

Opsporen van sneller en beter

modelling through...

Rede, in verkorte vorm uitgesproken bij de aanvaarding van het
ambt van bijzonder hoogleraar aan de Faculteit der Bedrijfskunde,
vanwege de Vereniging Trustfonds Erasmus Universiteit,
met als leeropdracht Bedrijfskunde, in het bijzonder de
Kwantitatieve Analyse van Logistieke Netwerken

21 September 2001
Prof. dr. L.G. Kroon

Erasmus Universiteit Rotterdam
Rotterdam School of Management / Faculteit Bedrijfskunde
Postbus 1738
NL-3000 DR Rotterdam
l.kroon@fbk.eur.nl

POTTER: Waarom ga je niet iets nieuws doen? Iets timmeren of zo.
GRUNT: Wat zou ik dan kunnen timmeren?
POTTER: Nou, bijvoorbeeld een nachtkastje.
GRUNT: Maar hoe kom ik dan aan hout?
POTTER: Je hoeft niet iets te timmeren. Je kan ook iets anders doen.
GRUNT: Iets anders, hoe bedoel je?
POTTER: Nou, groenten verbouwen, of zoiets.
GRUNT: Maar hoe kom ik dan aan een stukje grond?
POTTER: Ja, hoor eens. Ik geef alleen maar iets aan.
Je moet het verder zelf invullen.

Naar: Alex van Warmerdam, Zie de mannen vallen.

Voor Pluizin

Erasmus Research Institute of Management (ERIM)
Erasmus University Rotterdam
Internet: www.erim.eur.nl

Inaugural Addresses Research in Management Series

Reference number ERIM: EIA-2001-03-LIS

ISBN 90-5892-010-0

© L.G. Kroon, 2001

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any electronic or mechanical means, including photocopying and recording, or by any information storage and retrieval system, without permission from the author.

Rector Magnificus, waarde collega's, dames en heren.

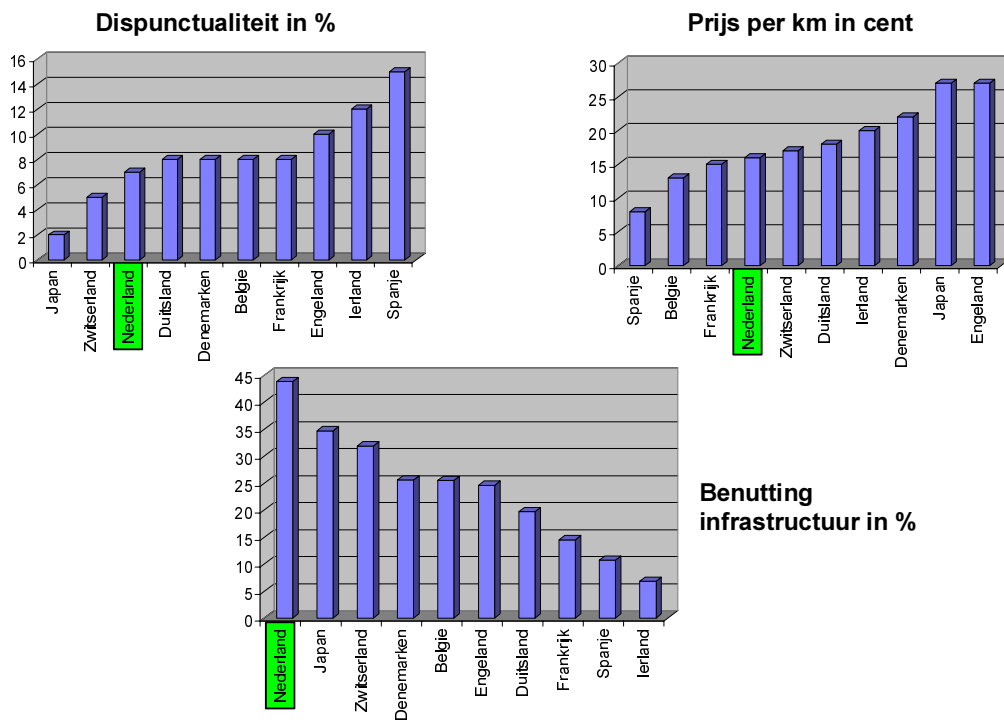
Het ligt voor de hand dat ik het in dit academische uurtje zal hebben over het reizigersvervoer per trein. Dat lijkt een eenvoudige opgave, want dat is een zeer actueel onderwerp. Er gaat bijna geen dag voorbij of het wordt wel genoemd in de media: te lage *punctualiteit*, tekort aan *materieel* en *personeel*, *Rondjes om de Kerk*, *blaadjes op de rails*, *zomer- en winterdienstregeling*, *agressie* in de trein, een *tweesporenbeleid* van de overheid dat beter een *viersporenbeleid* had kunnen zijn, en zo kan ik nog wel even doorgaan. Kortom, genoeg voor wel 5 oraties.

Ik heb dus een keuze moeten maken. Gezien de aard van de leerstoel, en gezien mijn werkzaamheden bij de afdeling Logistiek van NS Reizigers, ligt het voor de hand dat ik het zal hebben over de *logistiek* en de *planning* van het reizigersvervoer per trein. En dan niet zozeer op de *lange* termijn, maar eerder op de relatief *korte* termijn. Ook dat is een zeer complexe aangelegenheid die veel ruimte biedt voor wetenschappelijk onderzoek. Te gemakkelijk wordt soms door de *16 miljoen directieleden* van de Nederlandse Spoorwegen verondersteld dat op relatief simpele wijze aanzienlijke verbeteringen op het spoor gerealiseerd kunnen worden. Maar het gaat hier niet om een modelspoorbaan. *Märklin management* is leuk, maar niet bruikbaar in de praktijk. Enkele globale cijfers, die een indruk geven van wat relevante logistieke kwantiteiten, staan weergegeven in de volgende lijst:

1.000.000 reizigers per werkdag	14.760.000.000 reizigerskilometers per jaar
2800 kilometer spoor	2700 bakken (wagons)
5000 treinritten per werkdag	3000 machinisten
90 treinseries (lijnen)	4000 conducteurs en treinsurveillanten

En hoewel de media ons graag anders willen doen geloven, moeten de problemen op het spoor nu ook weer niet overschat worden. Er gaat natuurlijk *veel* te *veel* fout, dat is beslist waar. Maar er gaat nog veel meer goed, en dat wordt meestal nogal gemakkelijk vergeten. Het is daarom nuttig om de situatie op het spoor in Nederland eens te vergelijken met die in het buitenland.

Uit de in Figuur 1 getoonde grafieken, daterend van December 2000, blijkt dat Nederland op de gebieden *punctualiteit* en *prijs per reizigerskilometer* steeds bij de kopgroep hoort. Zeker wanneer daarbij tevens bedacht wordt dat de *benutting van de infrastructuur* in Nederland veel hoger is dan elders. Vooral dat laatste zorgt voor extra afhankelijkheden in het systeem, die de punctualiteit zeker niet ten goede komen. Daarbij dient dan natuurlijk ook wel vermeld te worden dat in 2001 de punctualiteit er zeker niet op vooruit gegaan is ten opzichte van 2000.



Figuur 1: Internationale vergelijking

Maar het feit dat Nederland de vergelijking met het buitenland zeker kan doorstaan ontslaat ons natuurlijk niet van de verplichting om er alles aan te doen om de punctualiteit en de overige service verder te verbeteren. Op de relatief korte termijn zal dat het resultaat moeten zijn van *meer* materieel en personeel, van vergroting van de *betrouwbaarheid* van technische systemen (infrastructuur en materieel), en van *vereenvoudiging*, *standaardisatie*, en *ontkoppeling* van logistieke processen.

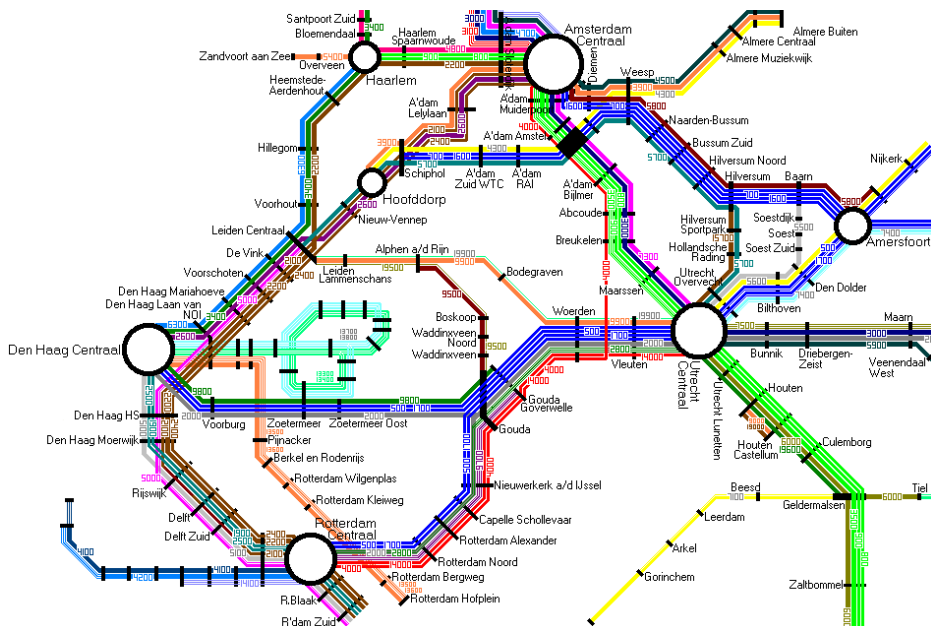
Vooral dat laatste is een belangrijk issue. Het spoorwegsysteem is in feite zo complex geworden dat het alleen daarom al moeilijk beheersbaar is. Vereenvoudiging, standaardisatie en ontkoppeling van logistieke processen zullen daarom noodzakelijk zijn. Deze punten kunnen het beste duidelijk worden gemaakt door in te gaan op de complexiteit van de *logistiek* van het spoorwegsysteem, en in het bijzonder op de complexiteit van de *planning* die daaraan ten grondslag ligt. Tevens zal ik proberen te schetsen hoe met behulp van wetenschappelijke methoden en technieken het logistieke planningsproces ondersteund kan worden.

Huidige situatie

Om te beginnen zal ik een beeld schetsen van de huidige situatie, in het bijzonder de *lijnvoering*, de *dienstregeling*, de *materieelinzet*, en de *personeelinzet*. De voor de reiziger het meest in het oog springende onderdelen daarvan zijn natuurlijk de lijnvoering en de dienstregeling, want die bepalen zijn of haar reismogelijkheden. Zij zijn in feite de *catalogus* met de producten waaruit de reiziger kan kiezen.

Lijnvoering

In Figuur 2 is een deel van de huidige (2001-2002) *lijnen* van NS Reizigers in de Randstad schematisch weergegeven. Iedere lijn heeft een beginpunt, een eindpunt, een frequentie, en een bepaald type (Intercity, Sneltrain, of Stoptrein). De verschillende kleuren in de figuur representeren de verschillende lijnen.



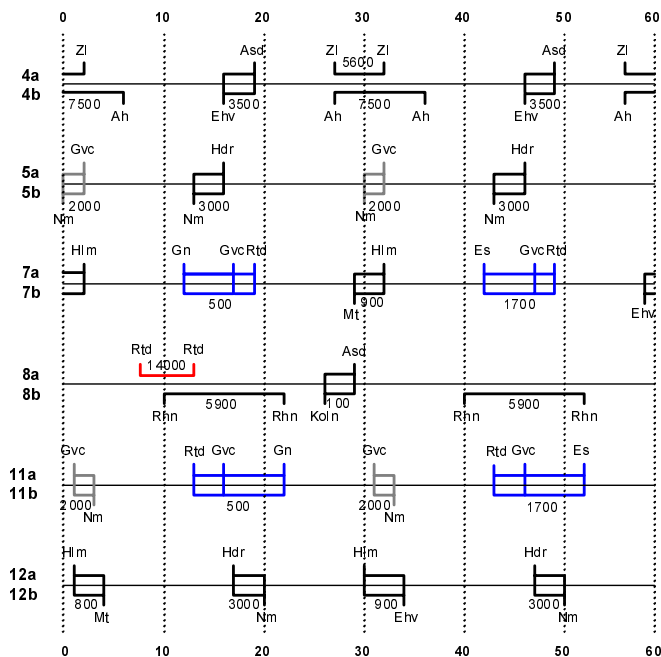
Figuur 2: De lijnen van NS Reizigers in de Randstad

Zo geven de blauwe lijnen de Intercities weer, die het noorden (Groningen, Leeuwarden, en Zwolle) en het oosten (Deventer en Enschede) van het land verbinden met de Randstad (Rotterdam, Den Haag, Utrecht, Amsterdam, en Schiphol). Deze verbindingen samen heten ook wel de *Noord-Oost*. Verder geven

Een dergelijke dienstregeling voor een standaard uur heet ook wel een *Basis Uur Patroon* (BUP), en de grafiek heet ook wel een *tijd-weg-diagram*. In horizontale richting staat de *tijd* uitgezet, en in verticale richting de *weg*. Iedere schuine lijn geeft een treinbeweging weer als een relatie tussen tijd en plaats. Zo geven de blauwe lijnen de eerder genoemde Intercities van de Noord-Oost weer. De Intercities van en naar Rotterdam stoppen alleen in Rotterdam Alexander, hetgeen blijkt uit het feit dat alleen in Rotterdam Alexander de tijd doorloopt, en de plaats gelijk blijft. De Intercities van en naar Den Haag rijden even voorbij Gouda (bij Moordrecht Aansluiting) van het baanvak Utrecht - Rotterdam af. De rode lijnen geven de eerder genoemde stoptreinen van de treinseries 4000 en 14000 weer.

Basis Spoor Opstelling

De grafiek in Figuur 4 geeft een deel van de *Basis Spoor Opstelling* (BSO) voor het station Utrecht Centraal weer. In horizontale richting staat weer de *tijd* uitgezet, maar in verticale richting staat nu een deel van de *perrons* van Utrecht Centraal.



Figuur 4: Een deel van de Basis Spoor Opstelling voor Utrecht Centraal

De grafiek geeft aan wanneer de verschillende perrons bezet zijn. Ook in deze grafiek komen de Intercities van de Noord-Oost weer voor. Er is hier te zien dat de Intercities vanuit Rotterdam en Den Haag aankomen op de sporen 11a en 11b: eerst het Rotterdamse deel, en drie minuten later het Haagse. Na het combineren van de twee delen rijden ze als één trein door naar Groningen (en Leeuwarden) of naar Enschede. Op de terugweg worden de Intercities uit Enschede of Groningen (en Leeuwarden) gesplitst op de sporen 7a en 7b. Vervolgens vertrekt het Haagse deel het eerst, twee minuten later gevolgd door het Rotterdamse. In de grafiek is de *kering* van de treinen van de treinserie 14000 op spoor 8a in rood weergegeven.

