

Optimalisatie van de lijnvoering op Railnetwerken

Bart de Keizer
NS Reizigers
bart.dekeizer@ns.nl

Pieter-Jan Fioole
NS Reizigers
pieterjan.fioole@ns.nl

Joël van 't Wout
NS Reizigers
joel.vantwout@ns.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
21 en 22 november 2013, Rotterdam**

Samenvatting

Optimalisatie van de lijnvoering op Railnetwerken

Bij de ontwikkeling van een lijnvoering voor een railnetwerk loopt men al snel tegen de eindeloze set aan mogelijkheden en keuzes aan die dienen te worden gemaakt om tot het eindresultaat te komen. Klantvriendelijkheid, opbrengsten en kosten dienen in een juiste balans te worden gebracht. Daarbij is er ook sprake van een zeer uitgebreide set aan randvoorwaarden, zoals het bestaande klantaanbod, de infrastructuur en het beschikbare materieel. Het blijkt in de praktijk ondoenlijk om al deze keuzes en afwegingen expliciet te maken, waardoor het altijd de vraag blijft of de geconstrueerde lijnvoering wel de optimale is.

Dit paper beschrijft een model, het Lijnvoeringsmodel, dat met behulp van een genetisch algoritme een nieuwe lijnvoering ontwikkelt, optimaliseert en beoordeelt. Het model is de doorontwikkeling van het prototype, zoals gepresenteerd op het CVS 2011 [Guis, 2011].

Het Lijnvoeringsmodel optimaliseert op resultaatsverbetering voor de vervoersmaatschappij. In het model worden zowel opbrengsten door vervoersgroei als kosten door extra materieel en treinkilometers berekend en meegenomen in het optimalisatieproces. Het model genereert sets met oplossingen die vervolgens worden 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.

Inmiddels zijn er met het Lijnvoeringsmodel enkele pilots uitgevoerd om de meerwaarde er van vast te stellen. In de eerste pilot werden vooral waardevolle ideeën opgedaan om mee te nemen in de verdere lijnvoering ontwikkeling. In latere versies heeft het model geholpen bij het snel kunnen beoordelen van verschillende lijnvoeringsvarianten. Enkele pilots en verbeteringen aan het model verder is ook het vertrouwen gegroeid dat het model daadwerkelijk naar een niet lokaal optimum convergeert (een vaak zwakker kenmerk van genetische optimalisatieprocessen).

1. Inleiding

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.

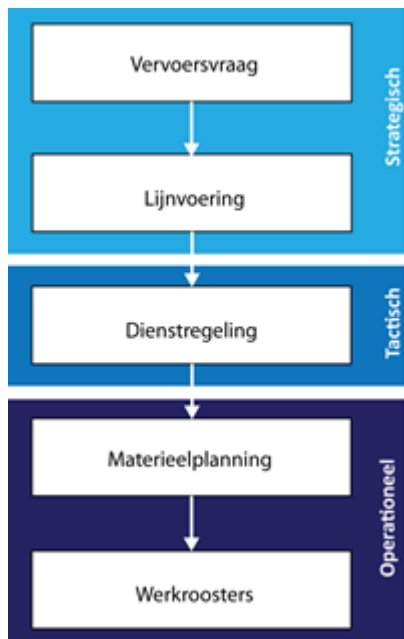
Een lijnvoering wordt gedefinieerd als een set van lijnen, die de treinen planmatig rijden. In drukke netwerken als dat van Nederland heeft de lijnvoering vaak een cyclisch karakter, met lijnen die ieder uur terugkomen. Een lijn heeft een start- en een eindpunt en een zekere route met daartussen vaste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

Om tot een objectief resultaat te komen, is het belangrijk om de lijnvoering 'from scratch' te ontwerpen, zodat de invloed van bestaande elementen in de lijnvoering worden beperkt. Daarnaast zal gedefinieerd moeten worden wat een optimale lijnvoering is. Aan welke criteria moet voldaan worden en hoe zwaar wegen die criteria? 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.

2 Lijnvoering in het ontwerpproces van een dienstregeling

Doel is het ontwerp van een geïntegreerde lijnvoering voor zowel het korte, middellange als lange afstandsverkeer. Exacte rijtijden liggen in een lijnvoering nog niet vast, maar wel routes en frequenties. Daarmee bevinden we ons in de strategische fase van het ontwerpproces (zie figuur 1).

