

# STATOR

---

periodiek van de VWS jaargang 8 nummer 3, september 2007

**Wachten, wachten en nog eens wachten**

**Aapjes kijken. Onderzoek naar bezoekersstromen in Apenheul**

**Automatische detectie van uitbijters en trendbreuken in reeksen van verkeersintensiteiten**

**Braess paradox: extra wegen, meer congestie!**

**Over stoeten, files en filles**

**Coca-Cola Enterprises optimaliseert zijn product distributie**

**Operations Research in het openbaar vervoer**

**Nieuwe dienstregeling van NS**

**Wegverkeerd**

---

## STATOR

Jaargang 8, nummer 3, september 2007

STATOR is een uitgave van de Vereniging voor Statistiek en Operationele Research (VVS). STATOR wil leden, bedrijven en overige geïnteresseerden op de hoogte houden van ontwikkelingen en nieuws over toepassingen van statistiek en operationele research. Verschijnt 4 keer per jaar.

### Redactie

Goos Kant (hoofdredacteur), Ana Isabel Barros, Mirjam Moerbeek, Gerrit Stemerding (eindredacteur), Fred Steutel, Hilde Tobi, Marnix Zoutenbier.

### Kopij en reacties richten aan

Prof. dr. G. Kant (hoofdredacteur), Faculteit der Economische Wetenschappen van de Universiteit van Tilburg, Postbus 90153, 5000 LE Tilburg, telefoon 013 - 4668234, mobiel 06-11045089, <G.Kant@uvt.nl>.

### Bestuur van de VVS

*Voorzitter:* prof. dr. R. Gill <voorzitter@vvs-or.nl>  
*Secretaris:* dr. C.G.H. Diks <c.g.h.diks@uva.nl>  
*Penningmeester:* prof. dr. ir. C.A.G.M. van Montfort <kvmontfort@feweb.vu.nl>  
*Statistische dag:* prof. dr. A.W. van der Vaart <aad@cs.vu.nl>  
*Namens de Bedrijfssectie (BDS):*  
prof. dr. R.J.M.M. Does <R.J.M.M.Does@uva.nl>  
*Namens de Biometrische Sectie (BMS):*  
prof. dr. A.H. Zwinderman <a.h.zwinderman@amc.uva.nl>  
*Namens de Economische Sectie (ECS):*  
dr. P.H.F.M. van Casteren <casteren@fee.uva.nl>  
*Namens het Ned. Genootschap voor Besliskunde (NGB):*  
prof. dr. J.J. van de Klundert <j.vandeklundert@math.uni-maastricht.nl>  
*Namens de Sectie Mathematische Statistiek (SMS):*  
dr. P.J.C. Spreij <spreij@science.uva.nl>  
*Namens de Sociaal Wetenschappelijke Sectie (SWS):*  
prof. dr. J.K. Vermunt <j.k.vermunt@uvt.nl>

### Leden- en abonnementenadministratie van de VVS

VVS, Postbus 2095, 2990 DB Barendrecht, telefoon 0180 - 623796, fax 0180 - 623670, e-mail <admin@vvs-or.nl>. Raadpleeg onze website over hoe u lid kunt worden van de VVS of een abonnement kunt nemen op STATOR of op een van de andere periodieken.

### VVS-website

<http://www.vvs-or.nl>

### Advertenties

Monique van Hootegem, Moeflonstraat 5, 6531 JS Nijmegen, e-mail <hootegem@xs4all.nl>. STATOR verschijnt in april, juni, september en december.