Materieelinzet

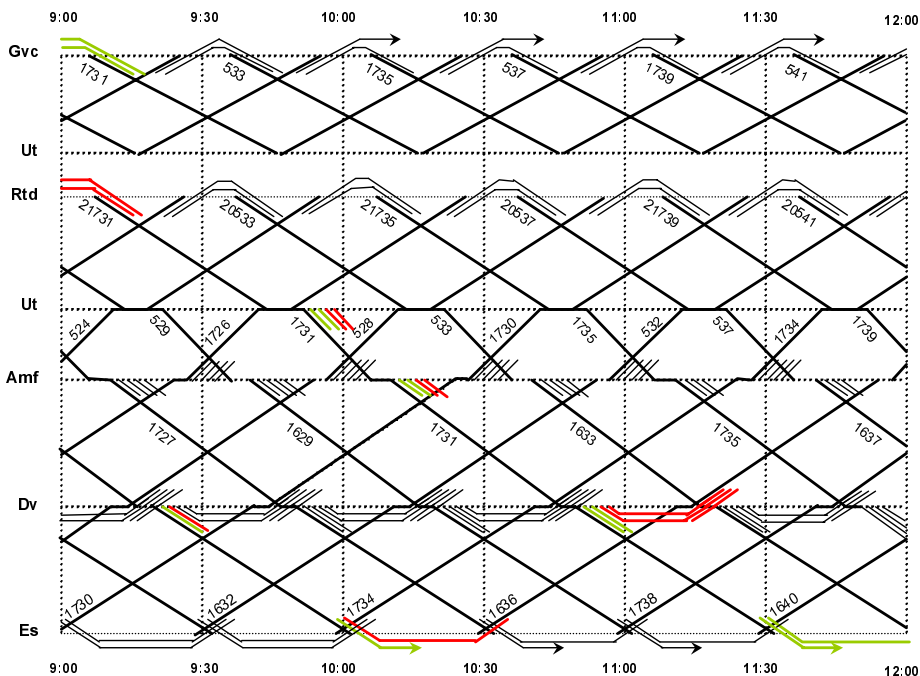
Dan komen we bij de *inzet van materieel*. Er bestaan vele soorten materieel. Figuur 5 geeft een voorbeeld: een zogenaamde *Koploper* met drie bakken, een *Drietje*. Koplopers bestaan ook met vier bakken. Dergelijke materieeleenheden vormen de puzzelstukken bij de materieelinzet. Figuur 6 toont vervolgens de materieelinzet op een deel van de treinen van de Noord-Oost. Er is hier geen sprake meer van een standaard uur: de verschillende uren van de dag zijn nu in horizontale richting achter elkaar te zien. Dit heeft te maken met de *spits*- en *daluren*, die verschillende *vervoerscapaciteiten* en daarmee verschillende *materieelsamenstellingen* vragen.



Figuur 5: Een Koploper met drie bakken (een *Drietje*)

In de grafiek representeert iedere gekleurde lijn één treinstel: rode lijnen zijn Drietjes, en groene lijnen zijn Viertjes. Voor de duidelijkheid is overigens slechts een deel van de treinstellen ingekleurd. De 21731 vertrekt om 9:07 uur vanuit Rotterdam met twee Drietjes en komt om 9:43 in Utrecht aan. De 1731 vertrekt om 9:08 uur vanuit Den Haag met twee Viertjes en komt om 9:46 in Utrecht aan.

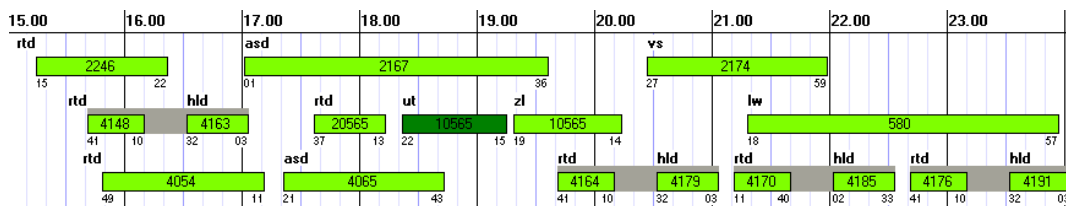
Zoals eerder is aangegeven, worden deze twee treinen in Utrecht gecombineerd tot één trein met 14 bakken, en daarna rijden ze gezamenlijk door als de 1731 in de richting van Deventer en Enschede. De grafiek laat zien dat er in Deventer twee Drietjes worden *afgetrapt* die vervolgens weer op de 1636 worden *bijgeplaatst*. De 1636 rijdt vanuit Deventer in de richting van Amsterdam en Schiphol. De rest van de 1731 rijdt vanuit Deventer door naar Enschede. De inzet van het materieel op de verschillende treinen dient zodanig te zijn dat alle reizigers zo veel mogelijk volgens de comfortnormen vervoerd kunnen worden.



Figuur 6: Materieelinzet op een deel van de Noord-Oost

Personeelinzet

Tenslotte dient iedere trein nog voorzien te worden van *personeel*: een machinist en één of meer conducteurs (of treinsurveillanten). In Figuur 7 worden drie *diensten* voor machinisten van de standplaats Rotterdam schematisch weergegeven.



Figuur 7: Diensten voor machinisten van de standplaats Rotterdam

In horizontale richting staat de *tijd*, en in verticale richting staan drie diensten. De eerste dienst is een Intercitydienst: eerst op de 2246 naar Amsterdam, vervolgens op de 2167 naar Vlissingen, en tenslotte op de 2174 terug naar Rotterdam. De

tweede dienst is een gemengde dienst: eerst een stoptreinslag op de 4100 treinserie naar Hoek van Holland, en vervolgens op de 500 treinserie heen en weer naar Leeuwarden. De derde dienst is een stoptreindienst, bestaande uit een slag van Rotterdam naar Amsterdam op de stoptreinen 4054 en 4065 uit de 4000 treinserie, en daarna drie slagen van Rotterdam naar Hoek van Holland op de 4100 treinserie.

Topje van de ijsberg

De voorgaande beschrijving van de huidige situatie is in feite alleen maar het topje van de ijsberg. In de eerste plaats zijn er nog verschillende andere onderdelen van de planning, zoals de onderhoudsplanung en de rangeerplanung. Verder wordt het hele logistieke planningsproces in verschillende termijnen uitgevoerd, namelijk Product Ontwerp, Jaarplan, Dagplan, en Bijsturing. Tenslotte bestaat ook nog het onderscheid tussen de Centrale Planning en de Lokale Planning. Maar ik zal hier nu niet verder op in gaan: het is zo al ingewikkeld genoeg.

Conflicterende doelstellingen

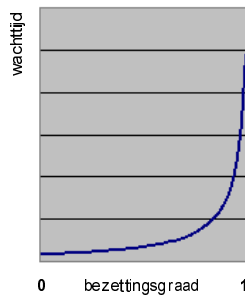
De planning en de uitvoering van het spoorwegsysteem dienen er op gericht te zijn om de *Reis van de Klant* zo goed mogelijk te faciliteren. Wanneer ik me beperk tot de *Treinreis van de Klant*, dan spelen vooral de volgende logistieke aspecten een belangrijke rol: een *korte reistijd*, zo veel mogelijk *rechtstreekse verbindingen*, *hoge frequenties*, een *hoge punctualiteit*, en een *grote zitplaatskans*. Daarnaast spelen ook andere aspecten een rol, zoals perfecte *informatie* en gunstige *tarieven*.

Het realiseren van al deze aspecten tegelijkertijd is echter de *kwadratuur van de cirkel*, zeker op de korte termijn. Dit komt doordat in de huidige situatie in ieder geval de logistieke doelstellingen met elkaar conflicteren. Er is in feite sprake van een *overbepaald* systeem met meer *beperkingen* dan *variabelen*, en dat leidt meestal niet tot een toegelaten oplossing. Ik zal een aantal voorbeelden geven:

Voor al een zo kort mogelijke reistijd is heel belangrijk. Maar een korte reistijd vergt *hoge snelheden*, weinig *haltingen*, veel *rechtstreekse verbindingen*, en veel *gegarandeerde aansluitingen*. Maar hoge snelheden, en vooral hoge *snelheidsverschillen*, conflicteren in de huidige situatie met hoge frequenties. En veel rechtstreekse verbindingen vergen lange lijnen en veel haltingen. Maar lange lijnen zijn weer slecht voor de punctualiteit, en veel haltingen zijn slecht voor de reistijden. Tenslotte zijn ook veel gegarandeerde aansluitingen slecht voor de punctualiteit, en staan ze een efficiënt gebruik van de infrastructuur in de weg.

Al met al zijn de genoemde aspecten niet realiseerbaar zonder forse uitbreidingen, zowel in de *infrastructuur*, het *materieel* als het *personeel*: alleen

een systeem waar voldoende *slack* in zit kan flexibel functioneren en accomoderen onder veranderende omstandigheden. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 8, die de globale relatie aangeeft tussen de bezettingsgraad van een systeem en de daaruit resulterende totale wachttijd in het systeem. Dit is een bekende figuur uit de *wachttijdtheorie*, die op veel processen min of meer van toepassing is. Maar van slack in het spoorwegstelsel is momenteel zeker geen sprake. Het tekort aan materieel en personeel is momenteel helaas maar al te duidelijk. En ook de infrastructuur wordt zeer intensief gebruikt, zoals al eerder bleek uit Figuur 1.



Figuur 8: Wachttijd versus bezettingsgraad in een systeem

En verder: wie met zijn auto op de snelweg stilstaat, krijgt direct een bekeuring. Maar op het spoor is stilstaan op de snelweg de praktijk van alledag. Immers, veel haltes liggen direct aan de *vrije baan*, en dat is natuurlijk een zeer ongewenste situatie. Er zullen daarom in ieder geval extra *inhaalconstructies* bij zulke haltes nodig zijn. Maar die zorgen weer voor meer *afhankelijkheden* in het systeem, en niet voor de gewenste logistieke *vereenvoudiging* en *ontkoppeling*.

Een aantal van de bovenstaande aspecten wordt beschreven in het rapport *Groeisporen* dat het afgelopen voorjaar door Railforum gepresenteerd is. Hierin worden *homogenisering* van de Intercities en de stoptreinen en extra *inhaalconstructies* gepropageerd als middelen om op korte termijn de capaciteit van de infrastructuur te vergroten. Helaas wordt daarbij ook gemeld dat deze maatregelen *niet* tot een *verbetering* van de punctualiteit zullen leiden. En afgezien daarvan is de capaciteit van de *knooppunten* in het rapport nauwelijks aan de orde gekomen, terwijl de knooppunten, waarschijnlijk veel meer nog dan de baanvakken, momenteel de *bottlenecks* in het spoorwegstelsel vormen.

Mijn conclusie is daarom dat dergelijke *halve* maatregelen, zeker op de langere termijn, onvoldoende zullen zijn, en dat er veel méér nodig is, bij voorkeur

viersporigheid in grote delen van de brede Randstad, alsmede uitbreiding van de *knooppuntcapaciteiten*. Het kost een paar centen, maar je hebt dan tenminste ook wat moois: viersporigheid leidt namelijk tot *meer* dan tweemaal zo veel capaciteit als tweesporigheid, doordat het homogenisering van de snelheden *per spoor* mogelijk maakt zonder aanpassing van de rijtijden of van het halteringsregime. Maar dat is alleen zinvol als *ook* de knooppuntcapaciteiten uitgebreid worden.

Maar het voorgaande gaat vooral over het *spoorwegsysteem* zelf, en daar wil ik het eigenlijk niet over hebben. De rest van dit uur wil ik het vooral hebben over het *logistieke planningsproces* dat aan het spoorwegsysteem ten grondslag ligt.

Modelmatige ondersteuning van de planning

De eerder getoonde plannen worden voor een groot deel gemaakt bij de afdeling Logistiek van NS Reizigers, de *centrale keuken* van de Nederlandse spoorwegwereld. Deze afdeling wordt ook wel de *puzzelfabriek* genoemd. Het zal duidelijk zijn dat het in elkaar zetten van dergelijke plannen een complexe aangelegenheid is die veel tijd kost, niet alleen door de *omvang* en de *complexiteit* van de plannen, maar ook door hun sterke onderlinge *verwevenheid*.

Tot dusverre is een groot deel van de planning gebaseerd op het *vakmanschap* en de *ervaring* van de planners van de genoemde afdeling. Computers spelen daarbij op dit moment een onmisbare rol, namelijk bij het *vastleggen*, *presenteren*, *controleren*, en *distribueren* van de plannen. Maar het echte *puzzelwerk* wordt op dit moment voor een groot deel nog door de planners zelf gedaan, waarbij *potlood* en *papier* nog steeds onmisbare resources vormen. Aan de andere kant zijn er inmiddels ook enkele stappen vooruit gezet in het ontwerpen van dergelijke plannen *door* de computer. Maar er blijft ook nog heel veel te doen op dat gebied.

In feite is het natuurlijk nauwelijks meer denkbaar dat in deze tijd, waarin computers bijna alom vertegenwoordigd zijn, deze computers niet in staat zouden zijn om een meer *actieve* rol bij het ontwerpen van de plannen voor het spoorwegsysteem te spelen. En wenselijk is dat natuurlijk ook. Als computers daarbij inderdaad een meer actieve rol zouden spelen, dan zou dat aan de ene kant wellicht leiden tot *betere* plannen, en aan de andere kant tot een *verkorting* van de doorlooptijd van het planningsproces. En een kortere doorlooptijd is vooral van belang voor de *flexibiliteit* van het hele systeem: hoe korter de doorlooptijd, hoe sneller er op veranderingen in de vervoersmarkt ingespeeld kan worden.

Aan de andere kant is het van belang rekening te houden met het feit dat dergelijke planningsproblemen van sterk *combinatorische* aard zijn, en dat ze daarmee in het algemeen moeilijk oplosbaar zijn. Ze behoren tot de klasse van de

zogenaamde *NP-moeilijke* problemen. Dat kan in de praktijk de oplosbaarheid van deze problemen aardig in de weg staan. Om daar oplossingen voor te bedenken is interessant wetenschappelijk onderzoek noodzakelijk dat uitstekend aan deze universiteit, de *E-rasmus Universiteit*, uitgevoerd kan worden.

Een ander belangrijk punt is het feit dat het maken van plannen natuurlijk *geen doel* op zich is. De plannen dienen vooral als *hulpmiddel* om structuur te geven aan de dienstverlening aan de reizigers, en aan de logistieke organisatie daarvan. Voor de dienstverlening aan de reizigers zijn de lijnvoering en de dienstregeling natuurlijk essentieel: reizigers weten daardoor in principe wat ze kunnen verwachten. Wat dat betreft zijn de materieelinzet en de personeelinzet minder belangrijk: die dienen vooral voor de *interne* logistiek. Bijvoorbeeld de materieelinzet zou daarom wellicht ook *minder gepland* en *meer aan de bijsturing* overgelaten kunnen worden. Daardoor zou meer op de *actuele* vervoersvraag ingespeeld kunnen worden. En misschien geldt hetzelfde tot op zekere hoogte ook wel voor de lijnvoering en de dienstregeling. Dit zijn belangrijke vragen voor de toekomst die de laatste tijd in de spoorwegwereld circuleren. Aan de beantwoording daarvan wil ik mij echter niet wagen. Ik ga er hier van uit dat de aard van de plannen *grosso modo* hetzelfde blijft, maar ik wil daarbij schetsen hoe die plannen wellicht op een meer efficiënte en effectieve wijze tot stand kunnen komen. In de volgende secties zullen daartoe enkele voorbeelden van het langs automatische weg genereren van plannen uitgewerkt worden.

Dienstregeling

Het eerste voorbeeld heeft betrekking op het geautomatiseerd ontwerpen van een dienstregeling. Ofwel: hoe zorg je ervoor dat een computer min of meer zelfstandig een dienstregeling in elkaar kan zetten. Wiskundige modellen zijn daarbij onmisbaar. Die geven aan welke keuzemogelijkheden er beschikbaar zijn, aan welke beperkingen voldaan moet worden, en welk doel nagestreefd wordt.

Het plannen van een dienstregeling betekent in feite niets anders dan dat voor alle te rijden treinen geschikte *aankomst-* en *vertrektijden* op de relevante stations en geschikte *doorkomsttijden* op de andere relevante dienstregelpunten worden vastgesteld. Daarnaast dient voor alle treinen ook een geschikte *routing* door die stations te worden gepland. In het onderstaande zal aan de hand van enkele voorbeelden uitgelegd worden aan welke beperkingen de aankomst- en vertrektijden van de treinen in het spoorwegsysteem *tenminste* dienen te voldoen.

De Intercity 21731 rijdt bijvoorbeeld van Rotterdam naar Utrecht. In Utrecht wordt deze trein gecombineerd met de 1731 uit Den Haag. De gecombineerde trein heet na Utrecht de 1731, en rijdt via Amersfoort en Deventer door naar Enschede.