De vervoersvraag van het afgelopen jaar is bekend. Met behulp van deze vervoersvraag worden ook vervoersprognoses voor toekomstige jaren gemaakt. De vervoersprognose voor jaar X is input voor de ontwikkeling van een lijnvoering voor jaar X. Het verder uitwerken tot een dienstregeling met exacte rijtijden en met materieel- en personeelroosters valt buiten de strategische fase waarin de lijnvoering wordt ontwikkeld. Dit betekent dat in deze fase geen kant-en-klare dienstregeling zal worden opgeleverd. Dit geldt ook voor de toets of er voldoende capaciteit op de infrastructuur beschikbaar is.



Figuur 1: Ontwerpproces dienstregeling.

Het doel van deze fase moet zijn om veel alternatieven te kunnen vergelijken en afwegen en daardoor tot de juiste keuzes te kunnen komen. Daarom is het belangrijk dat in deze fase keuzes worden gemaakt in welke zaken écht noodzakelijk zijn om al uit te zoeken en welke niet. Wanneer deze keuzes niet worden gemaakt blijft het aantal te ontwikkelen en te ontwerpen lijnvoeringen beperkt en is de kans groot dat er kansen voor meer rendement over het hoofd worden gezien.

2.1 Complexiteit lijnvoeringsontwerp vraagt om modelondersteuning

Ondanks de vereenvoudiging van het vraagstuk in de strategische fase, door geen exacte rijtijden en infrastructuur in detail mee te nemen, blijft het vraagstuk complex. Het aantal mogelijke oplossingen voor bijvoorbeeld de Nederlandse situatie is eindeloos.

Als startpunt voor een ontwerp heb je een netwerk (de spoorlijnen) met daarop stations. Al deze stations moeten minimaal 1x per uur per richting door een trein worden aangedaan. Welke combinaties van stations in een lijn worden aangedaan ligt in principe niet vast. Ook is de lengte van een lijn en het maximaal aantal lijnen dat in een netwerk aanwezig mag zijn niet vastgelegd. Vervolgens kan per lijn gevarieerd worden in de frequentie (60/tijdsinterval in min. dat de treinen van een lijn een specifiek punt op de lijn passeren).

Figuur 2 illustreert heel treffend hoeveel mogelijke lijnen er zijn gegeven het aantal stations in een netwerk (nog los van de frequentie). Voor de Nederlandse situatie met ca. 400 stations is het aantal mogelijke lijnen een niet te bevatten getal. Vervolgens moet uit deze eindeloze set van lijnen nog een combinatie van lijnen worden gekozen (de lijnvoering) die het beste past bij de gegeven vervoersvraag. Ook hier zijn er weer een niet te bevatten aantal mogelijkheden.

Aantal stations	Aantal mogelijke lijnen
2	1
3	6
4	24
8	1.792
10	11.520
20	49.807.360
50	689.613.692.900.000.000
400	xx

Figuur 2: Aantal mogelijke lijnen gegeven het aantal stations in het netwerk

Het mag duidelijk zijn dat het onmogelijk is om gewoonweg alle mogelijke combinaties door te rekenen en daaruit de beste te kiezen. Het toepassen van meer geavanceerde oplossingsmethoden is noodzakelijk om dit zogenaamde NP-volledige probleem op te lossen.

3. Genetisch algoritme

Het NP-volledige probleem is met een exacte oplossingsmethode niet oplosbaar. 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 3.

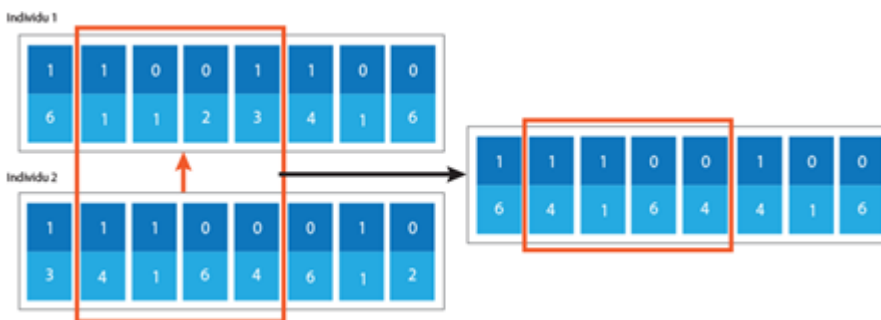
Alle lijnen (actief of niet-actief) kunnen worden gezien als kandidaatlijnen. Voor iedere kandidaatlijn geldt dat deze wel of niet kan worden opgenomen in de lijnvoering. De set van kandidaatlijnen moet dan ook alle mogelijk relevante lijnen omvatten.



