS-methode en bestaande Intercity stops Daar waar knopen nu al direct met elkaar verbonden zijn, wordt een schakel geplaatst. Het bestaande hogere netwerkniveau van Fyra en Thalys wordt als randvoorwaarde mee-genomen. De tweede variant is identiek aan

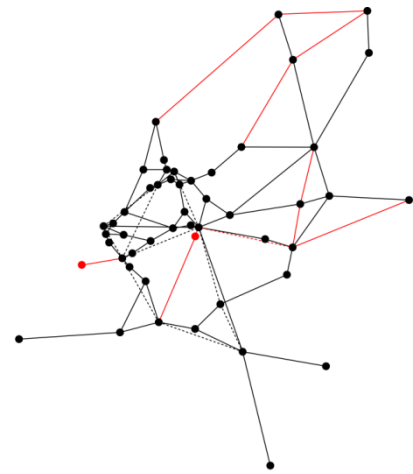
de eerste, maar gebruikt de vervoersvraag uit de elasticiteitsmethode, om de verschillen te onderzoeken. In de derde (figuur 10) en vierde variant (figuur 11) wordt een nieuwe selectie toegangspunten (stations) gebruikt met een grotere afstand tussen de haltingen. In het hogere netwerkniveau worden potentiële schakels aan het netwerk toegevoegd (op basis van bestaande infrastructuur) en de huidige treinlijnen (Fyra, Thalys) op dit niveau hoeven niet per definitie onderdeel van de oplossing te zijn. Beide varianten gebruiken de vervoersvraag uit de LMS-methode. In de vierde variant wordt het netwerk met nieuwe potentiële schakels uitgebreid, die niet bestaan in de huidige infrastructuur. Deze schakels zijn voor een deel gekozen omdat over deze schakels een lopende discussie is. De overige schakels volgen uit een onderzoek van zwakke punten in het bestaande netwerk.



Figuur 9:
Netwerkvariant 1 & 2



Figuur 10:
Netwerkvariant 3



Figuur 11:
Netwerkvariant 4

Tabel 2: Overzicht uitgangspunten varianten

| | Variant 1 | Variant 2 | Variant 3 | Variant 4 |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Agglomeratie schaalniveau (Fyra) | Randvoorwaarde | Randvoorwaarde | Simultaan ontwerp | Simultaan ontwerp |
| Knopen | Huidige intercitystatus | Huidige intercitystatus | Nieuw ontwerp | Nieuw ontwerp |
| Schakels | Bestaande schakels | Bestaande schakels | Bestaande schakels | Nieuwe schakels |
| Verplaatsingspatroon | LMS-methode | Elasticiteitsmethode | LMS-methode | LMS-methode |
| Termijnvisie | Korte termijn (2013) | Korte termijn (2013) | Middellange termijn (2015-2020) | Lange Termijn (> 2020) |

6. Resultaten

6.1 Resultaten per variant

Tabel 3: Beste resultaten per variant

| | Variant 1 | Variant 2 | Variant 3 | Variant 4 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| GRT | 99,9% | 97,9% | 100,4% | 100,7% |
| Omreistijd | 98,8% | 87,5% | 104,4% | 105,0% |
| Overstappen | 80,1% | 64,7% | 63,7% | 72,3% |
| Niet-treinreizen | 91,5% | 79,0% | 102,1% | 97,9% |
| Aantal treinen | 102,3% | 127,7% | 84,4% | 82,3% |

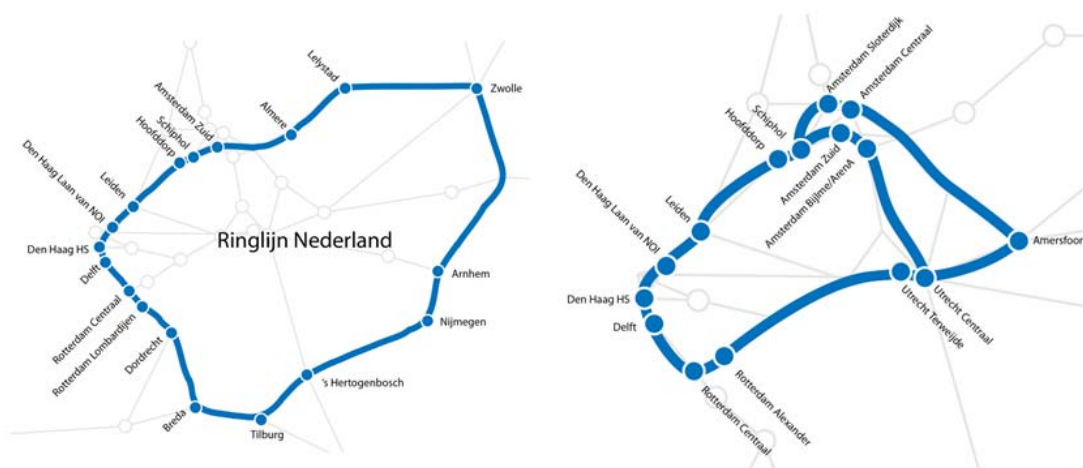
Variant 1 en 2 leveren een daling van de gegeneraliseerde reistijd op. In variant 3 en 4 neemt deze iets toe. De daling van het aantal overstappen en aantal benodigde treinen maakt dit echter ruimschoots goed. Alleen in variant 2 is de oplossing "geëvolueerd" naar een oplossing met juist erg veel treinen. De winst zit hier in de sterke afname van de omreistijd.