### Ontwerp en opmaak

Pharos / M. van Hootegem, Nijmegen

### Uitgever

© Vereniging voor Statistiek en Operationele Research  
ISSN 1567-3383

# Inhoud

- 3** Wachten, wachten en nog eens wachten
- 4** Aapjes kijken. Onderzoek naar bezoekersstromen in Apenheul  
**Elleke Janssen**
- 9** Automatische detectie van uitbijters en trendbreuken in reeksen van verkeersintensiteiten  
**Hans Wüst & Kin Fan Chan**
- 14** Braess paradox: extra wegen, meer congestie!  
**Michiel Bliemer**
- 18** Over stoeten, files en filles - *column*  
**Fred Steutel**
- 19** Agenda
- 20** Coca-Cola Enterprises optimaliseert zijn product distributie  
**Goos Kant**
- 24** Operations Research in het openbaar vervoer  
**Leo Kroon**
- 29** Nieuwe dienstregeling van NS  
**Dennis Huisman & Cor van 't Woudt**
- 34** Wegverkeerd - *column*  
**Onno Boxma**
- 37** De NOSMO en de NOSMO Methodologedag
- 39** Beste Europese proefschrift Operations Research van dr.ir. Bram Kranenburg MTD



## Wachten, wachten en nog eens wachten

Een vast onderdeel van de beta-studies zijn de wachtrij-*theorieën*. Een vast onderdeel van het dagelijkse leven is de wachtrij-*praktijk*. Dagelijks op de snelweg en in het openbaar vervoer. En nu zelfs de doorstroming bij de Apenheul niet meer optimaal is zijn de bellen bij de STATOR-redactie gaan rinkelen: tijd voor een themanummer over vervoer, transport en alle mogelijke doorstromingen die erbij horen.

In dit nummer beschrijven we de technieken voor het meten van de snelheden op de weg. Deze snelheid gaat steeds verder achteruit: in 2007 blijkt er vergeleken met vorig jaar 15% meer filedruk te zijn, met alle nadelen vandien voor de economie. Om de term Nederland Distributieland te blijven waarmaken roept deze organisatie dan ook om diverse oplossingen. Eén van de voorgestelde oplossingen (verwoord door Prof.dr. Mario van Vliet) is 20% meer asfalt. Het uitstellen van de A4-verbreding (nr. 1 in de file top-10) helpt hierbij natuurlijk niet. Meer asfalt helpt echter ook niet altijd, zoals u kunt lezen in dit nummer: de Braess-paradox.

Dan maar met het openbaar vervoer. In dit nummer wordt een tipje van de sluier over de OR-technieken opgelicht. Er wordt op allerlei manieren

gerekend aan het OV en aan het nieuwe NS-dienstrooster in het bijzonder. Met een punctualiteit van 87% over het eerste halfjaar en een verhoogde klanttevredenheid lijkt het daarmee wel goed te zitten. Het spoor is echter niet altijd de uitkomst. Volgens de berekeningen van Betuwelijn-tegenstanders 'verliest het spoor het altijd' voor de vracht: op korte afstand is de vrachtauto goedkoper, op langere afstand de binnenvaart. Goedkoper is echter tegenwoordig niet meer het enige criterium. Gegeven de opwarming van de aarde en de aandacht voor klimaatbeheersing is er nu naast de goedkoopste, kortste en snelste route ook aandacht voor de 'schoonste' route: het minimaliseren op CO<sub>2</sub>-uitstoot. Dit is gelijk een aardige extra dimensie en rekenopgave bij het beoordelen van nieuwe investeringen: hoeveel schoner wordt de wereld als we de A4 gaan verbreden en de wachtrijen daar wegwerken?

Tot slot: over wachtrijen gesproken. Het grote enthousiasme om te publiceren in STATOR heeft ook hier tot wachtrijen geleid. Onze excuses hiervoor. We rekenen nog aan een oplossing...

Veel leesplezier!

De redactie



Foto: Elleke Janssen

## Onderzoek naar bezoekersstromen in Apenheul

ELLEKE JANSSEN

Apenheul is een dierentuin met voornamelijk apen. Een aantal van de apensoorten mag los tussen de bezoekers lopen en de overige soorten zijn te zien op apeneilanden. Deze apen (en ook de andere dieren) trekken zo'n 450.000 bezoekers per jaar. De bezoekers komen echter niet gelijkmatig gespreid over de dagen dat Apenheul open is: de ene dag kan het heel druk zijn (meer dan 6.000 bezoekers), terwijl het de andere dag heel rustig is (minder dan 200 bezoekers). Op die drukke dagen ontstaan er problemen: in bepaalde gebieden is het dan erg vol, waardoor opstoppingen ontstaan, terwijl het in andere gebieden nog relatief rustig is. Apenheul zou graag zien dat de bezoekers zich wat gelijkmatiger over het park verdelen.