Figuur 3: Terminologie Genetisch Algoritme

3.2 Het proces

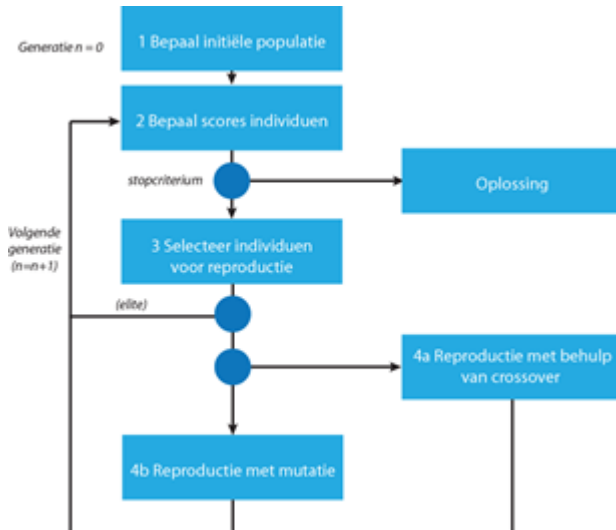
Eerst wordt een initiële populatie gegenereerd. Deze populatie bestaat uit een set van oplossingen (lijnvoeringen/individuen/chromosomen). Deze lijnvoeringen zijn willekeurig opgebouwd, door een willekeurig aantal kandidaatlijnen te activeren en willekeurige frequenties toe te delen aan de lijnen. Ieder individu wordt vervolgens met behulp van het beoordelingsmodel 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: cross-over of mutatie. In het geval van cross-over worden twee oplossingen gecombineerd. Uit deze twee oplossingen ontstaat een "kind" dat van beide ouders eigenschappen heeft. Zie figuur 4.



Figuur 4: Voorbeeld van reproductie met genetische modificatie: crossover

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 5.



Figuur 5: 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. Er 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. Ontwikkeling en kenmerken van het Lijnvoeringsmodel

Op basis van de probleembeschrijving en de voorgestelde genetische oplossingsmethodiek uit hoofdstuk 1, 2 en 3 is een prototype ontwikkeld [Guis, 2011]. Op basis van de positieve ervaringen met het prototype is de techniek doorontwikkeld en is een toepasbaar model gerealiseerd, het Lijnvoeringsmodel. In dit hoofdstuk wordt de ontwikkeling en de kenmerken van het Lijnvoeringsmodel nader beschreven.

4.1 Modeldoestelling

Aan de hand van de lijnvoering kunnen we voor elke relatie in het netwerk de klantattractiviteit bepalen. Dit doen we aan de hand van de reistijd, aantal overstappen en de frequentie van de reismogelijkheden op een relatie. Een klant attractieve lijnvoering probeert voor elke relatie een zo goed mogelijk product aan te bieden. Naast klantattractiviteit kunnen we een lijnvoering ook toetsen op kosten. Hier letten we op het benodigd materieel en personeel om de lijnvoering te kunnen uitvoeren. Het doel van het lijnvoeringsmodel is om een lijnvoering te construeren waarin zowel de klantattractiviteit als de kosten (beperking er van) worden geoptimaliseerd.

4.2 Modeluitwerking en input

Voor het zoeken naar een optimale lijnvoering maakt het model gebruik van een vooraf gedefinieerde kandidaat lijnen set. Een gevonden lijnvoering bestaat uit een selectie van een aantal van deze lijnen met voor elke lijn een frequentie. Aan de hand van de input wordt deze kandidaat lijnen set geconstrueerd. Elke gevonden lijnvoering wordt geëvalueerd op een aantal kenmerken waarmee we kunnen toetsen welke lijnvoering beter presteert dan de andere.