6.2 Opvallende resultaten

De kracht van een heuristiek als deze ligt echter meer in de kwalitatieve resultaten. Welke resultaten waren opvallend? Wanneer de resultaten van de varianten bekeken worden, valt op dat de overeenkomsten met de huidige lijnvoering redelijk groot zijn. Ook opvallend is dat de resultaten van de varianten grote overeenkomsten met elkaar vertonen. Op enkele te verwachten verschillen na, laten alle varianten dezelfde patronen zien. Dit ondanks het feit dat de vrijheidsgraden voor het ontwerp tussen de varianten sterk verschillen.

Ringlijnen

Het meest opvallende resultaat is het verschijnen van ringlijnen. Deze lijnen onderschieden zich door het ontbreken van een vast begin- of eindpunt. Hoewel slechts 3 kandidaatringlijnen in het model zijn opgenomen, verschijnt in iedere oplossing minstens 1 ringlijn en soms zelfs alle drie. De eerste ringlijn (zie figuur 12 links) omcirkelt een groot deel van het land via Amsterdam, Zwolle, Arnhem, 's Hertogenbosch, Breda, Rotterdam, Den Haag, Schiphol en terug naar Amsterdam. Deze ringlijn is in de toekomst ook fysiek mogelijk dankzij de opening van de Hanzelijn tussen Lelystad en Zwolle in 2013. De andere twee cirkellijnen (zie figuur 12 rechts) omcirkelen de Randstad via Amsterdam, (Amersfoort), Utrecht, Rotterdam, Den Haag, Schiphol en terug naar Amsterdam.



Figuur 12: Ringlijnen rond groot deel Nederland (links) en Randstad (rechts)

Voordeel van de grote ringlijn via de Hanzelijn is dat er niet gekeerd hoeft te worden. Voor alle ringlijnen geldt bovendien dat er nieuwe directe verbindingen ontstaan, zoals Gouda – Rotterdam – Delft en Amsterdam Bijlmer – Leiden. Welke impact een ringlijn heeft op betrouwbaarheid en bijstuurbaarheid valt buiten de scope van het onderzoek, maar verdient in een nadere uitwerking zeker aandacht.

Nieuwe doorkoppelingen

Voor een aantal stationsparen blijkt dat er genoeg vervoersvraag is om ze onderdeel van een directe lijn te maken:

- 's Hertogenbosch – Utrecht – Amersfoort
- Tilburg – Utrecht (direct)
- Amsterdam – Zwolle – Deventer – Enschede (met gebruik van Hanzelijn)

Pendeltreinen

Op enkele trajecten worden vaak pendeltreinen gevonden. Dit zijn lijnen die slechts 2 stations verbinden, zonder tussenstops:

- Rotterdam Centraal – Den Haag Centraal
- Arnhem – Nijmegen

De vervoersvraag tussen deze stations is zo hoog dat deze niet efficiënt kan worden verzorgd met normale (dus lange) lijnen. Het inzetten van extra pendeltreinen is dan een goed alternatief.

Focus op de Randstad

In het algemeen ziet men een verhuizing van treinen vanuit de Nederlandse periferie naar de Randstad. Het blijkt dat wanneer puur naar de vervoersvraag gekeken wordt, het het meest effectief is om meer treinen in de Randstad te laten rijden, omdat daar de vraag het grootst is. Er wordt dan een mindere dienstverlening geboden in de minder stedelijke gebieden in het noorden, oosten en zuiden van het land. Dit sluit aan bij de grote absolute groei in de vervoersvraag in de Randstad, zoals gevonden in hoofdstuk 2.

7. Toepasbaarheid en aanbevelingen

7.1 *Beoordelingsmodel*

Het belangrijkste aandachtspunt bij de verdere ontwikkeling van de methodiek is het beoordelingsmodel. Het beoordelingsmodel dient de juiste elementen in de juiste verhoudingen te bevatten. Deze functie dient naast de marktvrage ook de andere relevante aspecten voor de 'business' van het OV-bedrijf, kosten en maakbaarheid, te bevatten. Het huidige beoordelingsmodel dient verder verfijnd te worden om scherpe conclusies aan de resultaten te kunnen verbinden.