De rijtijd van de 21731 over het baanvak Rotterdam-Utrecht dient tussen de 35 en de 37 minuten te liggen. Vervolgens heeft de 21731 in Utrecht een haltering van 8 of 9 minuten in verband met het combineren met de 1731. Deze treimbewegingen van de 21731 kunnen als volgt in wiskundige termen worden weergegeven:

$$35 \leq A_{21731,Ut} - V_{21731,Rtd} \leq 37 \quad 8 \leq V_{1731,Ut} - A_{21731,Ut} \leq 9$$

In deze beperkingen zijn $V_{21731,Rtd}$, $A_{21731,Ut}$, en $V_{1731,Ut}$ beslissingsvariabelen die voor de 21731 achtereenvolgens de vertrektijd uit Rotterdam, de aankomsttijd in Utrecht, en de vertrektijd (van de gecombineerde 1731) uit Utrecht weergeven. Deze notatie zal in het vervolg steeds gehanteerd worden. De genoemde beperkingen zijn de zogenaamde *rijtijd*- en *halteringsbeperkingen*.

Zoals gezegd, wordt de 1731 in Utrecht gecombineerd met de 21731. Dat kan natuurlijk alleen als de 1731 kort na de 21731 in Utrecht arriveert, zeg 3 of 4 minuten na de 21731. Met andere woorden:

$$3 \leq A_{1731,Ut} - A_{21731,Ut} \leq 4$$

Dit zijn de zogenaamde *aansluitingsbeperkingen* voor *materieel*. Verder willen we graag een regelmatige dienstregeling hebben. De Noord-Oost, waar de 21731 deel van uitmaakt, heeft op al haar baanvakken een frequentie van 2 treinen per uur in beide richtingen. De vertrektijd uit Utrecht van de volgende trein in de Noord-Oost, de 533, dient derhalve precies een half uur na die van de 1731 te liggen. Dat kan als volgt in wiskundige termen worden weergegeven:

$$V_{533,Ut} - V_{1731,Ut} = 30$$

Deze beperkingen zijn de zogenaamde *frequentiebeperkingen*. Verder rijdt de 3031 van Den Helder naar Nijmegen via Amsterdam, Utrecht, en Arnhem. Voor reizigers van Rotterdam naar Nijmegen wordt in Utrecht een aansluiting gespecificeerd tussen de 21731 en de 3031. Dat kan als volgt beschreven worden:

$$5 \leq V_{3031,Ut} - A_{21731,Ut} \leq 8$$

Ofwel, het tijdsinterval tussen de aankomst van de 21731 in Utrecht en het vertrek van de 3031 uit Utrecht moet liggen tussen 5 en 8 minuten. Dit zijn de zogenaamde *aansluitingsbeperkingen* voor *reizigers*. Bij voorkeur zal de aansluiting twee kanten op moeten zijn, en zal de gespecificeerde aansluiting een *cross-platform* aansluiting moeten zijn. Maar dat laatste gaat in dit model natuurlijk pas echt een rol spelen bij het *routeren* van de treinen door het station heen.

De lastigste beperkingen zijn de infrastructurele beperkingen die ervoor moeten zorgen dat er altijd voldoende opvolgtijd bewaard wordt tussen twee treinen op

hetzelfde baanvak. Tussen Rotterdam en Utrecht rijdt bijvoorbeeld behalve de 21731 ook de 4030, de stoptrein Rotterdam-Amsterdam (via Gouda, Woerden, en Breukelen). Deze trein zal overal, en dus in het bijzonder bij vertrek uit Rotterdam, een opvolgtijd van 3 minuten moeten hebben met de 21731. Deze beperkingen zijn lastig omdat ze zeggen dat het verschil tussen de vertrektijden uit Rotterdam juist *niet* in het interval van -3 tot 3 mag liggen. Het een en ander kan uitgedrukt worden met behulp van de volgende beperkingen:

$$3 - 60X \leq V_{4030, \text{Rtd}} - V_{21731, \text{Rtd}} \leq 57 - 60X$$

Hierbij is X een binaire variabele die de waarde 0 of 1 kan aannemen, en die gebruikt kan worden om het *of-of* karakter van deze beperkingen te beschrijven. Als $X = 0$, dan eist de eerste van deze beperkingen dat de 4030 tenminste 3 minuten en ten hoogste 57 minuten na de 21731 uit Rotterdam vertrekt. Als $X = 1$, dan dient het omgekeerde te gelden. Deze beperkingen zijn de zogenaamde *opvolgbeperkingen*. Voor het vertrek uit Gouda geldt iets dergelijks:

$$3 - 60Y \leq V_{4030, \text{Gd}} - V_{21731, \text{Gd}} \leq 57 - 60Y$$

Nu is Y een binaire variabele. Het aardige van deze modellering is dat de variabelen X en Y gebruikt kunnen worden om de structuur van de oplossing te sturen. Bijvoorbeeld, als $X = Y$ dan vertrekken de 21731 en de 4030 uit Gouda in dezelfde volgorde als waarin ze uit Rotterdam zijn vertrokken. Als $X \neq Y$ dan betekent dat dat in Gouda de volgorde van de twee treinen gewisseld is.

Uiteraard moeten ook voor alle andere treinen die in het systeem voorkomen de beslissingsvariabelen en de beperkingen voor de rijtijden, de haltingen, de frequenties, de aansluitingen, en de opvolgtijden worden opgesteld. Al met al leidt dat tot een wiskundig model, waarvan de aantallen variabelen en beperkingen al gauw in de duizenden kunnen lopen, uiteraard afhankelijk van het aantal treinen.

Voordat het model opgelost kan worden dient ook de *doelfunctie* opgesteld te worden. Immers: ieder *praktijkprobleem* is in principe een *optimalisatieprobleem*. Er zal in de praktijk *altijd* gezocht worden naar een oplossing die in zekere zin zo goed mogelijk is. In dit geval zou de doelfunctie bijvoorbeeld één of meer van de volgende aspecten kunnen uitdrukken:

- Minimaliseer de gemiddelde reistijden,
- Maximaliseer de robuustheid en de stabiliteit, en
- Maximaliseer de efficiency van het rollende materieel.

De details van de beschrijving van deze doelfuncties in termen van de beslissingsvariabelen zullen hier achterwege blijven. Het *oplossen* van het model is

de volgende stap: dit betekent dat aan alle beslissingsvariabelen van het model op een zodanige manier waarden worden toegekend dat aan alle beperkingen voldaan wordt, en dat de doelfunctie een optimale of bijna-optimale waarde bereikt. Binnen DONS is een *special purpose* solver, CONFLEX genaamd, beschikbaar, die gebruikt kan worden om het model op te lossen. Maar er zijn ook andere methoden denkbaar, bijvoorbeeld op basis van een *general purpose* solver zoals CPLEX.

In beide gevallen dient gebruik gemaakt te worden van verschillende wiskundige hoogstandjes om oplossingen voor het model uit te kunnen rekenen. Om even een idee te geven: *Constraint Satisfaction Programming*, *Netwerkoptimalisatie*, *Cycles in Constraint Graphs*, en *Cycle Bases*.

Routing van treinen door stations

Nadat de vertrek- en aankomsttijden van treinen op stations met behulp van het beschreven model zijn vastgesteld, dient ook gecontroleerd te worden of deze aankomst- en vertrektijden op de stations niet tot conflicten zullen leiden. Daarbij gaat het voor iedere trein niet alleen om het vinden van een *vrije plek* langs een geschikt perron, maar ook om een *conflictvrije route* van een zogenaamd IU-punt (In-Uit) naar het perron, en om een conflictvrije route van het perron naar het IU-punt bij vertrek. Het volgende voorbeeld geeft aan hoe ook deze problematiek gemodelleerd kan worden, waardoor het vervolgens geautomatiseerd opgelost kan worden. Er zal weer vooral ingegaan worden op de 21731 in Utrecht.

Voor iedere trein die door een station gerouteerd dient te worden kan op voorhand een lijst gemaakt worden van alle mogelijke routes door het station. De lijst van alle mogelijke routes voor de 21731 door het station Utrecht noemen we R_{21731} . Dat is dus de lijst van alle routes die beginnen bij het IU-punt vanuit Woerden, en via een perronspoor naar het IU-punt richting Amersfoort lopen.

De 21731 moet door het station gerouteerd worden. Dat wil zeggen dat precies één van de mogelijke routes geselecteerd moet worden. Voor ieder van de mogelijke routes dient derhalve aangegeven te worden of hij *wel* of *niet* geselecteerd wordt. Dat kan gedaan worden door voor iedere mogelijke route r een binaire variabele $X_{21731,r}$ te definiëren die de waarde 0 of 1 kan aannemen. De waarde 0 betekent dat route r niet gebruikt wordt door de 21731, en de waarde 1 betekent dat dat wel het geval is. Het kiezen van precies één route voor de 21731 kan nu als volgt in wiskundige termen worden weergegeven:

$$\sum_{r \in R_{21731}} X_{21731,r} = 1$$

Belangrijk is dat de voor de 21731 geselecteerde route geen conflicten heeft met andere treinen. Zo vertrekt de stoptrein 8826 van Utrecht naar Leiden even eerder

uit Utrecht dan de 21731 in Utrecht komt binnenrijden. Dus, als r_1 een geschikte route is voor de 21731, en r_2 een geschikte route voor de 8826, en als deze twee routes met elkaar conflicteren, gegeven de aankomsttijd van de 21731 en de vertrektijd van de 8826, dan kunnen deze twee routes niet tegelijkertijd geselecteerd te worden. Dat kan als volgt beschreven worden:

$$X_{21731,r_1} + X_{8826,r_2} \leq 1$$

Ofwel, als de 21731 aan route r_1 wordt toegewezen, dan kan de 8826 niet tegelijkertijd aan route r_2 worden toegewezen, en vice versa.

Eerder is al aangegeven dat de 21731 en de 3031 (Den Helder - Nijmegen) een *cross-platform* aansluiting dienen te hebben in Utrecht. Dat wil zeggen dat voor deze twee treinen zodanige routes geselecteerd dienen te worden dat er sprake is van een cross-platform aansluiting. De twee treinen kunnen bijvoorbeeld aankomen op de sporen 11 en 12 die aan weerszijden van hetzelfde eilandperron liggen. Als nu $R_{21731}^{11} \subset R_{21731}$ de verzameling is van alle routes voor de 21731 die de 21731 via spoor 11 routeren, en $R_{3031}^{12} \subset R_{3031}$ is de verzameling van alle routes voor de 3031 die de 3031 via spoor 12 routeren, dan moet gelden:

$$\sum_{r \in R_{21731}^{11}} X_{21731,r} = \sum_{r \in R_{3031}^{12}} X_{3031,r}$$

Met andere woorden, de 21731 komt aan op spoor 11 dan en slechts dan als de 3031 aankomt op spoor 12. Voor ieder ander paar sporen dat een cross-platform aansluiting mogelijk maakt dienen dergelijke beperkingen te worden opgesteld.

Zoals al eerder is aangegeven, wordt de 1731 in Utrecht gecombineerd met de 21731. Het combineren van deze treinen vereist uiteraard dat ze op hetzelfde spoor aankomen. Deze extra routeringsbeperkingen kunnen op dezelfde manier gemodelleerd worden als de cross-platform beperkingen voor de 21731 en de 3031.

De genoemde variabelen en beperkingen zijn natuurlijk maar enkele voorbeelden. In het algemeen beschrijven de variabelen de a priori mogelijke routes voor de treinen en de beperkingen zorgen ervoor dat combinaties van treinen en routes die niet bij elkaar passen niet in de oplossing zullen voorkomen.

De doelfunctie zou in dit geval kunnen weergeven dat iedere trein zo veel mogelijk langs zijn *voorkeursroute* of langs zijn *voorkeursperron* gerouteerd wordt. Dat wil zeggen, het doel is:

$$\max \sum_t \sum_{r \in R_t} w_{t,r} X_{t,r}$$

Hierbij geeft $w_{t,r}$ de waarde aan die route r en het bijbehorende perron heeft voor trein t . Een hoge waarde geeft daarbij aan dat trein t *graag* langs route r gerouteerd wordt en/of *graag* aan het bijbehorende perron halteert. Uit deze beschrijving volgt dat het routeringsprobleem een sterke gelijkenis vertoont met het zogenaamde *Weighted Node Packing* probleem. Dit is een algemeen bekend probleem uit de combinatorische optimalisering, waar al veel onderzoek naar gedaan is.

Op de details van het oplossen van het routeringsprobleem zal hier niet verder ingegaan worden. Het enige dat ik erover wil zeggen is dat het aantal mogelijke routes voor een bepaalde trein in de praktijk erg *groot* kan zijn. Daardoor kan het aantal beslissingsvariabelen in het model ook sterk oplopen. Een cruciale stap in het oplosproces blijkt te zijn dat op voorhand het aantal mogelijke routes aanzienlijk gereduceerd wordt door de zogenaamde *gedomineerde* routes te verwijderen. Daarbij dient er natuurlijk wel voor gezorgd te worden dat de *feasibility* en de *optimale oplossing* van het probleem niet worden aangetast.

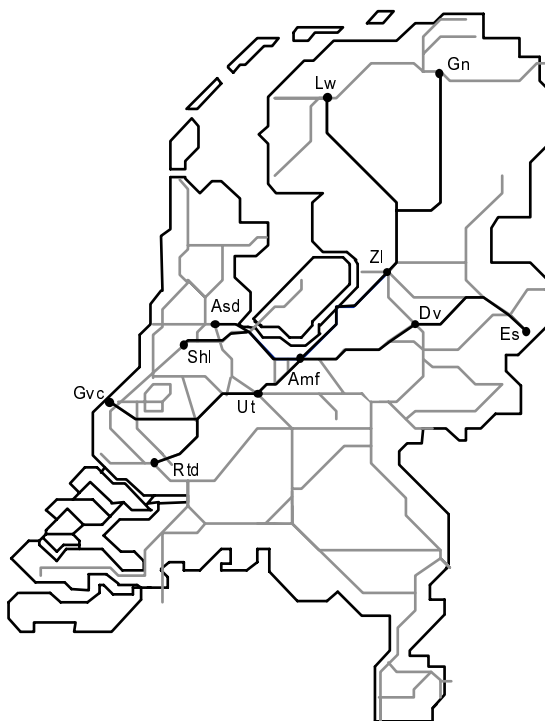
Het voorgaande suggereert wellicht dat de BUP's en de BSO's volgtijdelijk gemaakt worden. Maar in de praktijk is dat zeker niet het geval. Daar vindt de constructie van de BSO's in feite gelijktijdig plaats met de constructie van de BUP's: iedere geplande rit van een station naar het volgende begint op een perronspoor van het beginstation, loopt dan via een rijweg naar een IU-punt van dat station, daarna over de vrije baan naar het IU-punt van het volgende station, en tenslotte via een rijweg naar een perronspoor van dat volgende station. Zo ver is het in DONS echter nog niet. Daar bestaat een duidelijke scheiding tussen het construeren van de BUP's, en het construeren van de BSO's. Er zal veel onderzoek nodig zijn om een verdere integratie tussen deze twee stappen in DONS mogelijk te maken. Maar een verdere integratie zou vanwege de complexiteit van het resulterende model voorlopig ook nog wel een *brug te ver* kunnen zijn.