### Mogelijke maatregelen

Het is natuurlijk niet mogelijk om bezoekers te dwingen een bepaalde route te lopen. Wel kun je maatregelen bedenken die bezoekers het idee

geven dat het rustiger is of die bezoekers zodanig beïnvloeden dat ze zich beter over het park verspreiden. Vier maatregelen zijn hieronder kort beschreven.

- ▶ Capaciteit uitbreiden: door meer paden aan te leggen of de bestaande paden breder te maken is er meer ruimte voor bezoekers. Zij zullen het minder druk vinden.
- ▶ Routing aanpassen: op dit moment is er één hoofdroute door het park. Bezoekers zien het hele park als ze deze route volgen. Misschien helpt het om twee of meer routes door het park aan te leggen of juist helemaal geen route aan te geven, maar bezoekers te wijzen op de verschillende apensoorten.
- ▶ Presentatieschema aanpassen: er worden presentaties gegeven bij verschillende apensoorten. Dit presentatieschema is zo opgesteld dat bezoekers alle presentaties kunnen zien. Een ander schema zou ervoor kunnen zorgen dat bezoekers zich beter over het park verspreiden.
- ▶ Bezoekers langer vasthouden in rustige gebie-

den: als bezoekers langer in de relatief rustige gebieden blijven, zal de doorstroming gelijkmatiger worden. Wel zul je dan iets moeten doen waardoor de bezoekers langer in het rustige gebied willen blijven. Hierbij kan gedacht worden aan het plaatsen van al dan niet interactieve informatieborden, een speeltoestel voor kinderen, een ijscoke of een nieuwe diersoort. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met het gebied: een ijscoke kan bijvoorbeeld niet in een gebied geplaatst worden waar apen los rondlopen.

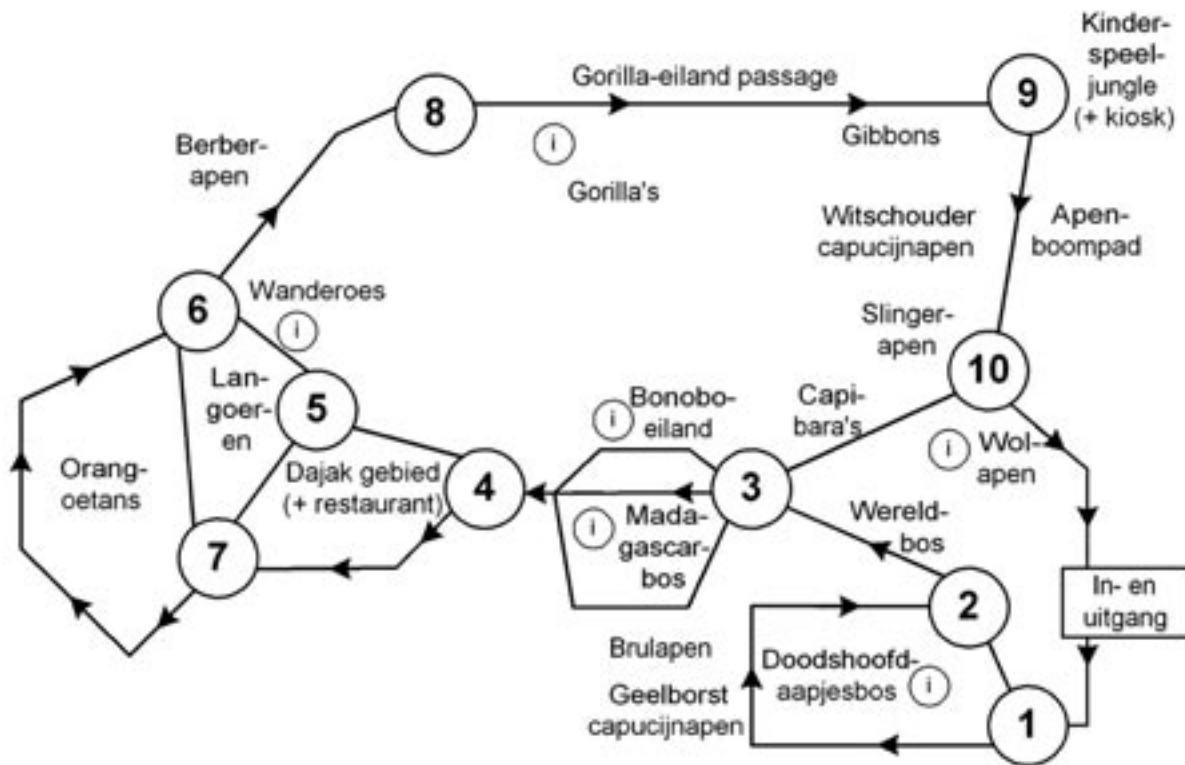
Elk van de bovenstaande maatregelen kan werken, maar ze kunnen ook negatieve bijwerkingen hebben. Een ander presentatieschema zou bijvoorbeeld het gewenste effect kunnen hebben, maar het is ook mogelijk dat bezoekers meer groepsgewijs door het park lopen en daardoor