Station	Alle stations in het netwerk met de volgende kenmerken: <ul style="list-style-type: none">- Sprinter, intercity of twijfel- Start /eind punt sprinter lijn- Start /eind punt intercity lijn
Baanvak	Alle verbindingen tussen stations in het netwerk met de volgende kenmerken <ul style="list-style-type: none">- Lengte- Aantal sporen- Gem. rijsnelheid
HB matrix	Tabel met het aantal reizigers op elke relatie in het netwerk
Vaste lijnen	Lijnen als vast worden meegenomen in elke lijnvoering. Bijvoorbeeld van andere vervoerders of regionale concessie lijnen
Keringen	Locatie in het netwerk waar een trein mag keren
Referentie lijnvoering	Een referentie lijnvoering waarop het model vergelijkingen kan maken met de gevonden oplossingen

Tabel 1: Input voor het Lijnvoeringsmodel

4.3 Kandidaat lijnen

In theorie zijn er miljoenen verschillende lijnen te bedenken in het Nederlandse spoornetwerk (zie hoofdstuk 3) . Deze complete set bestaat uit een hoop onzinnige lijnen, daarom beperken we het aantal lijnen tot de voor ons zinnige lijnen. Deze lijnen worden gegenereerd aan de hand van een aantal regels.

Algemeen:

- Een lijn mag een station maar 1 keer passeren.
- Een lijn moet beginnen en eindigen in start/eind station.
- Een lijn mag maar op een aantal stations van richting veranderen (keren).
- Een lijn tussen twee stations mag een maximaal aantal kilometers langer zijn dan de kortste variant in het netwerk.

Sprinterlijn:

- Stopt op alle stations die worden gepasseerd op de lijn.
- De maximale lengte (120km).
- De maximale omweg (10km).

Intercitylijn:

- Stopt op alle intercity stations en kan stoppen op twijfel stations.
- De maximale omweg (25km).

Combilijn:

- Een lijn die is samengesteld uit deels een intercity lijn en deels een sprinterlijn, mag alleen beginnen/eindigen op intercity stations en een selecte groep sprinter stations.

Deze regels zijn aan te passen door de gebruiker waardoor er een andere set van kandidaat lijnen ontstaat. Modelmatig maakt het niet uit hoeveel en wat voor een kandidaat lijnen er worden meegegeven aan het model. Echter hoe groter de groep van kandidaat lijnen, hoe lastiger het wordt voor het model om een zinvolle lijnvoering te vinden (lees: langere rekentijd of überhaupt geen bruikbare oplossing).

4.4 Reismogelijkheden en reizigersverdeling

Voor een willekeurige lijnvoering berekent het model voor elke relatie de relevante reismogelijkheden. Elke reismogelijkheid krijgt een bepaald nut, afhankelijk van de reistijd, aantal overstappen en de frequentie. Aan de hand van dit nut, worden de reizigers op een relatie verdeeld over de verschillende reismogelijkheden. Voor deze berekeningen gebruikt het model dezelfde rekenmethode als het reizigersverdelingsmodel TRANS van NS en ProRail.

4.5 Optimalisatie

Doelen		Restricties	
GRT	↓	De totale gegeneraliseerde reistijd	Stations bediening Elk station moet bediend worden
Reizigersgroei	↑	De totale reizigersgroei in KM	Baanvak bediening Elk baanvak moet minimaal x keer per uur worden bediend
Aantal treinen	↓	Het aantal benodigde treinen	Baanvak belasting Maximaal aantal treinen per baanvak, afhankelijk van het aantal sporen
Aantal bakken	↓	Het aantal benodigde bakken	
Treinkilometers	↓	De totale hoeveelheid gemaakte treinkm's	
Rijtijd	↓	De totale rijtijd van de treinen	
Aantal stops	↓	Het totale aantal stops	
Turbulentie	↓	De hoeveelheid reizigers die er ten minste x minuten op achteruit gaan	
Overstappen	↓	Het gemiddeld aantal overstappen per reiziger	