Materieelinzet in de ochtendspits

Een derde voorbeeld van het op modelmatige wijze genereren van plannen betreft de *materieelinzet*. Het is algemeen bekend dat de beschikbaarheid van materieel op dit moment één van de *bottlenecks* in het spoorwegsysteem vormt, met name in de spits. Daardoor heeft de inzetplanning van het materieel op dit moment twee invalshoeken: in de spits gaat het om een *eerlijke verdeling* van de schaarse capaciteit, en buiten de spits gaat het om *maximale efficiency*. Er wordt ook wel gesproken van het *verticale* en het *horizontale* probleem. Overigens is de schaarste een tijdelijk probleem, omdat er binnenkort nieuw materieel instroomt. Voorlopig zullen de tekorten in de spits echter zo eerlijk mogelijk verdeeld moeten worden

Ik zal nu uitleggen hoe het verticale probleem in de ochtendspits op basis van een eenvoudig optimalisatiemodel opgelost kan worden. Dat wil niet zeggen dat de tekorten geheel weggewerkt kunnen worden, maar wel dat ze zo klein mogelijk gemaakt kunnen worden. Voor het voorbeeld wil ik opnieuw naar de Noord-Oost kijken. De verbindingen op de Noord-Oost zijn als volgt (zie ook Figuur 9):

500	Rotterdam/Den Haag	Leeuwarden/Groningen
700	Amsterdam/Schiphol	Leeuwarden/Groningen
1600	Amsterdam/Schiphol	Deventer/Enschede
1700	Rotterdam/Den Haag	Deventer/Enschede



Figuur 9: De Noord-Oost

Op de Noord-Oost wordt Koploper materieel ingezet. De inzet van materieel op de Noord-Oost is vooral complex door de twee materieeltypen die binnen de Koplopers te onderscheiden zijn: de Drietjes en de Viertjes. Wanneer er alleen

Viertjes ingezet zouden worden, dan zou het inplannen van het materieel een heel stuk minder complex zijn. Maar met alleen Viertjes kunnen alleen treinen met een lengte die een *viervoud* is worden samengesteld (4, 8, of 12 bakken), terwijl met een combinatie van Drietjes en Viertjes treinen van bijna willekeurige lengte kunnen worden samengesteld: alleen treinen met 1, 2, of 5 bakken bestaan dan niet. Met Drietjes en Viertjes samen kan het aanbod aan capaciteit dus zo goed mogelijk worden aangepast aan de vervoersvraag.

Belangrijke input bij het inplannen van het materieel wordt gevormd door de *telcijfers*. Dit zijn tellingen van de conducteurs op de verschillende baanvakken die gebruikt worden als schatting van het te verwachten aantal reizigers. De telcijfers worden opgehoogd met zogenaamde *groeipercentsages*. Vervolgens wordt hier een statistische procedure op losgelaten om de per trein gewenste capaciteit te berekenen. Andere belangrijke input wordt gevormd door de beschikbare materieelvoorraad, en door de capaciteiten van de verschillende materieeleenheden.

De *even* genummerde treinen rijden naar de Randstad toe, en de *oneven* genummerde treinen rijden uit de Randstad weg. In de ochtendspits gaat het om ongeveer 20 even treinen en 20 oneven treinen. Wat de materieelinzet betreft zijn de even treinen vrijwel *onafhankelijk* van elkaar, en hetzelfde geldt voor de oneven treinen. Maar er bestaat wel een zekere koppeling tussen de even en de oneven treinen door de *keringen* van de treinen op hun eindpunten. Zo keert bijvoorbeeld de 718 uit Leeuwarden en Groningen in Amsterdam op de 1625 naar Deventer en Enschede. Door de keringen van de ene treinserie op de andere kan geen van de treinseries in de Noord-Oost helemaal los van de andere gezien worden.

In het model geven de parameters $T_{t,b,k}$ de gewenste capaciteit op baanvak b in klasse k van trein t weer. Deze parameters zijn gebaseerd op de telcijfers van de conducteurs. De aantallen Drietjes en Viertjes die op de verschillende treinen moeten worden ingezet worden weergegeven met de beslissingsvariabelen $D_{t,v,n}$ en $V_{t,v,n}$. Bijvoorbeeld $D_{722,Gin,Shl}$ is het aantal Drietjes dat op de 722 wordt ingezet van Groningen naar Schiphol. De beslissingsvariabelen $R_{t,b,k}$ representeren tenslotte het tekort aan capaciteit in klasse k van trein t op baanvak b .

Het doel van de exercitie is om de tekorten aan capaciteit te minimaliseren. Dat kan als volgt worden weergegeven:

$$\min \sum_t \sum_b \sum_k w_{b,k} R_{t,b,k}$$

Hierbij geven de gewichten $w_{b,1}$ en $w_{b,2}$ een weging aan de tekorten in de eerste klas en in de tweede klas en ook aan de baanvakken. Een tekort over een kort baanvak is nu eenmaal minder erg dan een tekort over een langer baanvak.

De volgende beperkingen leggen een verband tussen de inzet van materieel op de verbindingen in de Noord-Oost en de tekorten $R_{t,b,k}$ op de baanvakken:

$$\sum_{(v,n) \supset b} (35D_{t,v,n} + 59V_{t,v,n}) \geq T_{t,b,1} - R_{t,b,1} \quad \text{voor alle treinen } t \text{ en baanvakken } b$$

$$\sum_{(v,n) \supset b} (166D_{t,v,n} + 224V_{t,v,n}) \geq T_{t,b,2} - R_{t,b,2} \quad \text{voor alle treinen } t \text{ en baanvakken } b$$

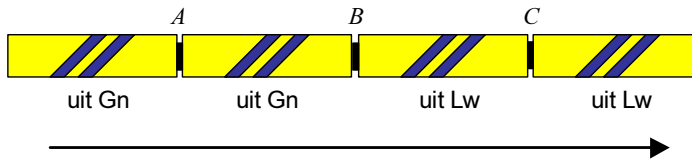
De getallen 35, 59, 166, en 224 zijn achtereenvolgens de eerste en tweede klas capaciteiten van de Drietjes en de Viertjes. Met andere woorden, het linkerlid van de eerste beperking geeft de geleverde eerste klas capaciteit op baanvak b van trein t . Het linkerlid van de tweede beperking geeft de daar geleverde tweede klas capaciteit. Andere beperkingen waaraan voldaan moet worden zijn de volgende: in de eerste plaats mogen er niet méér Drietjes en Viertjes ingezet worden dan er beschikbaar zijn. Dus moet aan de volgende beperkingen worden voldaan:

$$\sum_{t \in S} \sum_{(v,n)} D_{t,v,n} \leq N_D \quad \sum_{t \in S} \sum_{(v,n)} V_{t,v,n} \leq N_V$$

Hierbij zijn N_D en N_V de beschikbare aantallen Drietjes en Viertjes, en S is de verzameling van de zogenaamde *startende* treinen. Een tweede set beperkingen heeft betrekking op het feit dat treinen nooit langer mogen zijn dan 15 bakken:

$$\sum_{(v,n) \supset b} (3D_{t,v,n} + 4V_{t,v,n}) \leq 15 \quad \text{voor alle treinen } t \text{ en baanvakken } b$$

Het splitsen en combineren is een complicerende factor voor de materieelinzet op de Noord-Oost. Ik zal dit uitleggen aan de hand van het combineren en splitsen van de even treinen in de 700 treinserie in Zwolle en Amersfoort. Bij het combineren in Zwolle wordt het treindeel uit Leeuwarden het *voorste* deel van de gecombineerde trein, en het treindeel uit Groningen wordt het *achterste* deel. Bij het splitsen in Amersfoort gaat het voorste gedeelte van de trein door naar Amsterdam, en het achterste gedeelte gaat door naar Schiphol.



Figuur 10: Treinsamenstelling op het baanvak Zwolle-Amersfoort

Hieruit volgt dat iedere even trein in de 700 treinserie in ieder geval een directe verbinding van Leeuwarden naar Amsterdam én een directe verbinding van Groningen naar Schiphol biedt. Daarnaast kán zo'n trein ófwel een directe verbinding van Leeuwarden naar Schiphol, ófwel een directe verbinding van Groningen naar Amsterdam bieden, maar deze laatste twee verbindingen kunnen *niet tegelijkertijd* in dezelfde trein voorkomen.

Immers, door het combineren in Zwolle heeft iedere even trein op het baanvak Zwolle-Amersfoort globaal de samenstelling zoals weergegeven in Figuur 10. Als de trein in Amersfoort weer gesplitst wordt bij het punt *B*, dan ontstaan alleen directe verbindingen van Leeuwarden naar Amsterdam, en van Groningen naar Schiphol. Als de trein bij het punt *A* gesplitst wordt, dan ontstaat daarnaast de directe verbinding van Groningen naar Amsterdam. En als de trein bij het punt *C* gesplitst wordt, dan ontstaat naast de twee eerste verbindingen ook de verbinding van Leeuwarden naar Schiphol. Meer mogelijkheden om de trein te splitsen zijn er niet. Het voorgaande kan als volgt worden weergegeven met behulp van extra binaire variabelen X_t die alleen de waarden 0 of 1 kunnen krijgen:

$$D_{t,Lw,Shl} + V_{t,Lw,Shl} \leq 5X_t \quad \text{voor alle even 700 treinen } t$$

$$D_{t,Gn,Asd} + V_{t,Gn,Asd} \leq 5(1 - X_t) \quad \text{voor alle even 700 treinen } t$$

Ofwel: er kunnen in trein t treinstellen direct van Leeuwarden naar Schiphol rijden (als $X_t = 1$) of direct van Groningen naar Amsterdam (als $X_t = 0$), maar niet allebei. Immers, van één van de twee restricties is het rechterlid gelijk aan 0. Het combineren en splitsen van de andere treinen in de Noord-Oost, ook in de andere treinseries, kan op een vergelijkbare manier gemodelleerd worden.

Vervolgens wil ik nog even ingaan op de koppeling tussen de even treinen en de oneven treinen. De 718 keert bijvoorbeeld in Amsterdam op de 1625. Wanneer we ervan uitgaan dat er in Amsterdam geen stellingen worden *afgetrapt* of *bijgeplaatst* (dat is ongebruikelijk in de spits; aftrappen en bijplaatsen kan overigens ook gemodelleerd worden), dan rijdt de 1625 vanuit Amsterdam in dezelfde samenstelling als de 718 terug. Het aantal Drietjes in de 1625 is dus gelijk aan dat van de 718, en hetzelfde geldt voor de Viertjes. In wiskundige termen:

$$D_{1625,Asd,Dv} + D_{1625,Asd,Es} = D_{718,Lw,Asd} + D_{718,Gn,Asd}$$

$$V_{1625,Asd,Dv} + V_{1625,Asd,Es} = V_{718,Lw,Asd} + V_{718,Gn,Asd}$$

Het verschil tussen de 718 en de 1625 is de herkomst en de bestemming van de treinstellen. Stellingen die op de 718 uit Groningen komen zullen in principe naar Enschede gaan, maar eventueel naar Deventer. Het omgekeerde geldt voor de

stellen uit Leeuwarden. Het overhevelen van capaciteit kan echter maar één kant op plaatsvinden, zoals blijkt uit Figuur 10 die tevens de globale samenstelling van de 718 bij aankomst in Amsterdam weergeeft. Het tweezijdig overhevelen van capaciteit zou ingewikkeld rangeerwerk met zich meebrengen. Het één en ander kan als volgt in wiskundige termen worden weergegeven:

$$\begin{aligned} D_{1625,Asd,Dv} &\leq D_{718,Lw,Asd} + 5Y_{1625} & V_{1625,Asd,Dv} &\leq V_{718,Lw,Asd} + 5Y_{1625} \\ D_{1625,Asd,Es} &\leq D_{718,Gn,Asd} + 5(1 - Y_{1625}) & V_{1625,Asd,Es} &\leq V_{718,Gn,Asd} + 5(1 - Y_{1625}) \end{aligned}$$

Deze beperkingen zijn vooral bedoeld om te voorkomen dat een Drietje de ene kant op overgeheveld wordt (bijvoorbeeld afkomstig uit Leeuwarden en bestemd voor Enschede), en tegelijkertijd een Viertje de andere kant op (in het voorgaande voorbeeld: afkomstig uit Groningen en bestemd voor Deventer). Ook de andere keringen in de Noord-Oost kunnen op dezelfde manier gemodelleerd worden.

Tenslotte zijn er nog enkele andere beperkingen, bijvoorbeeld met betrekking tot het rangeerproces in Deventer, maar daar wil ik nu niet verder op ingaan.

Resultaten van de materieelinzet

Het beschreven model is geïmplementeerd in de modelleertaal OPL Studio voor een standaard maandag, en kan opgelost worden met de bijbehorende solver CPLEX. De gewichten in de doelfunctie voor eerste klas tekorten zijn tweemaal zo hoog als die voor tweede klas tekorten. Verder zijn er 53 Drietjes en 33 Viertjes beschikbaar. Het levert een model op met ongeveer 1000 beslissingsvariabelen en ongeveer 1000 beperkingen. Het model kan binnen enkele minuten op een snelle PC worden doorgerekend. De volgende tabel geeft een overzicht van de minimale tekorten zoals die door het model berekend zijn. De in de tabel genoemde getallen zijn overigens fictief, maar geven wel een goed beeld van de orde van grootte.

OPT:	1° Klas	2° Klas	Totaal	Gewogen
500	13	856	869	882
700	18	1110	1128	1146
1600	7	538	545	552
1700	67	881	948	1015
	105	3385	3490	3595

Helaas lukt het niet om aan alle normen te voldoen. Volgens de normen bedraagt het tekort 3385 plaatsen in de tweede klas en 105 plaatsen in de eerste klas. Maar deze oplossing is in ieder geval veel *beter* dan de oplossing zoals die *handmatig* gepland is. Daar is het totale tekort namelijk 4528 plaatsen in de tweede klas en 212 plaatsen in de eerste klas, zoals wordt weergegeven in de onderstaande tabel.

NU:	1° Klas	2° Klas	Totaal	Gewogen
500	65	1339	1404	1469
700	60	1488	1548	1608
1600	0	695	695	695
1700	87	1006	1093	1180
	212	4528	4740	4952

Wanneer het optimalisatiemodel doorgerekend wordt met 5 Drietjes minder, dan ontstaat een oplossing met een ongeveer even groot tekort als in de handmatige oplossing. Ofwel: de winst van het optimalisatiemodel is ongeveer 5 Drietjes.

Vervolgens is het interessant om op te merken dat het capaciteitstekort niet alleen veroorzaakt wordt door een *materieeltekort*, maar ook door het *combineren* en *splitsen* in de Noord-Oost en door de *maximale treinlengte* van 15 bakken. Zelfs wanneer het beschikbare aantal Drietjes en Viertjes sterk wordt opgehoogd is er nog steeds een tekort van 1874 plaatsen in de tweede klas en 34 in de eerste klas:

INF:	1° Klas	2° Klas	Totaal	Gewogen
500	24	260	284	308
700	0	612	612	612
1600	0	235	235	235
1700	10	767	777	787
	34	1874	1908	1942

Deze tekorten zijn kennelijk *onvermijdelijk*. Pas wanneer bovendien de maximale treinlengte veranderd wordt van 15 bakken naar 20 bakken, kunnen alle reizigers volgens de normen vervoerd worden. De maximale treinlengte speelt vooral een rol op de trajecten waar de treinen gecombineerd rijden. Maar de *drukste* trajecten zijn de trajecten Utrecht - Rotterdam, Utrecht - Den Haag, Amersfoort - Amsterdam, en Amersfoort - Schiphol, en daar rijden door het splitsen en combineren slechts *halve* treinen. Er kan derhalve geconcludeerd worden dat met behulp van het optimalisatiemodel het *vermijdbare tekort* bijna *gehalveerd* kan worden.

Bij het voorgaande dient bedacht te worden dat dit maar een vrij oppervlakkige analyse is. Er zouden eigenlijk veel meer aspecten bekeken moeten worden. Bijvoorbeeld: lukt het met de optimale inzet in de *ochtendspits* nog wel om ook de *avondspits* goed door te komen? En lukt het om ook de *nachtbalansen* op de verschillende knooppunten kloppend te krijgen. Tenslotte is ook een uitgebreide *gevoeligheidsanalyse* ten aanzien van fluctuaties in de telcijfers noodzakelijk. Maar het voorbeeld geeft aan dat op basis van het model in korte tijd een heel goede oplossing berekend kan worden: een voorbeeld van *sneller* en *beter*.

Crew Scheduling

Het laatste voorbeeld in deze reeks heeft betrekking op het plannen van de diensten voor het rijdende personeel. Dat wil zeggen: iedere trein moet voorzien worden van een machinist en één of meer conducteurs (of treinsurveillanten). Alle werkzaamheden van het rijdende personeel zijn daartoe georganiseerd in zogenaamde *diensten*: iedere dienst is een rij taken, die achtereenvolgens door één persoon op één dag wordt uitgevoerd. Voor de planning hiervan is het natuurlijk de vraag op welke manier al het werk zo *efficiënt* mogelijk in diensten ingedeeld kan worden, daarbij rekening houdend met alle relevante *regels en beperkingen*.