juist de tegenstelling tussen druk en rustig groter maken.

### Dataverzameling en -analyse

Om te onderzoeken welk effect de maatregelen hebben, zijn data verzameld over de voorkeuren van bezoekers. Bezoekers krijgen bij aankomst in Apenheul een aapvrije tas om hun spullen in op te bergen. Sommige tassen hebben een chip en die chip wordt gelezen door readers op verschillende plekken in het park. Figuur 1 is een plattegrond van Apenheul met de plaatsing van de readers.

De huidige hoofdroute is aangegeven met pijltjes. Niet alle paden zijn hierin opgenomen, maar in het park is wel duidelijk aangegeven dat afwijken van de hoofdroute mogelijk is. Daarnaast staat



Figuur 1: Schematische weergave Apenheul.

Gebied	Gemiddelde bezoektijd	Aantal bezoeken
Doodshoofdaapjes*	15,5 (11,96)	1618
Wereldbos	6,0 (6,19)	2440
Knooppunt apebroodboom (bij reader 3)	5,6 (10,12)	1790
Madagascarbos*	9,8 (9,97)	1274
Dajak gebied	39,5 (21,25)	1189
Orang-oetans & langoeren-bos	13,9 (9,10)	1088
Berberapen*	9,8 (6,05)	1070
Gorilla-eiland passage*	14,0 (10,44)	1070
Kinderspeeljungle	11,1 (16,50)	1086
Bosheuvel* (tussen reader 9 en 10)	20,2 (16,10)	1098
Wolapen* & uitgang	11,1 (10,73)	1283

*\*In deze gebieden lopen apen los tussen de bezoekers*

Tabel 1: Gemiddelde bezoektijden (in minuten) per gebied. (standaarddeviaties tussen haakjes).

aangegeven waar er presentaties worden gehouden (de i-tjes). Door de data van de verschillende *readers* te combineren, is duidelijk welke route de bezoekers genomen hebben en hoe lang ze in de verschillende gebieden zijn geweest. Apenheuvel is hiervoor opgedeeld in 11 gebieden, zoals te zien is in tabel 1. In totaal zijn er gegevens verzameld van 1015 bezoekers, waarbij opgemerkt dient te worden dat één bezoeker eigenlijk staat voor een aantal bezoekers, omdat niet iedere bezoeker een aapvrije tas krijgt.

Ten eerste is er gekeken naar de routes die bezoekers volgen en het blijkt dat de bezoekers voornamelijk de door Apenheuvel aangegeven hoofdroute houden. Vervolgens is bepaald hoe lang bezoekers in een gebied doorbrengen; zie tabel 1. Als een bezoeker een gebied twee of meerdere malen aandoet, dan worden deze waarnemingen apart in tabel 1 weergegeven.

De meeste tijd wordt besteed in het Dajak gebied. Dat is niet zo vreemd, aangezien hier een restaurant is. Bij de kinderspeeljungle is het ook mogelijk om eten te kopen, maar hier komen

bezoekers over het algemeen pas later. Dit gebied heeft dan ook een gemiddelde bezoektijd van 11,1 minuten, maar wel met een standaarddeviatie van 16,50, wat betekent dat sommige bezoekers snel doorlopen en andere juist langer blijven om iets te drinken of te eten.