Tabel 2: Doelen en restricties in het Lijnvoeringsmodel

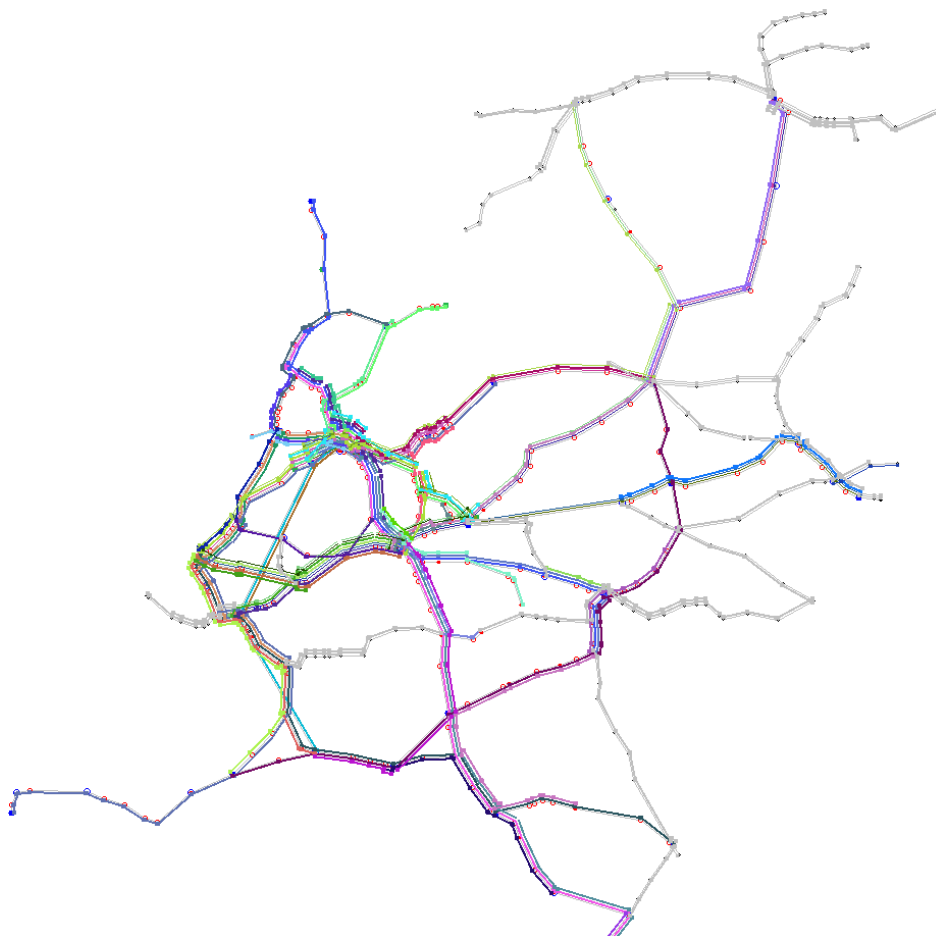
Het model maakt gebruik van een genetisch of evolutionair algoritme (zie hoofdstuk 3) bij het zoeken van een 'optimale' lijnvoering.

Een oplossing in het lijnvoeringsmodel representeert een lijnvoering, deze bestaat uit een aantal gekozen lijnen (uit de kandidaat lijnen set) met een bijbehorende frequentie. Een oplossing wordt op aan de hand van de volgende punten geëvalueerd. Daarin maken we onderscheidt tussen doelen en restricties.

We kunnen per doel een bepaald belang meegeven. Hierdoor kunnen we lijnvoeringen vinden waar bijvoorbeeld een verbetering van de klantattractiviteit als doel wordt gesteld (hoge waarde hechten aan GRT en reizigersgroei) of een lijnvoering waar we op de kosten letten (hoge waarde hechten aan aantal treinen en bakken). Deze set met doelen en restricties is niet definitief en kan gaandeweg het onderzoek nog worden uitgebreid.

4.5 Het resultaat

Het model geeft als resultaat een lijnvoering terug (figuur 6) waarin wordt voldaan aan de restricties en een poging is gedaan om de gestelde doelen zo goed mogelijk te vertegenwoordigen. Door het karakter van de toegepaste optimalisatie techniek kunnen we niet stellen of de gevonden oplossing ook "optimaal" is binnen het vastgestelde kader van doelen.