Voorafgaand aan het opstellen van de diensten voor het rijdende personeel zijn de dienstregeling en de materieelinzet gepland. Op basis daarvan is bekend *wanneer* er machinisten en conducteurs ingezet moeten worden, en voor de conducteurs is ook bekend *hoeveel* conducteurs er op iedere trein nodig zijn. Het aantal conducteurs op een trein is namelijk afhankelijk van de *lengte* en van de *agressiegevoeligheid* van de trein. Maar laten we het in het vervolg vooral hebben over de diensten voor machinisten. Op basis van de dienstregeling en de materieelinzet kan een lijst opgesteld worden van alle taken die door machinisten uitgevoerd moeten worden. Een voorbeeld van een taak is de volgende:

6738	Maastricht	Heerlen	9:26	9:49	Sneltrain	6700
------	------------	---------	------	------	-----------	------

Dit voorbeeld betekent dat een machinist van 9:26 tot 9:49 de sneltrain 6738 van Maastricht naar Heerlen rijdt. De 6738 behoort tot de 6700 treinserie die éénmaal per uur een verbinding vormt tussen Maastricht Randwyck en Heerlen.

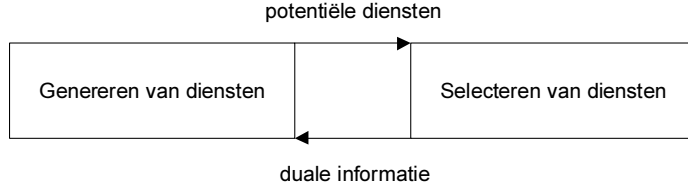
De diensten dienen aan allerlei *regels* te voldoen. De belangrijkste regel is dat alle taken uiteindelijk in één van de diensten terecht dienen voor te komen. Verder zijn er aan de ene kant regels voor de individuele diensten, en aan de andere kant regels voor het dienstenpakket per standplaats. Belangrijke algemene regels voor de individuele diensten zijn bijvoorbeeld: iedere dienst dient tenminste 4:00 uur en ten hoogste 9:30 uur te duren, en iedere dienst langer dan 5:30 uur dient een pauze, een zogenaamde *ster*, te bevatten die aan bepaalde eisen ten aanzien van *waar* en *wanneer* voldoet. Voorbeelden van regels voor het dienstenpakket per standplaats zijn: per standplaats dient de gemiddelde dienstlengte niet meer dan 8:00 uur te bedragen, per standplaats mag slechts 5% van de diensten langer duren dan 9:00 uur, en per standplaats mag niet meer dan een zeker percentage van de diensten nachtdiensten zijn. Naast de algemene regels voor de diensten zijn er de regels die recent in het kader van het project *Bestemming: Klant* van NS Reizigers zijn opgesteld. Deze geven onder andere aan welke treinseries per standplaats gereden mogen worden, en welke minimale *variatie* iedere dienst moet bevatten.

Het model dat gebruikt wordt voor het automatisch genereren van de diensten is een zogenaamd *Set Covering* model met extra randvoorwaarden. Dit is een model dat ontleend is aan de *luchtvaartwereld*, waar het al langer gebruikt wordt voor het plannen van de diensten van de *piloten* en de *cabin crew*. Waarschijnlijk speelt de in de luchtvaartwereld al veel langer bestaande *concurrentie* daarbij ook een rol. En bovendien zijn in de spoorwegwereld de op te lossen problemen meestal veel *groter* dan in de luchtvaartwereld. Daardoor is het model tot dusverre nog niet echt in de spoorwegwereld doorgedrongen. Maar door de recente ontwikkelingen in de *hardware* en in de *algoritmiëk* ligt tegenwoordig ook in de spoorwegwereld het geautomatiseerd oplossen van crew scheduling problemen binnen handbereik.

Bij het toepassen van een Set Covering model wordt er van uit gegaan dat er voorafgaand aan het selecteren van de uiteindelijke diensten een grote verzameling *potentiële* diensten gegenereerd is. Iedere potentiële dienst dient te voldoen aan alle regels voor de individuele diensten. Vervolgens zorgt het Set Covering model voor het selecteren van een zodanige deelverzameling van de potentiële diensten dat iedere taak in tenminste één dienst is opgenomen, dat aan alle extra regels voor de standplaatsen voldaan is, en dat bepaalde criteria geoptimaliseerd zijn.

Belangrijke criteria voor het beoordelen van de diensten zijn *feasibility*, *efficiency*, en *acceptatie*. Feasibility betekent dat het inderdaad mogelijk is om de diensten in de praktijk uit te voeren. Dat wil bijvoorbeeld zeggen dat, wanneer er overgestapt dient te worden van de ene trein op de andere, daar voldoende tijd voor beschikbaar is. Efficiency betekent dat een groot gedeelte van de diensten effectieve werktijd is. Relatief weinig tijd dient besteed te worden aan overstappen, pauzes, *P-trips*, en dergelijke. Een P-trip of Passagierstaak is een taak waarbij een machinist niet zelf een trein rijdt, maar als passagier met de trein meerijdt, om daardoor elders een andere trein te kunnen gaan rijden. Acceptatie tenslotte geeft aan dat het belangrijk is dat de diensten door het rijdende personeel geaccepteerd worden, omdat alleen dán het werk op een gemotiveerde wijze uitgevoerd zal worden. Voor de acceptatie van de diensten blijkt vooral de mate van *variatie* in de diensten *op* de dag en *over* de dagen heen een belangrijk criterium te zijn.

Het genereren van de verzameling van potentiële diensten kan *a priori* gebeuren, maar het kan ook *on the fly* plaatsvinden. Het aantal potentiële diensten is in het algemeen namelijk zó groot, dat het ondoenlijk is om ze allemaal van tevoren te genereren. In dat geval is het beter om met een beperkte verzameling te beginnen, en om die verzameling tijdens het selectieproces *zo nodig* uit te breiden. In dat geval wordt gesproken van *dynamische kolomgeneratie*. Figuur 11 geeft het oplosproces bij de toepassing van dynamische kolomgeneratie globaal weer.



Figuur 11: Schematische weergave van dynamische kolomgeneratie

De *generator* genereert de verzameling potentiële diensten, en de *selector* selecteert daaruit een deelverzameling die samen de oplossing gaan vormen. De generator stuurt de gegenereerde diensten naar de selector. De selector stuurt op zijn beurt zogenaamde *duale informatie* terug naar de generator. De selector kan er namelijk achter komen dat een bepaalde taak door de op dat moment beschikbare potentiële diensten nog niet op ideale wijze overdekt kan worden. Op dat moment kan de selector dan door middel van de duale informatie aan de generator vragen om nog wat extra diensten te genereren die de desbetreffende taak overdekken.

Ik wil hier niet te diep ingaan op de onderliggende techniek van de generator en de selector. Het enige dat ik er nu over wil zeggen is dat de generator gebaseerd is op *dynamische programmering*, waarbij gebruik wordt gemaakt van *netwerktechnieken* en *dominantieregels*. Zoals gezegd is de selector gebaseerd op een Set Covering model dat opgelost wordt met *Lagrange relaxatie*, *subgradient optimalisering* en *heuristische zoekmethoden*. Als we de uit te voeren taken aanduiden met $t = 1, \dots, T$, de potentiële diensten met $d = 1, \dots, D$, en de extra beperkingen met $c = 1, \dots, C$, dan kan het model als volgt worden weergegeven:

$$\min \sum_{d=1}^D k_d x_d \quad (1)$$

onder de voorwaarde dat

$$\sum_{d=1}^D a_{t,d} x_d \geq 1 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2)$$

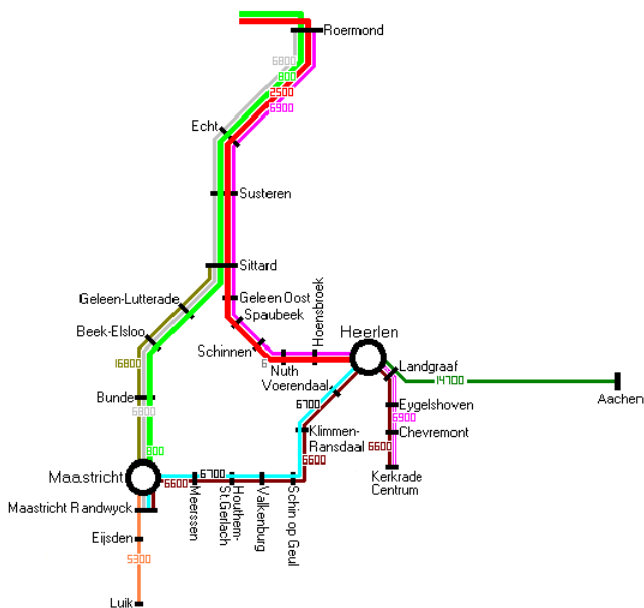
$$\sum_{d=1}^D b_{c,d} x_d \leq u_c \quad \forall c = 1, \dots, C \quad (3)$$

$$x_d \in \{0,1\} \quad \forall d = 1, \dots, D \quad (4)$$

De binaire beslissingsvariabelen x_d betekenen het volgende:

$$x_d = \begin{cases} 1 & \text{als potentiële dienst } d \text{ geselecteerd wordt,} \\ 0 & \text{als dat niet het geval is.} \end{cases}$$

De 0-1 matrix $a_{t,d}$ behoort bij de invoer van het model, en representeert de potentiële diensten. In deze matrix correspondeert iedere rij met een uit te voeren taak, en iedere kolom correspondeert met een potentiële dienst. Verder geldt voor deze matrix: $a_{t,d} = 1$ dan en slechts dan als taak t voorkomt in potentiële dienst d . De beperkingen (2) geven daardoor aan dat iedere taak in tenminste één dienst moet voorkomen. De extra beperkingen (3) hebben te maken met het feit dat bepaalde combinaties van diensten niet zijn toegestaan. Dit kan te maken hebben met het aantal diensten per standplaats, de gemiddelde dienstlengte per standplaats, of het percentage nachtdiensten per standplaats. De coëfficiënten k_d in de doelfunctie (1) worden zó gekozen dat ze aangeven dat het vooral belangrijk is om het aantal diensten te minimaliseren. Maar ook andere zaken kunnen door middel van de coëfficiënten van de doelfunctie bestraft worden. Voorbeelden hiervan zijn: P-trips, overstappen van de ene trein op de andere, of onvoldoende variatie.



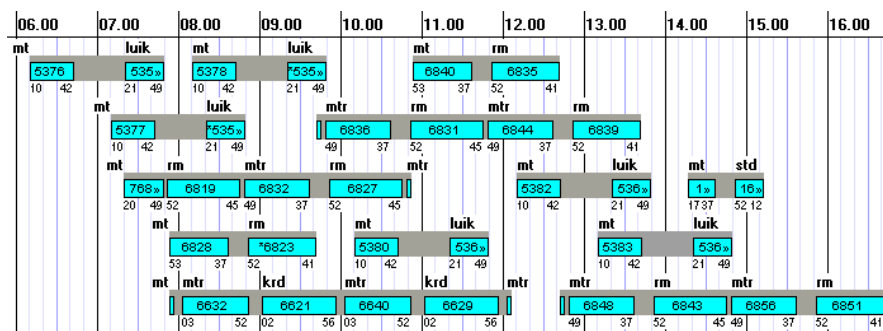
Figuur 12: De lijnen van NS Reizigers in Zuid-Limburg

De gehanteerde oplostechniek is gebaseerd op jarenlang onderzoek van o.a. Caprara et al. Deze techniek heeft enkele jaren geleden een door de Italiaanse spoorwegmaatschappij Ferrovie dello Stato (FS) uitgeschreven crew scheduling wedstrijd gewonnen. Ook momenteel vindt veel onderzoek op het gebied van Set Covering modellen plaats, vooral vanwege de brede toepassingsmogelijkheden van deze modellen in de praktijk. Een belangrijk issue daarbij is het *vergroten* van de instanties die opgelost kunnen worden. Maar ook de *implementatie* en de *toepassing* van deze modellen in de praktijk vergt nog veel onderzoek.

Resultaten van de crew scheduling

Ik wil het automatisch genereren van diensten voor machinisten illustreren aan de hand van de diensten op de stoptreinen in *Zuid-Limburg* op een bepaalde dag. Een voordeel van Zuid-Limburg is namelijk dat het tamelijk los ligt van de rest van het land, waardoor de diensten in Zuid-Limburg vrij gemakkelijk los van de diensten voor de rest van het land gepland kunnen worden. In Figuur 12 zijn de lijnen van NS Reizigers in Zuid-Limburg schematisch weergegeven.

Het model en de bijbehorende oplostechniek zijn in staat om binnen enkele minuten een goede oplossing voor een dergelijke instantie te vinden. Een deel van de gevonden diensten voor de standplaats Maastricht is weergegeven in Figuur 13. In de figuur is de regelmatige structuur van de diensten duidelijk te zien. Iedere dienst bestaat uit twee delen, namelijk een deel *vóór* de pauze en een deel *na* de pauze. Deze twee delen hebben meestal betrekking op verschillende treinseries en op verschillende trajecten, waardoor steeds aan de regels voor de variatie is voldaan. In iedere dienst ligt de pauze in de *eigen* standplaats Maastricht.



Figuur 13: 5 diensten voor machinisten uit de standplaats Maastricht

Verder wordt in iedere dienst weinig van de ene trein op de andere overgestapt. Dit leidt in de praktijk tot een kleinere kans op de overdracht van vertragingen. Iedere overstap door een machinist van de ene trein op de andere kan namelijk voor een overdracht van vertragingen zorgen. Wanneer de eerste trein vertraagd is (meer dan de beschikbare overstaptijd), dan zal daardoor de tweede trein ook vertraagd raken. Kortom: weinig overstappen is gunstig voor de punctualiteit. Daarom spreekt men bij een plan, waarin het overstappen van de ene trein op de andere zo veel mogelijk wordt voorkomen, ook wel van een *Anti-Vertragingsplan*. Maar diensten met een dergelijke structuur worden ook wel *Rondjes om de Kerk* genoemd.

Het voorbeeld van Zuid-Limburg is natuurlijk maar een klein voorbeeld met slechts een paar honderd taken die uitgevoerd moeten worden. Daardoor kan dit voorbeeld binnen een paar minuten worden opgelost. Maar inmiddels zijn er ook experimenten gedaan waarbij alle taken van een hele dag *in heel Nederland* tegelijkertijd aan het model werden aangeboden. De resultaten daarvan waren boven verwachting. Het langs deze weg berekende aantal diensten voor machinisten kwam dicht in de buurt van het aantal diensten dat op handmatige wijze bepaald was. Maar in dit geval dan wél in een fractie van de tijd. De rekentijd voor dergelijke grote instanties kan oplopen van enkele uren tot één dag. Maar vaak wordt ook na enkele uren al een heel bruikbare oplossing gevonden.

Vaak moeten de oplossingen achteraf handmatig nog enigszins aangepast worden, omdat het nu eenmaal onmogelijk is om alle praktische aspecten van een dergelijke complexe problematiek in een *één-dimensionaal* model mee te nemen. *Gebruikersvriendelijke* ondersteuning door de daarbij te hanteren *intelligente* systemen en andere hulpmiddelen is daarbij essentieel. Ik kom daar later op terug.

De toepassing van het getoonde model bevindt zich momenteel nog in een tamelijk experimenteel stadium. Het is echter de bedoeling dat het beschreven model op termijn ook een onderdeel van het werkelijke operationele planningsproces bij de afdeling Logistiek van NS Reizigers zal gaan vormen.