Eén van de genoemde maatregelen is het wijzigen van het presentatieschema. Dat kan alleen effect hebben als de bezoekers bij presentaties blijven kijken. Daarom is ook de invloed van presentaties onderzocht. In tabel 2 staat een overzicht van de gemiddelde bezoektijden van gebieden waarin een presentatie gegeven wordt als bezoekers gedurende de gehele presentatie in het gebied aanwezig zijn, als ze gedurende een gedeelte van de presentatie aanwezig zijn en als ze in het gebied zijn als er geen presentatie is.

Het blijkt dat de bezoekers significant langer in een gebied aanwezig zijn als er een presentatie gegeven wordt, dus bezoekers kijken naar de presentaties en mogelijk zou het veranderen van het presentatieschema de voorkeuren van bezoekers kunnen beïnvloeden.



Gebied	Gehele presentatie		Gedeeltelijke presentatie		Geen presentatie	
Doodshoofdaapjes	31,4	(18,10)	16,3	(9,95)	11,0	(6,86)
Madagascarbos	29,6	(15,18)	11,7	(9,58)	7,0	(6,61)
Orang-oetans & langoeren-bos	24,9	(15,68)	16,4	(10,09)	12,9	(7,95)
Gorilla-eiland passage	31,7	(20,06)	13,3	(10,11)	13,4	(9,08)
Wolapen & uitgang	32,1	(19,61)	12,9	(11,20)	9,8	(9,04)

Tabel 2: Gemiddelde bezoektijden per gebied betreffende presentaties (standaarddeviaties tussen haakjes).

## Simulatie resultaten

Er is nu bekend hoeveel bezoekers er op ieder moment in Apenheul zijn. Verder is aan ieder gebied een capaciteit toegekend. Met behulp van deze twee gegevens is te berekenen wat de ideale belasting voor ieder gebied is: vermenigvuldig het totale aantal bezoekers met de fractie van de totale capaciteit die toegewezen is aan dat gebied. De *effectieve* belasting is  $o$  als het aantal bezoekers in een gebied onder de ideale belasting is, en het verschil tussen de werkelijke en de ideale belasting als deze eerste groter is. De overbelasting in een gebied is het aantal bezoekers boven de capaciteit; als het er minder zijn is de overbelasting  $o$ . Het doel is nu om eerst overbelasting zoveel mogelijk te voorkomen en daarna om de effectieve belasting zo laag mogelijk te krijgen, onder de voorwaarde dat de bezoekers de tijd die ze in een gebied willen besteden ook mogen besteden. We willen immers niet dat bezoekers zo snel mogelijk door Apenheul heen gejaagd worden.

Ten eerste is bepaald wat de effectieve en overbelasting in de huidige situatie is en vervolgens is de ideale situatie doorgerekend. In deze situatie volgen de bezoekers de route die ze zelf gekozen hebben, maar er wordt bepaald of ze deze route in de originele volgorde of in de omgekeerde volgorde moeten lopen. Dit gebeurt op basis van een mixed integer linear programming model, waarin de som van de totale effectieve belasting

en de totale overbelasting maal penalty kosten geminimaliseerd wordt.

Daarna zijn verschillende versies van de mogelijke maatregelen doorgerekend met behulp van simulatie. In tabel 3 staat een overzicht van een aantal van die maatregelen, met de bijbehorende effectieve belasting en overbelasting.

De maatregelen in de tabel zijn: beperkte capaciteit toevoegen, twee hoofdroutes uitzetten, het presentatieschema aanpassen en bezoekers vasthouden met behulp van nieuwe attracties. De twee hoofdroutes zijn de huidige hoofdroute en deze route in omgekeerde volgorde. Verder mogen bezoekers zelf kiezen welke route ze volgen en er wordt aangenomen iedere route door ongeveer de helft van de bezoekers wordt gekozen, mits er geen presentatie begint in het doodshoofdaapjesbos. Deze presentatie is namelijk te horen bij de ingang en bezoekers die geïnteresseerd zijn in presentaties zullen dan geneigd zijn om de huidige hoofdroute te kiezen. In het nieuwe presentatieschema is zo dat bij populaire apensoorten ieder uur een presentatie wordt gegeven en bij de minder populaire apensoorten iedere twee uur. Bovendien beginnen alle presentaties op hetzelfde tijdstip.