Figuur 6: Visualisatie modelresultaat

Zoals eerder al werd vermeld is de gevonden lijnvoering niet één op één te implementeren in de praktijk. Hieronder een aantal punten waar (op dit moment) geen rekening mee wordt gehouden:

- Het model levert een lijnvoering zonder tijdligging.
- Het model kijkt alleen naar het aantal treinen op een baanvak, niet of de combinatie Intercity/Sprinter wel past op het baanvak binnen een dienstregeling
- Het model kijkt niet naar de stations bezetting.
- Het model houdt geen rekening met het bestaande materieelpark (aantal Intercity/Sprinter materieel)

5. Modelresultaten en doorontwikkeling

Inmiddels is er ruim een jaar ervaring opgedaan met het toepassen van het model. In diverse projecten heeft het model als pilot meegedraaid en daarmee aanvullende en ondersteunende informatie opgeleverd. In de eerste pilot werden vooral waardevolle ideeën opgedaan om mee te nemen in de verdere lijnvoering ontwikkeling. In latere studies heeft het model geholpen bij het snel kunnen beoordelen van verschillende lijnvoeringsvarianten.

De belangrijkste resultaten op een rij:

- **Optimalisatie**
Het model vindt vrijwel altijd een betere oplossing dan vooraf bedacht. Bij de start van het project waren er twijfels of het model wel betere oplossingen zou vinden en erg snel in een lokaal optimum zou belanden dat slechter presteerde dan de 'met de hand' bedachte lijnvoeringen. De gevonden resultaten worden door 'experts' herkend en logisch bevonden.
- **Snelheid**
Het model komt in circa 1 dag rekenen met bruikbare resultaten. Gelet op het aantal benodigde berekeningen en iteraties is dit een prestatie. Omdat benodigde rekestijd tot 1 dag/nacht is beperkt is het model praktisch toepasbaar: 's middags zet je het model aan, de volgende ochtend heb je resultaten.
- **Flexibiliteit**
Inputwaarden en doelstellingen zijn naar wens van de gebruiker aan te passen. Zo kun je lijnen, die je niet wilt wijzigen 'vastzetten', zodat het model alleen met de overige lijnen optimaliseert. Maar ook kan het model worden gebruikt om aangedragen lijnvoeringen door te rekenen zonder gebruik te maken van de optimalisatiekern. Hierdoor wordt het mogelijk om veel sneller lijnvoeringen op opbrengsten, turbulentie en kosten met elkaar te kunnen vergelijken.

De bevindingen bij toepassing van het model zijn ook gebruikt om het model door te ontwikkelen. Op basis van de pilots worden er op de volgende punten verbeteringen aan het model aangebracht:

- Analyse van modelvoorstellen
Momenteel kost het nog veel tijd om te zien en te begrijpen welke aanpassingen en verbetervoorstellen het model doet en waarom. Om deze analyse eenvoudiger te maken zal het model hiervoor van hulpmiddelen worden voorzien.
- Bepaling materieelbehoefte aan de hand van het spitsvolume
Momenteel leidt het model nog synthetisch een spits af. Door het model direct van de reizigersvolumes in de spits te voorzien kan de materieelbehoefte nauwkeuriger worden vastgesteld.

6. Literatuur

- Ben-Akiva en Lerman (1985) Discrete Choice analysis: theory and application to travel demand, Massachusetts: The Massachusetts Institute of Technology.
- Bielli, M., Caramia, M. en Carotenuto, P. (2000) Genetic Algorithms in bus network optimization, Transport Research Part C (10), pp. 19-34.
- Bussieck, M. (1998) Optimal Lines in Public Transport, Universität Braunschweig.
- Eck, G. van (2010) Ontwerp van stedelijke openbaar vervoer netwerken, bijdrage Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2010, www.cvs-congres.nl, Stichting CVS
- Van Nes, R. (2002) Design of multimodal transport networks, A hierarchical approach, TRAIL-Thesis series T2002/05, DUP Science, Delft.
- Guis, N. Keizer, B. de. , Nes, R van. (2011) Lijnvoering van de toekomst voor het Nederlandse spoornetwerk, Verkenning met een genetisch optimalisatiemodel. bijdrage Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2011.