Robuustheid en stabiliteit

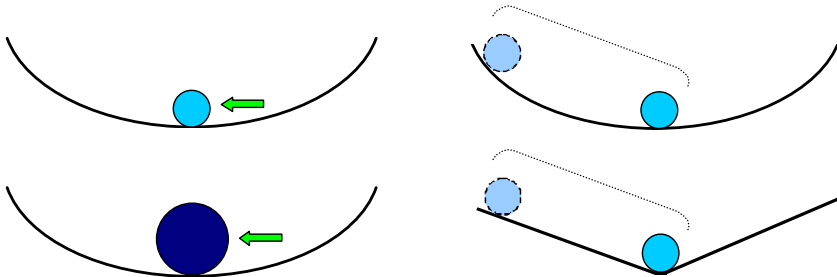
De tot dusverre genoemde problemen zijn steeds beschouwd als *deterministische* problemen. Maar de werkelijkheid is natuurlijk verre van deterministisch: *stochastiek* is overal aanwezig. Belangrijke aspecten bij het ontwerpen van een systeem zijn daarom de bijbehorende *robustheid* en *stabiliteit*. De robustheid van een systeem geeft aan in welke mate het systeem gevoelig is voor externe verstoringen. Dat wil zeggen: in welke mate kan het systeem blijven functioneren, ondanks dat het aan kleinere of grotere externe verstoringen is blootgesteld, en in

welke mate kunnen de verstoringen zich verspreiden in *ruimte* en *tijd*. De stabiliteit van een systeem geeft aan hoeveel moeite het kost om het systeem weer te laten terugkeren naar de evenwichtstoestand, nadat daar onder invloed van externe verstoringen van afgeweken is. In de spoorwegwereld zijn deze begrippen van belang in verband met de in de uitvoering te verwachten *punctualiteit* van de treinen. In het onderstaande zullen deze abstracte concepten aan de hand van twee voorbeelden wat concreter gemaakt worden.

Voorbeelden

Figuur 14 toont aan de linkerkant twee systemen met verschillende robuustheden. In dit geval is de ondergrond in beide gevallen identiek, maar het tweede systeem bevat een veel grotere en zwaardere bol dan het eerste. Wanneer aan beide bollen een zelfde stoot gegeven wordt, dan zal de eerste bol *verder* uit de uitgangspositie rollen dan de tweede. Het tweede systeem is daarmee *robuuster* dan het eerste.

Dezelfde figuur toont tevens twee systemen met verschillende stabiliteiten. In dit geval zijn de twee bollen identiek, maar nu is de ondergrond van beide systemen verschillend: de eerste is veel ronder dan de tweede. Wanneer in dit geval beide bollen even ver uit hun evenwichtsstand gebracht worden, dan zal in het eerste geval de bol *langer* heen en weer blijven rollen dan in het tweede geval. Het duurt langer totdat de eerste bol weer in de evenwichtspositie is teruggekeerd. Daarmee is het tweede systeem *stabiel*er dan het eerste.



Figuur 14: Robuust vs. minder robuust; stabiel vs. minder stabiel

Belangrijke vragen blijven natuurlijk op welke manier deze abstracte concepten in de praktijk kunnen worden toegepast, en hoe de robuustheid en de stabiliteit van een systeem op voorhand *gekwantificeerd* kunnen worden. En tenslotte is natuurlijk de belangrijkste vraag: hoe kunnen de robuustheid en de stabiliteit van een systeem vervolgens *vergroot* worden?

Er bestaat hier ook een link met de *primaire* en de *secundaire* vertragingen van treinen. Primaire vertragingen zijn vertragingen die opgelopen zijn door externe oorzaken. Secundaire vertragingen zijn vertragingen die het gevolg zijn van het wachten op andere treinen. Door het *sneeuwbaaleffect* spelen vooral de secundaire vertragingen momenteel een belangrijke rol. Bij het terugdringen van de secundaire vertragingen zullen *vereenvoudiging* en *ontkoppeling* van logistieke processen in de praktijk een belangrijke rol moeten spelen. Terugdringen van de primaire vertragingen zal het gevolg moeten zijn van onder andere verbeteringen aan de infrastructuur en aan het materieel waardoor de *bedrijfszekerheid* groter wordt.

Simulatie

Ook voor het *kwantificeren* van de robuustheid en de stabiliteit van systemen kan gebruik gemaakt worden van modellen. Met name *simulatiemodellen* zijn daarvoor zeer geschikt. In het bijzonder zijn er in het verleden al tal van simulatiemodellen voor het simuleren van spoorwegsysteem ontwikkeld.

Het principe van een simulatiemodel is eigenlijk heel simpel: maak een beschrijvend *dynamisch* model van het te bestuderen systeem, strooi daar op een geschikte manier wat relevante *verstoringen* over uit, en bestudeer hoe het systeem op deze verstoringen reageert. Daarbij dient er dan natuurlijk wel voor gezorgd te worden dat het model een voldoende *realistische* weergave is van de werkelijkheid, en dat de resultaten voldoende *betrouwbaar* zijn om zinvolle uitspraken over de werkelijkheid te kunnen doen. Dat laatste wil zeggen dat de simulatieruns lang genoeg moeten zijn, en dat ze voldoende vaak herhaald moeten worden.

Om dergelijke analyses ten aanzien van de robuustheid en de stabiliteit van het spoorwegsysteem met behulp van simulatie te kunnen uitvoeren, is recent het simulatiemodel SIMONE (SIMulatie MOdel voor NETwerken) ontwikkeld. Deze ontwikkeling heeft plaatsgevonden bij Railned, maar de vervoerders op het spoor kunnen dit simulatiemodel ook gebruiken. Het aardige van SIMONE is dat het goed aansluit bij DONS, het eerder genoemde planningssysteem voor het automatisch genereren van dienstregelingen. DONS kan derhalve gebruikt worden om dienstregelingen te *ontwerpen*, en SIMONE kan vervolgens gebruikt worden om deze ontwerpen te *beoordelen* op hun robuustheid en hun stabiliteit.

SIMONE wordt voorlopig vooral *vergelijkenderwijs* gebruikt. Dat wil zeggen dat er met behulp van DONS twee dienstregelingsontwerpen gemaakt worden die met behulp van SIMONE met elkaar vergeleken worden op hun robuustheid en hun stabiliteit. Bij deze vergelijking worden de twee dienstregelingsontwerpen onderworpen aan *dezelfde* verstoringen. Daardoor is het realiteitsgehalte van de toegepaste verstoringen eigenlijk van ondergeschikt belang. Maar wellicht kan te

zijn tijd het model ook gebruikt worden om meer *absolute* uitspraken te doen over de robuustheid en de stabiliteit van individuele dienstregelingsontwerpen.

In het geval van SIMONE gaat het met name om het beoordelen van een dienstregelingsontwerp ten aanzien van de gevoeligheid voor zogenaamde *kleine* stochastische verstoringen. Voorbeelden van dergelijke kleine verstoringen zijn onder andere: de deuren van de trein die even niet open of dicht willen, de blaadjes op de rails, de rijstijl van de machinist, etc. Tegen dergelijke kleine verstoringen zou de dienstregeling eigenlijk bestand moeten zijn. Het analyseren van de robuustheid van de dienstregeling tegen kleine verstoringen wordt daarom ook wel de *Trillingsproef* genoemd. Kleine verstoringen moeten in de uitvoering *geabsorbeerd* kunnen worden doordat er in de dienstregeling geschikte *buffers* en *ontkoppelpunten* zijn ingebouwd. *Grote* verstoringen, zoals een wissel- of seinstoring, of een aanrijding op een overweg, zullen helaas altijd blijven plaatsvinden, maar het is ondenkbaar dat de dienstregeling zó ontworpen kan worden dat deze de effecten van dergelijke grote verstoringen kan absorberen.

Daarom is het vanuit het oogpunt van het ontwerpen van de dienstregeling vooral interessant om te kijken naar de gevoeligheid van het ontwerp ten aanzien van *kleine* verstoringen. Een bijkomend voordeel is dat dan verondersteld kan worden dat in de simulatie het plan voortdurend zo veel mogelijk gehandhaafd dient te worden. Dat wil zeggen dat er geen ingewikkelde *bijsturingsoperaties* van de verkeersleiding gemodelleerd hoeven te worden.

Een gevolg van het voorgaande is dat SIMONE geen model is waarmee de werkelijkheid in detail gesimuleerd kan worden. SIMONE levert in feite een *laboratoriumsituatie*, die gebruikt kan worden om op basis van gecontroleerde, wetenschappelijke experimenten inzicht te krijgen in de relatieve robuustheid en stabiliteit van dienstregelingsontwerpen. SIMONE kan ook gebruikt worden om inzicht te krijgen in het *normenstelsel* dat aan de dienstregeling ten grondslag ligt. En dat kan vervolgens weer leiden tot een wetenschappelijke onderbouwing van de in de praktijk te gebruiken logistieke *ontwerpprincipes*.

Max-Plus algebra

Er bestaan ook andere methoden en technieken die gebruikt kunnen worden om de robuustheid en de stabiliteit van dynamische systemen te bestuderen. Een voorbeeld hiervan is de *Max-Plus algebra*. Dit is in feite een tussenweg tussen simulatie en een analytische benadering. Max-Plus algebra is met name geschikt voor het analyseren van *Discrete Event Dynamical Systems*. Ook spoorwegsysteem behoren (in abstracte vorm) tot deze klasse van systemen. Ik wil hier echter niet op de technische details van de Max-Plus algebra ingaan.

Een sterk punt van deze methode is dat deze het mogelijk maakt om langs *analytische* weg bepaalde kwaliteitsmaatstaven van een dynamisch systeem te berekenen. In het bijzonder kan, gegeven de specificaties van het systeem, de kortst mogelijke *cyclustijd* van het systeem berekend worden. Deze wordt bepaald door het zogenaamde *kritieke circuit*. Als bijvoorbeeld de kortst mogelijke cyclustijd van een spoorwegsysteem 55 minuten bedraagt, dan zal het mogelijk zijn om dat systeem in een uurdienst uit te voeren. Er is dan ieder uur nog een marge van 5 minuten over. Deze marge van 5 minuten is een indicatie voor het *absorberende* en *dempende* vermogen van het systeem ten aanzien van vertragingen.

Maar zowel simulatie als Max-Plus algebra hebben naast sterke punten natuurlijk ook een aantal minder sterke punten. Mijns inziens zou het daarom nuttig zijn om verder onderzoek te doen naar de sterke en de minder sterke punten van beide methoden, en om die uitgebreid met elkaar te vergelijken. Wellicht kan dat op termijn tevens tot een bruikbare *synthese* van de twee benaderingen leiden.

Een robuust opstelplan

Ik zal nu een voorbeeld geven dat het verschil aangeeft tussen een robuust plan en een minder robuust plan. Het voorbeeld heeft betrekking op het *opstellen* van treinstellen op een *opstelterrein*. Gedurende de dag worden de meeste treinstellen gebruikt voor het vervoer van reizigers, maar tijdens de nacht worden ze opgesteld op een van de opstelterreinen bij een van de grote knooppunten. Zowel bij het *afrangeren* als bij het de volgende ochtend weer *voorbrenge* dienen bij voorkeur zo weinig mogelijk rangeerbewegingen gemaakt te worden, want iedere rangeerbeweging legt beslag op bepaalde *resources* (infrastructuur, personeel).

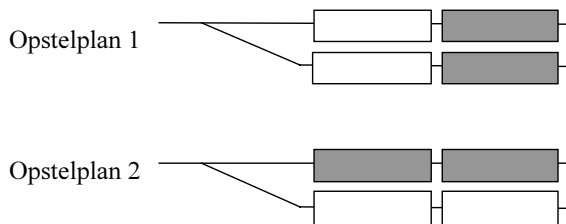
Aangezien de rangeer- en opstelplanning in feite het *sluitstuk* is van het hele logistieke planningsproces, en de rangeer- en opstelplanning bijna altijd beïnvloed wordt door veranderingen in de dienstregeling en de materieelinzet, is het van belang dat deze planning met een zo kort mogelijke *doorlooptijd* en zo veel mogelijk aan het *einde* van de logistieke keten gemaakt kan worden.

Het voorbeeld dat ik wil bespreken gaat over het opstellen van vier treinstellen op twee opstelsporen. De treinstellen zijn van twee verschillende typen. Dit kunnen bijvoorbeeld Koploper Drietjes en Viertjes zijn, maar voor het gemak heb ik het hier over Grijs en Witte treinstellen. Volgens de dienstregeling komen de treinstellen aan in de volgorde Grijs-Wit-Grijs-Wit. En volgens de dienstregeling vertrekken ze de volgende dag in de volgorde Wit-Wit-Grijs-Grijs. Verder geldt dat de Grijs treinstellen onderling uitwisselbaar zijn en de Witte treinstellen ook.

Beide opstelsporen hebben ieder voldoende lengte voor het opstellen van twee treinstellen. Aangezien het gaat om doodlopende opstelsporen (hetgeen in de

praktijk gebruikelijk is) dienen ze bij voorkeur op een LIFO (= Last In First Out) manier gebruikt te worden. Er zijn in dit geval in essentie twee opstelplannen denkbaar die het mogelijk maken om de vier treinstellen zonder extra rangeerbewegingen op te stellen, en ze later weer voor te brengen. Deze twee opstelplannen worden weergegeven in Figuur 15.

Als alles volgens plan verloopt, lijken beide opstelplannen gelijkwaardig te zijn. In beide gevallen kunnen de aankomende treinstellen namelijk zonder extra rangeerbewegingen in de geplande volgorde op de opstelsporen worden neergezet. Tevens kunnen ze de volgende ochtend weer zonder extra rangeerbewegingen in de geplande volgorde worden voorgebracht.

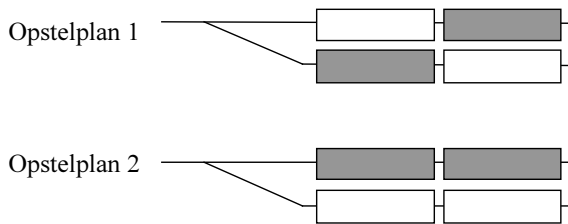


Figuur 15: Twee alternatieve opstelplannen

Maar de robuustheid van een plan heeft vooral te maken met de *gevoeligheid* van het plan ten aanzien van ongeplande *verstoringen* van buitenaf. Veronderstel daarom bijvoorbeeld dat het tweede Grijsze treinstel bij aankomst een zodanige vertraging heeft opgelopen dat het *later* aankomt dan het tweede Witte treinstel. In dat geval is de aankomstvolgorde van de treinstellen dus Grijs-Wit-Wit-Grijs. Veronderstel verder dat het vertrek van de treinstellen de volgende morgen in de geplande volgorde plaatsvindt. Dat wil zeggen: Wit-Wit-Grijs-Grijs.

Laten we eerst opstelplan 1 bekijken. Als de vertraging van het tweede Grijsze treinstel pas laat bekend is, dan zullen de twee eerste treinstellen uiteraard volgens opstelplan 1 worden opgesteld. Maar dat betekent dat het tweede Witte treinstel niet op de geplande positie kan worden opgesteld. In het bijzonder komen de twee laatst aangekomen treinstellen in de *verkeerde* volgorde op hun opstelspoor te staan. De alternatieve opstelling in opstelplan 1 is weergegeven in Figuur 16.

Duidelijk is ook dat deze alternatieve opstelling in opstelplan 1 de volgende dag tot problemen gaat leiden bij het vertrek van de treinstellen: er dienen eerst twee Witte treinstellen te worden voorgebracht, maar het te laat aangekomen Grijsze treinstel staat daarbij in de weg. Er zal dus op enig moment extra gerangeerd moeten worden om het tweede Witte treinstel op tijd te kunnen laten vertrekken.



Figuur 16: Realisaties van de twee opstelplannen bij vertraging

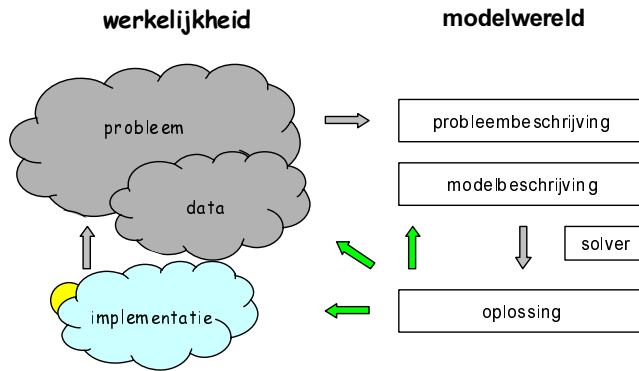
Bij het tweede opstelplan zal dit probleem zich niet voordoen. In dit geval kan het opstelplan uitgevoerd worden in welke volgorde de treinstellen ook aankomen of vertrekken. Met andere woorden: het tweede opstelplan is *onafhankelijk* van de feitelijke aankomst- en vertrekvolgorde van de treinstellen. Daarmee is het tweede plan dus uit het oogpunt van robuustheid te prefereren boven het eerste. Dit is een duidelijk voorbeeld van de eerder genoemde *logistieke ontkoppeling*.