Ten slotte zijn er ook combinaties van maatregelen doorgerekend met simulatie en de resultaten hiervan staan eveneens in tabel 3. Uit deze tabel blijkt duidelijk dat het uitzetten van twee hoofdroutes het meeste effect heeft en dat

Scenario	Totale effectieve belasting	Totale overbelasting
Huidige situatie	54.520	4.866
Ideale situatie	37.910	0
Maatregelen		
Beperkte capaciteit toevoegen	52.430	2.347
Vrije keuze twee routes	39.394	762
Presentaties elk uur en elke twee uur	44.389	2.483
Bezoekers vasthouden met behulp van attracties	56.105	3.946
Combinaties van maatregelen		
Capaciteit & routing	36.898	130
Capaciteit & presentaties	41.856	602
Capaciteit & vasthouden	54.632	1.698
Routing & presentaties	39.431	7.988
Routing & vasthouden	37.621	409
Presentaties & vasthouden	41.977	2.434
Capaciteit, routing & presentaties	36.585	5.137
Capaciteit, routing & vasthouden	35.404	148
Capaciteit, presentaties & vasthouden	41.977	2.434
Routing, presentaties & vasthouden	37.834	8.095
Alle maatregelen: capaciteit, routing, vasthouden & presentaties	35.319	5.564

Tabel 3: Overzicht simulatieresultaten.

deze maatregel goed gecombineerd zou kunnen worden met het uitbreiden van de capaciteit (wat wellicht niet wenselijk is) en/of met het vasthouden van bezoekers in rustige gebieden. Het veranderen van het presentatieschema werkt niet goed en in combinatie met het aanpassen van de routing heeft deze maatregel een duidelijk negatief effect.

## Conclusie

Uit het onderzoek voor stichting Apenheul blijkt dat het inderdaad mogelijk is om de bezoekers beter over het park te spreiden dan nu het geval is. Uit simulatie blijkt dat de meest effectieve

maatregel het uitzetten van twee hoofdroutes is: de huidige hoofdroute en deze route in omgekeerde volgorde. Deze maatregel kan nog verbeterd worden door het uitbreiden van de capaciteit en/of het vasthouden van bezoekers in rustige gebieden.

Voor het volledige verslag van het onderzoek verwijs ik naar mijn afstudeerscriptie. *Janssen, E. (2005). Bezoekersstromen in Apenheul. Onderzoek naar maatregelen om de fysieke doorstroom van bezoekers in Apenheul te verbeteren. Afstudeerscriptie Econometrie & Operations Research. Tilburg: Universiteit van Tilburg.*

ELLEKE JANSSEN is verbonden aan de Faculteit Economie en Bedrijfswetenschappen van de Universiteit van Tilburg als docent en promovenda.  
E-mail: <e.janssen\_1@uvt.nl>.