7.2 *Brondata*

Hoewel de resultaten bij verschillende brondata sterk overeen kwamen, moet zorg besteed worden aan de gebruikte brondata. De NS-gegevens en LMS-gegevens hebben beide hun voor- en nadelen wat betreft betrouwbaarheid en volledigheid. Mogelijk worden betrouwbaardere resultaten behaald met de nieuwe LMS-gegevens.

7.3 *Uitbreiding stoptreinen / sprinters*

Verder kan de exercitie ook uitgebreid worden met stoptreinen / sprinters. Er moet dan onderzocht worden of het beter is om dit simultaan of in 2 stappen uit te voeren. Wanneer dit simultaan gebeurt wordt de uitwisseling tussen verschillende schaalniveaus goed gemodelleerd. De zoekruimte wordt echter zeer groot. Dit maakt de rekentijd langer en het zoeken naar het optimum lastiger. Men kan er ook voor kiezen om de gevonden resultaten in dit onderzoek als randvoorwaarde op te nemen in het ontwerp van de lijnvoering van de stoptreinen. In deze topdown benadering wordt de uitwisseling tussen schaalniveaus weliswaar minder goed gemodelleerd, maar worden eerst de hoofdstromen gefaciliteerd door het intercity-netwerk en vervolgens de stoptrein verbindingen hieraan aangepast.

7.4 *Algemeen*

De toegepaste methodiek toont aan dat het mogelijk is om nieuwe dienstregelingen op een objectieve wijze vanuit de vervoersvraag op te bouwen. De resultaten leiden tot nieuwe inzichten die met gebruik van de klassieke methode (voortborduren op de bestaande lijnvoering) niet gevonden zouden worden: nieuwe doorkoppelingen en concepten als ringlijnen en pendellijnen. Hiermee is de methodiek een waardevol instrument in de beginfase van de ontwikkeling van een nieuwe dienstregeling. OV-bedrijven zouden een dergelijke exercitie ca. 1 x per 5 jaar en vaker in het geval van wijzigingen in het infrastructuurnetwerk uit moeten voeren.

7.5 *Genetisch algoritme*

Het genetisch algoritme heeft zichzelf, zowel in de literatuur als in dit onderzoek, bewezen als een waardevol hulpmiddel in de strategische fase van het dienstregelingontwerp. De kracht van het algoritme is dat een groot aantal bijna optimale netwerken wordt gevonden, waardoor ook inzicht verkregen wordt in typische karakteristieken van goede netwerken. Dankzij de rekenkracht van moderne computers zijn deze en andere technieken nog vol in ontwikkeling. Aanbevolen wordt om in de toekomst ook andere technieken te volgen voor het dienstregelingontwerp.

8. 'Follow up' in de praktijk

De nieuwe inzichten ten aanzien van andere mogelijke lijnvoeringen zijn binnen NS inmiddels meegenomen in studies naar de dienstregelingsontwikkeling op de lange termijn.

Verder wordt momenteel uitgezocht hoe de methodiek de komende tijd verder ontwikkeld kan worden. Aandachtspunten daarbij zijn de uitbreiding van het beoordelingsmodel, uitbreiding van de set relevante kandidaatlijnen en de mogelijke uitbreiding van het model met sprinterlijnen en sprinterstations. Daarnaast worden de mogelijkheden om de rekestijd te verminderen onderzocht. Bij iedere gewenste uitbreiding van het model zal moeten worden afgewogen of de voordelen opwegen tegen het veelal fors oplopen van de rekestijden. Uiteindelijk moet de doorontwikkeling leiden tot een model dat periodiek kan worden toegepast bij het opzetten van nieuwe lijnvoeringen.

Literatuur

Ben-Akiva, M., en S.R. Lerman (1985). *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. Massachusetts: The Massachusetts Institute of Technology.

Bielli, M., M. Caramia, en P. Carotenuto (2000). Genetic algorithms in bus network optimization. *Transportation Research, Part C*, 10, 19-34.

Bussieck, M. (1998). *Optimal Lines in Public Transport*. Universität Braunschweig.

Van Eck, G. (2010). *Ontwerp van stedelijke openbaar vervoer netwerken*, bijdrage Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2010, Stichting CVS, [Online URL]: www.cvs-congres.nl.

Van Nes, R. (2002). *Design of multimodal transport networks. A hierarchical approach*. TRAIL-Thesis series T2002/05, DUP Science, Delft.