Modelmatige analyse

De in het voorgaande gegeven voorbeelden geven aan hoe de *modelmatige* benadering voor het oplossen van praktische problemen te werk gaat. Bij de eerstgenoemde optimalisatieproblemen (op het gebied van dienstregeling, materieelinzet, en personeelinzet) is er sprake van zogenaamde *how-to* modellen, en het genoemde simulatiemodel is een voorbeeld van een zogenaamd *what-if* model. Eigenlijk zijn alle plannen in zekere zin gebaseerd op een modelmatige benadering: *zonder model kan er geen plan ontstaan*. Maar in sommige gevallen zijn de modellen wat meer expliciet aanwezig dan in andere gevallen.

Het één en ander is schematisch weergegeven in Figuur 17. In deze figuur is doelbewust de werkelijkheid met wolkjes getekend en de modelwereld is zeer rechtlijnig. Op deze manier wordt de *tegenstelling* tussen de werkelijkheid en de modelwereld gevisualiseerd. De werkelijkheid is namelijk in het algemeen zó complex dat het onmogelijk is om alle details daarvan in een model op te nemen. Modelleren is derhalve het zoeken naar een geschikte balans tussen *detaillering* en *berekenbaarheid*. Een fout die regelmatig gemaakt wordt is dat koste wat kost toch zo veel mogelijk details van de werkelijkheid in het model opgenomen moeten worden. Maar dat leidt meestal tot een te complex model dat niet meer oplosbaar is, zelfs niet op de meest snelle en krachtige computers. Goed modelleren is

derhalve het *weglaten* van precies de juiste details van de werkelijkheid. Dit leidt tot een iteratief proces, waarin het model in een aantal iteraties tot stand komt.



Figuur 17: Schematische weergave van de modelmatige benadering

Het langs modelmatige weg analyseren van een probleem begint met het beschrijven van het probleem. In eerste instantie moet de *doelstelling* van het onderzoek vastgesteld worden. Er zullen in de praktijk meestal meerdere doelstellingen bestaan. Een belangrijk aspect dat in deze fase aandacht verdient is ook het vaststellen van de *probleemeigenaar* en de andere *stakeholders*: als er *geen* probleemeigenaar is, dan is er ook *geen* probleem. Vervolgens moeten ook de verschillende *keuzemogelijkheden* en de te hanteren *regels* beschreven worden: welke knoppen zijn er beschikbaar, en hoe ver mag er aan gedraaid worden?

In veel gevallen is een belangrijke *spin-off* van een modelmatige analyse van een bepaalde problematiek niet eens direct gelegen in de resultaten die uiteindelijk door het model geleverd worden, maar veeleer in het feit dat het proces van het modelleren zelf al leidt tot een groter inzicht in de problematiek. Juist het feit dat doelstellingen, keuzemogelijkheden, en regels expliciet beschreven moeten worden is in veel gevallen al van onschatbare waarde voor de praktijk.

Vervolgens wordt het een en ander vertaald naar een modelmatige representatie. Ik ga er hierbij van uit dat er sprake is van een probleem dat met behulp van een optimalisatiemodel geanalyseerd gaat worden. De keuzemogelijkheden worden vertaald naar zogenaamde *beslissingsvariabelen*. Daarnaast worden door middel van *beperkingen* op deze variabelen de te hanteren regels gerepresenteerd. Deze

geven aan dat bepaalde combinaties van keuzemogelijkheden niet samen gaan. Ook de *doelfunctie* of *doelfuncties* worden in termen van de variabelen uitgedrukt.

Als het model is opgesteld, dan kan het opgelost of doorgerekend worden. Het doorrekenen van een optimalisatiemodel klinkt wellicht eenvoudiger dan het in veel gevallen is. In de praktijk zijn veel problemen met een sterk combinatorisch karakter, zoals het vinden van een goede dienstregeling, namelijk erg moeilijk oplosbaar. Men spreekt dan van *NP-complete* of *NP-moeilijke* problemen.

Voor het oplossen van how-to modellen kan gebruik gemaakt worden van een *general purpose* solver, zoals CPLEX, of van een *special purpose* solver, zoals CONFLEX. CONFLEX is de solver van het model dat in DONS geïmplementeerd is. In dergelijke gevallen schieten *general purpose* solvers al gauw te kort voor problemen van enige omvang, juist vanwege hun general purpose karakter. Als dat het geval is, zal men genoodzaakt zijn om een *special purpose* solver te ontwikkelen, die meer gebruik maakt van de specifieke kenmerken van het onderhavige probleem. Dat kost in het algemeen echter veel onderzoek en creativiteit en, inherent daaraan, ook veel tijd en geld. Een bijkomend risico is dat special purpose solvers in principe *weinig flexibel* zijn. Op het moment dat de op te lossen problematiek enigszins verandert, hetgeen niet de eerste keer zou zijn in de praktijk, kan het gebeuren dat de special purpose solver niet meer geschikt is om ook de aangepaste problematiek op te kunnen lossen.

Een alternatief voor een solver die gegarandeerd optimale oplossingen kan leveren is een *heuristiek*. Heuristieken zijn in het algemeen gebaseerd op vuistregels en/of op een decompositie van de problematiek in minder complexe deelproblemen. Heuristieken leveren wellicht niet gegarandeerd optimale oplossingen, maar tenminste *acceptabele* of *goede*. En een goede heuristiek zal dat doen in een *fractie* van de tijd die de optimale solver nodig heeft voor het vinden van bruikbare oplossingen. Overigens zijn er ook tal van situaties waarin ook het ontwikkelen van goede heuristieken bijzonder moeilijk is. Dit is bijvoorbeeld het geval in die situaties waarin alleen al het vinden van een toegelaten oplossing een moeilijk combinatorisch probleem is, laat staan het vinden van een acceptabele of een goede oplossing. Met name in situaties van grote *schaarste*, waar het een kwestie is van gedetailleerd passen en meten om alleen al een toegelaten oplossing te vinden, kan het voorkomen dat straightforward heuristieken onvoldoende krachtig zijn om op een effectieve wijze oplossingen te kunnen genereren. Daarbij is het ook belangrijk om aandacht te besteden aan het ontwikkelen van boven- of ondergrenzen. Dergelijke grenzen geven een indicatie over hoe ver een gevonden suboptimale oplossing nog van de optimale oplossing af ligt.

Een belangrijk punt hierbij is het volgende: er wordt wel beweerd dat oplossingen alleen *dán* in de praktijk geaccepteerd zullen worden als de daarbij gebruikte solver langs ongeveer dezelfde weg tot een oplossing komt als de menselijke planner. Alleen *dán* zou de planner kunnen begrijpen wat de solver doet, en alleen *dán* zou hij de oplossing kunnen accepteren. Maar mijns inziens is het uiteindelijk geleverde *resultaat* veel belangrijker, en is het minder relevant langs welke weg dat resultaat tot stand gekomen is. De *afwasmachine* in de keuken vormt daarbij een aardige *metafoor*: uiteindelijk levert een afwasmachine hetzelfde resultaat als het handmatige afwassen. Maar dat gebeurt *wél* op een heel andere manier. Een afwasmachine ontwikkelen die op dezelfde manier als de mens te werk gaat (kopje oppakken, in teiltje dompelen, met borsteltje schoonmaken, neerzetten in rekje, afdrogen, etc.) zou ondoenlijk zijn. Maar de afwasmachine levert langs een andere weg uiteindelijk wel hetzelfde resultaat, zo niet een beter.

Wanneer de solver één of meerdere oplossingen gevonden heeft, dan kunnen die beoordeeld worden op hun *bruikbaarheid*. Het komt daarbij zelden voor dat de resultaten van een model in één keer naar volle tevredenheid van de probleemeigenaar zijn. Meestal komen er bij het *evalueren* van de gevonden oplossingen nieuwe alternatieven of nieuwe beperkingen om de hoek kijken. Dat hangt overigens ook af van het doel van de hele procedure. Als er sprake is van een model dat bedoeld is voor de ondersteuning van *strategische* besluitvorming, dan kunnen oplossingen in het algemeen niet direct gelegd worden naast oplossingen zoals die in de praktijk gehanteerd worden. Maar als er sprake is van een meer operationeel model, dat gebruikt wordt om *operationele* planningsprocessen te ondersteunen, dan kunnen de oplossingen meestal *wél* naast oplossingen van de planners gelegd worden. Meestal leidt dat tot veel commentaar: “*Zo zouden we het zelf nooit opgelost hebben*”. Maar het resultaat van dergelijke feedback is dat het model of de parameters er aan aangepast kunnen worden, totdat het model uiteindelijk resultaten oplevert waar men in de praktijk *wél* tevreden mee is.

Een belangrijke volgende stap is het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse. Meestal zijn de invoergegevens namelijk niet zo hard als in het model verondersteld is. Dit geldt in het model voor de materieelinzet op de Noord-Oost bijvoorbeeld voor de telcijfers. Daarom is het noodzakelijk om na te gaan in hoeverre de resultaten van het model beïnvloed worden door afwijkingen in de invoergegevens. Tevens kunnen in deze fase van het proces *what-if* analyses uitgevoerd worden voor een nog beter inzicht in de problematiek en in de mogelijke *trade-offs* tussen de verschillende doelfuncties.

De laatste fase is de *implementatiefase*, ofwel de fase van het toepassen van de gevonden resultaten in de praktijk. In deze fase zal men ook anderen ervan moeten

zien te overtuigen dat de gevonden resultaten inderdaad bruikbaar zijn. Omdat er meestal meerdere *stakeholders* bij een bepaald probleem betrokken zijn, hoeft optimaliteit voor de één niet overeen te komen met optimaliteit voor de ander. Zo zijn de meningen over de eerder genoemde *Rondjes om de Kerk* in verschillende kringen nogal afwijkend van elkaar. Dit kan in de implementatiefase aanleiding zijn voor nieuwe problemen. Het kan er ook toe leiden dat het model nogmaals, maar dan met andere doelstellingen of met andere beperkingen, moet worden doorgerekend. In de praktijk is vaak heel wat creativiteit en diplomatie nodig om dit iteratieproces uiteindelijk te laten convergeren.

Planningsondersteuning

Uit het voorafgaande volgt impliciet dat planners altijd een belangrijke rol zullen blijven spelen in het planningsproces. Modellen en technieken die op basis van *één-druk-op-de-knop* oplossingen genereren die *altijd direct* in de praktijk geaccepteerd worden, bestaan niet. Ik hoop dat ik dat in het voorgaande voldoende duidelijk heb kunnen maken. Daarom is het belangrijk om te onderzoeken hoe de planners het meest effectief ondersteund kunnen worden in hun werk. Belangrijke functies van een planningsondersteunend systeem zijn de volgende:

- **Planbord:** Een Planbord biedt een planner tijdens het plannen flexibele *manipulatie-* en *representatiefuncties*, waardoor er voortdurend een goed beeld bestaat van dat deel van het plan dat al voltooid is, en er goede ondersteuning geboden wordt bij het verder voltooien daarvan. Het is in dit geval de planner zelf die verantwoordelijk is voor de kwaliteit van het plan. Belangrijk bij de ontwikkeling van een Planbord is dat de in het systeem opgeslagen gegevens de informatiebehoefte tijdens het plannen *volledig* afdekken. Wanneer dat niet het geval is, dan zullen tijdens het plannen voortdurend ook andere gegevensbronnen geraadpleegd moeten worden, met alle gevaren van dien, waaronder *inconsistentie* van gegevens. Ook dient veel aandacht besteed te worden aan de gebruikersvriendelijkheid van de interface. De representatie van gegevens op een relatief klein computerbeeldscherm kan gemakkelijk leiden tot weinig overzicht over die gegevens. En juist *óverzicht* over gegevens en deeloplossingen is van groot belang bij complexe planningstaken.
- **Controleur:** Plannen dienen aan bepaalde regels en normen te voldoen: opvolgtijden dienen gerespecteerd te worden, aansluitingen dienen gerealiseerd te worden, etc. Dit zijn zaken die voortdurend door een elektronische

Controleur *gecontroleerd* kunnen worden. Dat kan na afloop van het ontwerpen van het plan gebeuren, maar het kan ook interactief tijdens het plannen plaatsvinden. Wanneer een planner bijvoorbeeld twee treinen te kort na elkaar over hetzelfde stuk infrastructuur wil laten rijden, dan kan hij door de Controleur daarover gewaarschuwd worden met een mededeling dat er een conflict ontstaat met de normen voor de opvolgtijden. Op deze manier kan de Controleur het door de planner ontwikkelde plan voortdurend confronteren met de te hanteren normen, waardoor er in ieder geval een *foutloos* en *conflictvrij* plan zal resulteren. Belangrijk daarbij is dan natuurlijk wel dat er inderdaad eenduidig gedefinieerde en geaccepteerde normen bestaan.

- **Evaluator:** Alle praktijkproblemen zijn in principe optimalisatieproblemen, waarbij gezocht wordt naar een *zo goed mogelijke* oplossing. Een complicerende factor daarbij is in veel gevallen het feit dat er sprake is van *onduidelijke* doelstellingen of van meerdere *conflicterende* doelstellingen. Een elektronische Evaluator kan dan ondersteuning bieden bij het evalueren van een gevonden plan langs de verschillende dimensies. Daarmee kan het systeem dan ook ondersteuning bieden bij het maken van een *trade-off* tussen de verschillende doelstellingen. Het moge duidelijk zijn dat niet alle doelstellingen even gemakkelijk geëvalueerd kunnen worden. Het berekenen van de kosten van een bepaald plan is bijvoorbeeld in veel gevallen relatief eenvoudig. Het a priori evalueren van de robuustheid en de stabiliteit van een dienstregeling daarentegen is een veel complexere aangelegenheid.
- **Generator:** Een elektronische Generator is een module die *zelfstandig* oplossingen voor problemen of deelproblemen kan genereren. Dit gebeurt altijd op basis van een *modelmatige* beschrijving van de oplossingsruimte in termen van variabelen en beperkingen. Het model kan de verschillende oplossingen met elkaar *vergelijken* op basis van één of meerdere doelfuncties. De rol van de planner bestaat in dit geval uit het selecteren van de op te lossen deelproblemen, het aangeven in welke volgorde de deelproblemen moeten worden opgelost, het kiezen van geschikte waarden voor de stuurparameters voor het oplosproces, het evalueren van de gevonden deeloplossingen, en het aan elkaar passen van de verschillende deeloplossingen tot een totaaloplossing.

Zoals ik al eerder aangegeven heb, zijn modellen meestal slechts *beperkte* representaties van de werkelijkheid. Op basis van modellen kunnen daarom alleen *voorzetten* voor oplossingen in de praktijk gevonden worden. Met andere woorden:

nadat een plan op modelmatige wijze met behulp van een Generator tot stand is gekomen, zullen de planners in het algemeen de puntjes nog op de *i* moeten zetten, daarbij geholpen door een Planbord, een Controleur, en een Evaluator.

Daaruit volgt dan vervolgens dat het ontwikkelen van planningsondersteunende systemen niet louter een taak is voor *wiskundigen* of *informatici*, die vaak erg *top-down* vanuit de op te lossen problematiek te werk gaan. Een minstens even belangrijke rol is weggelegd voor een meer *mens-gerichte* benadering, waarbij op een *bottom-up* manier vanuit de wereld van de planners de gewenste functionaliteiten van de te ontwikkelen systemen worden blootgelegd. In de juiste combinatie zullen deze benaderingen zorgen voor goede planningsondersteunende systemen, waar de planners ook daadwerkelijk mee *kunnen* en *willen* werken.

Kortom, het ontwikkelen van en het onderzoek naar planningsondersteunende systemen zijn bij uitstek *interdisciplinaire* activiteiten. Daarmee zijn het bezigheden die zeker aan een Bedrijfskundefaculteit thuishoren, waar interdisciplinariteit immers altijd een belangrijk issue is. Inmiddels is, naast de Faculteit Bedrijfskunde van de Erasmus Universiteit, ook de Faculteit Bedrijfskunde van de Rijksuniversiteit Groningen nauw betrokken bij een onderzoeksproject dat betrekking heeft op de logistieke planningsprocessen in de spoorwegwereld.

Herontwerp en innovatie

De in het voorgaande genoemde onderzoeksprojecten worden uitgevoerd in het kader van het *Herontwerp* van het logistieke planningsproces, waar sinds enige tijd bij de afdeling Logistiek van NS Reizigers aan gewerkt wordt. Het doel van dit Herontwerp is het *verkorten* van de *doorlooptijd* van het logistieke planningsproces en het *verbeteren* van de *kwaliteit* van de resulterende plannen: *sneller* en *beter*.

Het Herontwerp is gedeeltelijk een zaak van *ontwerpen* en *ontwikkelen*. Daarbij gaat het zowel om de *organisatie* van het planningsproces en de *werkwijze* van de planners als om de *informatiesystemen* die voor de ondersteuning daarvan nodig zijn. Maar wat mij betreft is de grootste uitdaging gelegen in het *onderzoek* naar de *intelligentie* van deze ondersteunende systemen, en naar het inbedden van deze intelligentie in zodanig gebruikersvriendelijke interfaces dat de planners er inderdaad mee kunnen en willen werken. In het bijzonder gaat het dan om modellen en technieken voor het analyseren en het oplossen van logistieke planningsproblemen. *Alléén* met behulp van dergelijke modellen en technieken zullen de ondersteunende systemen méér kunnen worden dan alleen *vastleggingssystemen*, namelijk echte *pro-actieve* assistenten of *sparring partners* voor de planners. En *alléén* met behulp van dergelijke modellen en technieken

zullen de in het Herontwerp beoogde verkorting van de doorlooptijd en de kwaliteitsverbetering van de plannen gerealiseerd kunnen worden.

Op het gebied van modellen en technieken wordt momenteel gewerkt aan onderzoek ten behoeve van de *lijnvoering*, de *dienstregeling*, de *8-uur doorsnede*, de *materieelinzet*, de *personeelinzet*, het *rangeren* op knooppunten, en het *routeren* van materieeleenheden naar het onderhoud. Daarnaast wordt er onderzoek gedaan met behulp van *simulatiemodellen* om de robuustheid en de stabiliteit van de plannen te kunnen beoordelen. Al met al zijn er inmiddels enkele interessante resultaten behaald. Maar er blijft voorlopig ook nog heel veel te doen op dit gebied.

Alles bij elkaar is het Herontwerp een groots opgezet *innovatief* project met een lange doorlooptijd en een groot budget. Het Herontwerp kan gezien worden als een duidelijk voorbeeld van de *vernieuwende* wind die de laatste tijd door de spoorwegwereld waait. Het project *Bestemming: Klant* van NS Reizigers is een ander voorbeeld. Maar er zijn nog veel meer voorbeelden te noemen, bijvoorbeeld op het gebied van het verbeteren van de *kwaliteit* van de *infrastructuur*.

Als alle momenteel binnen de brede spoorwegwereld lopende verbeteringsprojecten gerealiseerd zullen zijn, en wanneer er in het bijzonder voldoende materieel en personeel beschikbaar zal zijn, zullen we uiteindelijk een *kwalitatief hoogstaand* spoorwegsysteem hebben, dat zijn weerga in Europa niet kent. Wat dat betreft ben ik het zeer eens met de mening die Hans Huisinga voortdurend in de media naar buiten brengt. Wezenlijke veranderingen kosten nu eenmaal veel tijd. Maar tijdens de *verbouwing* gaat de *verkoop* zo veel mogelijk gewoon door.

Vooruitgang is nu eenmaal *noodzakelijk*. *Stilstand* is daarom *achteruitgang*, zeker in de huidige dynamische tijd. Gelukkig is innovatie een *onomkeerbaar* proces: éénmaal bedacht en uitgevonden, blijft bedacht en uitgevonden. Innovatie is daarom vooral een kwestie van *tijd* en van *prioriteit*. Als er voldoende prioriteit aan de innovatieve doelstellingen gegeven wordt, dan is de belangrijkste vraag niet meer zozeer: “*kan* het gerealiseerd worden?” maar eerder: “*wanneer* kan het gerealiseerd worden?” Ik hoop daar zowel vanuit de praktijk bij NS Reizigers als vanuit de Erasmus Universiteit een bijdrage aan te kunnen leveren.

Acknowledgements

Tenslotte dan nog de *acknowledgements*. Het feit dat ik hier nu sta is voor mij een belangrijke mijlpaal. Daarom wil ik graag enkele mensen bedanken voor de steun die ze mij op weg hierheen gegeven hebben. Helaas kan ik daarbij niet volledig zijn: vele anderen zouden eigenlijk ook genoemd moeten worden.

In de eerste plaats wil ik hier natuurlijk *Jo van Nunen* noemen. Toen ik in 1984 begon aan de Faculteit Bedrijfskunde, destijds nog het Inter-Universitair Instituut voor Bedrijfskunde in Delft, was ik net afgestudeerd in de Wiskunde. Op dat moment was mijn gevoel voor praktische zaken nog niet erg ontwikkeld. Maar Jo heeft voortdurend het belang benadrukt van wetenschappelijk onderzoek op basis van praktische vraagstellingen. Ik denk dat ik daar veel van geleerd heb, en uiteindelijk is de balans daardoor toch nog in de *goede* richting doorgeslagen. Ik hoop dat onze samenwerking, met als laatste hoogtepunt het EURO congres dat onlangs aan onze Universiteit heeft plaatsgevonden, nog lang zal mogen duren.

De tweede op mijn lijstje is *Tjeu Smeets*, hoofd van de afdeling Logistiek van NS Reizigers. Weinigen binnen de spoorwegwereld zetten een duidelijker stempel op de logistieke innovaties die daar momenteel gaande zijn. Er zijn daarbij inmiddels ook enkele stappen voorwaarts gezet op het gebied van de modelmatige ondersteuning van het logistieke planningsproces. Maar dat is op dit moment alleen nog maar een heel klein topje van de ijsberg: *the best is still to come!*

En *lest best* natuurlijk *Cisca*. Ik zal het hier kort houden, want woorden zouden toch te kort schieten. En zelfs \$60,- zou in dit geval niet genoeg zijn. Wiskundige theorieën beweren dat globale optima moeilijk te vinden zijn. Maar kennelijk is het niet onmogelijk. Jullie zouden eens moeten weten.....

Tenslotte wil ik de Faculteit Bedrijfskunde van de Erasmus Universiteit Rotterdam alsmede het Trustfonds van de Universiteit bedanken voor het instellen van deze leerstoel en voor het vertrouwen dat zij in mij hebben gesteld.

Ik dank u voor uw aandacht.

Literatuur

- Ackoff, R. The Scientific Method. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1984. ISBN 0-89874-661-2.
- Assad, A. Models for rail transportation. *Transportation Research A*, 14A: 205-220, 1980.
- Ben-Khedher, N., J. Kintanar, C. Queille, en W. Stripling. Schedule optimization at SNCF: from conception to day of departure. *Interfaces*, 28: 6-23, 1998.
- Bertrand, J.W.M., J.C. Wortmann, en J. Wijngaard. Produktiebeheersing en material management. Stenfert Kroese, 1996. ISBN 90-207-1788-X.
- Blom, M. Minimum circulation of railway stock on a network, an integer programming approach. Master's thesis, Universiteit van Amsterdam, 1998.
- Brucker, P., J. Hurink, en T. Rolfes. Routing of railway carriages. *Osnabrücker Schriften zur Mathematik*, Reihe P, Heft 205, 1998.
- Bussieck, M.R. Optimal lines in public rail transport. Ph.D. thesis, Technische Universität Braunschweig, 1998.
- Bussieck, M.R., P. Kreuzer, en U.T. Zimmermann. Optimal lines for railway systems. *European Journal of Operational Research*, 96: 54-63, 1997.
- Bussieck, M.R., T. Winter, en U.T. Zimmermann. Discrete optimization in public rail transport. *Mathematical Programming*, 79: 415-444, 1997.
- Caprara, A., M. Fischetti, P. Toth, D. Vigo, en P.L. Guida. Algorithms for railway crew management. *Mathematical Programming*, 79: 125-141, 1997.
- Caprara, A., M. Fischetti, P.L. Guida, P. Toth, en D. Vigo. Solution of large scale railway crew planning problems: the Italian experience. In N.H.M. Wilson (ed.), *Computer Aided Transit Scheduling*, Springer-Verlag, 1999.
- Caprara, A., M. Fischetti, en P. Toth. A heuristic method for the set covering problem. *Operations Research*, 47: 730-743, 1999.
- Carey, M., A model and strategy for train pathing with choice of lines, platforms, and routes. *Transportation Research B*, 28B: 333-353, 1994.
- Carraraesi, P., en G. Gallo. Network models for vehicle and crew scheduling. *European Journal of Operational Research*, 16: 139-151, 1984.

- Claessens, M., N.M. van Dijk, en P.J. Zwaneveld. Cost optimal allocation of rail passenger lines. *European Journal of Operational Research*, 110: 474-489, 1998.
- Cordeau, J.-F., P. Toth, en D. Vigo. A survey of optimization models for train routing and scheduling. *Transportation Science*, 32: 380-404, 1998.
- Delft, D. van. De jongens van het spoorboekje. NRC Handelsblad, bijlage Wetenschap en Onderwijs, 27 oktober 1994.
- Domschke, W. Schedule synchronization in public transit networks. *OR Spektrum*, 11: 17-24, 1989.
- Goverde, R.M.P., P.H.L. Bovy, en G.J. Olsder. The max-plus algebra approach to transportation problems. In: H. Meersman et al. (eds.), *World Transport Research Vol.3: Transport Modelling and Assessment*, ISBN 0-08-043590-4.
- Groot, R. Minimum circulation of railway stock, an integer programming algorithm. Master's thesis, Universiteit van Amsterdam, 1996.
- Heuvel, M.G. van den. Openbaar vervoer in de Randstad. Ph.D. thesis, Technische Universiteit Delft, 1997.
- Hoffmann, K., en M. Padberg. Solving airline crew scheduling problems by branch-and-cut. *Management Science*, 39: 657-682.
- Hooghiemstra, J.S., L.G. Kroon, M.A. Odijk, M. Salomon, en P.J. Zwaneveld. Decision Support Systems support the search for "win-win" solutions in railway network design. *Interfaces*, 29: 15-32, 1999.
- Huisman, T., en R. Boucherie. Running times on railway sections with heterogeneous train traffic. *Transportation Research B*, 35B: 271-292, 2001.
- Huisman, T., R. Boucherie, en N.M. van Dijk. A stochastic model for railway networks. Rapport AE 7/98, Universiteit van Amsterdam, 1998.
- Jorna, R.J. De "zwarte doos" in de bedrijfskunde: cognitie in actie. Oratie aan de Rijksuniversiteit Groningen, 2000.
- Jorna, R.J., H.W.M. Gazendam, H.C. Heesen, en W.M.C. van Wezel. Plannen en roosteren: taakgericht analyseren, ontwerpen en ondersteunen. Lansa Publishing, 1996. ISBN 90-5590-026-5.
- Kroon, L.G., H.E. Romeijn, en P.J. Zwaneveld. Routing trains through railway stations: complexity issues. *European Journal of Operational Research*, 98: 485-498.

- Kroon, L.G., en M. Fischetti. Scheduling drivers and guards: the Dutch Noord-Oost case. Proceedings of the 34th HICSS conference, Hawaii, 2000.
- Kroon, L.G., en M. Fischetti. Crew scheduling for Netherlands Railways: "Destination: Customer". In: J. Daduna en S. Voss (eds.), *Computer Aided Scheduling of Public Transport*, Springer-Verlag, 2001. ISBN 3-540-42243-9.
- Kroon, L.G., en L.W.P. Peeters. A variable running time model for cyclic railway timetabling. ERASM Management Report Series 28-1999. Verschijnt in: *Transportation Science*.
- Kwan, A.S.K., R.S.K. Kwan, M.E. Parker, en A. Wren. Producing train driver schedules under different operating strategies. In N.H.M. Wilson (ed.), *Computer Aided Transit Scheduling*, 129-155. Springer-Verlag, 1999.
- Law, A.M., en W.D. Kelton. *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill Book Company, 1982. ISBN 0-07036696-9.
- Lindner, Th. Train schedule optimization in public rail transport. Ph.D. thesis, Technische Universität Braunschweig, 2000.
- Morgado, E.M., en J.P. Martins. Crews-NS: scheduling train crews in the Netherlands. *Artificial Intelligence*, Spring 1998.
- Montfort, J. van. Optimizing railway carriage circulation with integer linear programming. Master's thesis, Universiteit van Amsterdam, 1997.
- Nachtigall, K. Periodic network optimization and fixed interval timetables. Ph.D. thesis. Deutsches Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, 1999.
- Nachtigall, K., en S. Voget. A genetic algorithm approach to railway synchronization. *Computers and Operations Research*, 23: 453-463, 1997.
- Nachtigall, K., en S. Voget. Minimizing waiting times in integrated fixed interval timetables by upgrading railway tracks. *European Journal of Operational Research*, 103: 610-627, 1997.
- NS, De Koppeling, NS weekblad, 16 December 2000.
- NS. De verbindende factor, NS Jaarverslag over 2000.
- NS homepage www.ns.nl
- Odiijk, M.A. Railway timetable generation. Ph.D. thesis, Technische Universiteit Delft, 1997.

- Odijk, M.A. A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables. *Transportation Research*, 30: 455-464, 1996.
- Olster, G.J., C. Roos, en R.J. van Egmond. An efficient algorithm for critical circuits and finite eigenvectors in the max-plus algebra. *Linear Algebra and Its Applications*, 295: 231-240, 1999.
- Peeters, L.W.P., en L.G. Kroon. A cycle based optimization model for cyclic railway timetabling. In: J. Daduna en S. Voss (eds.), *Computer Aided Scheduling of Public Transport*, Springer-Verlag, 2001. ISBN 3-540-42243-9.
- Railforum Nederland. De rail in de volgende eeuw, 1999.
- Railforum Nederland. Sporen met draagvlak – groene rails als rode draad, 2000.
- Railforum Nederland. Panta Rhei – rail en weg als integrale keten, 2001.
- Railforum Nederland. Groeisporen – meer ruimte voor treinen, 2001.
- Schaafsma, A.A.M. Dynamisch Railverkeersmanagement. Ph.D. thesis. Technische Universiteit Delft, 2001.
- Schrijver, A. Minimum circulation of railway rolling stock. *CWI Quarterly*, 6: 205-217, 1993.
- Schrijver, A., en A. Steenbeek. Dienstregeling ontwikkeling voor Railned. Report CADANS 1.0, CWI Amsterdam, 1994.
- Serafini, P., en W. Ukovich. A mathematical model for periodic event scheduling problems. *SIAM Journal of Discrete Mathematics*, 2: 550-581, 1989.
- Winter, T., en U.T. Zimmermann. Real-time dispatch of trams in storage yards. *Annals of Operations Research*, 2000.
- Zwaneveld, P.J., S. Dauzère-Pérès, C.P.M. van Hoesel, L.G. Kroon, H.E. Romeijn, M. Salomon, en H.W. Ambergen. Routing trains through railway stations: model formulation and algorithms. *Transportation Science*, 30: 181-194, August 1996.
- Zwaneveld, P.J. Railway planning: routing trains and allocation of passenger lines. Ph.D. thesis, Erasmus Universiteit Rotterdam, 1997.
- Zwaneveld, P.J., L.G. Kroon, en S. van Hoesel. Routing trains through a railway station based on a Node Packing model. *European Journal of Operational Research*, 128: 14-33, 2001.