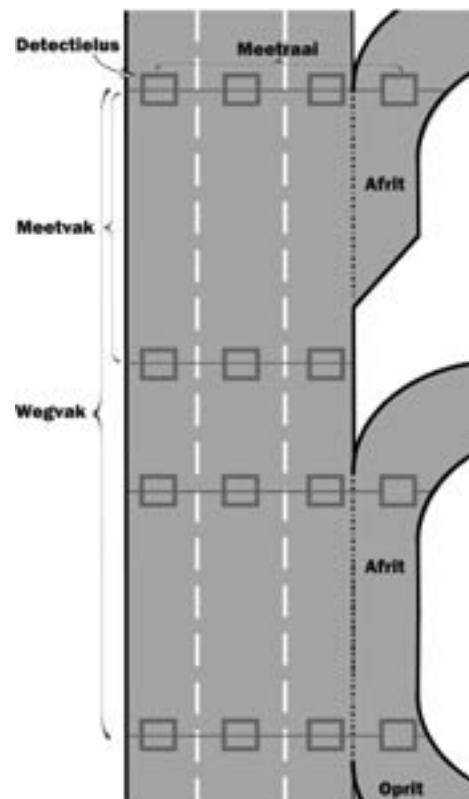


## Automatische detectie van uitbijters en trendbreuken in reeksen van verkeersintensiteiten

HANS WÜST & KIN FAI CHAN

Rijkswaterstaat (RWS) is verantwoordelijk voor de levering van verkeersinformatie van het rijkswegennet. Meer dan 2500 kilometer autosnelwegen zijn voorzien van 18.000 inductielussen in het wegdek die snelheid en voertuigpassages meten. Deze informatie wordt tot verkeersinformatie verwerkt door een keten van drie systemen:

- ▶ Het *Monica-systeem* verwerkt de lussignalen tot voertuigpassages (intensiteit) en gemiddelde snelheid per minuut.
- ▶ Het *Monibas-systeem* aggregereert de Monica-gegevens tot gegevens per rijbaandoorsnede (meetraai) en tot reistijd en filelengte per meetvak. Een meetvak is een weggedeelte tussen twee meetraaien. Er zijn circa 8000 meetraaien en 3000 meetvakken.
- ▶ Het *Trefi-systeem* verwerkt de meetvakinformatie tot reistijden en file-informatie. Er zijn circa 1000 wegvakken gedefinieerd, die worden begrensd door toe- en afritten of knooppunten.



Deze informatie wordt op verschillende punten in de keten afgetapt voor on- en offline-gebruik. De Online-gebruikers zijn: verkeersmanagers in verkeerscentrales die de gegevens gebruiken voor het regelen van het verkeer; weggebruikers die informatie krijgen via DRIP's (Dynamische Route Informatie Panelen); dienstverleners die onder meer zorgdragen voor de filemeldingen en actuele reistijden aan weggebruikers. Bekende servicemedia zijn radio, teletekst, internet of SMS. Ook sommige commerciële navigatiesystemen gebruiken actuele reisinformatie om files te kunnen vermijden.

Offline worden de gegevens bijvoorbeeld gebruikt voor: voorbereiding en planning van wegaanleg en wegonderhoud en de uitwerking van regelscenario's door RWS; en onderzoek, verkeersmodellering en beleidsmonitoring door onderzoekers, adviesbureaus en RWS.

Binnen de informatieketen kunnen op alle niveaus fouten ontstaan. Storingen van het meetstelsel kunnen bijvoorbeeld tot foutieve snelheden leiden. Te hoge snelheden leiden gemakkelijk tot het falen van automatische incidentdetectie of tot het over het hoofd zien van bepaalde files.

Ander soorten fouten kunnen ontstaan als lussen een verkeerde detectorcode, rijstrook, meetraai of rijrichting krijgen toegekend. In bepaalde situaties schaadt dit de geloofwaardigheid van de verkeersinformatie doordat extreem hoge reistijden of zelfs spookfiles worden gemeld.

Voorheen ontbrak een systematische controle op fouten. Wel werd een deel van de fouten achteraf gevonden tijdens gebruik van de gegevens. Met name als de foutoorzaak zich in een ander systeem bevond dan het systeem waarin de fout zich openbaarde, bleek het vinden van de foutoorzaak vaak erg bewerkelijk. Dit wordt veroorzaakt door de technische en organisatorische scheiding van de systemen en door de complexe verbanden tussen de gegevens in de systemen.

## Het Da Vinci project

Om de betrouwbaarheid van de verkeersinformatie te kunnen verbeteren heeft RWS het Da Vinci project opgestart. Da Vinci staat voor DATA Validatie & INSpectie voor Corporate Informatieketen.

Naast betrouwbaarheidsverbetering kan dit project ook eenvoudig leiden tot een reductie van de beheerskosten van de verkeersmeet- en verwerkingssystemen. Een ander voordeel is dat op termijn door de hogere kwaliteit en beschikbaarheid de analyse van de historische verkeersgegevens minder bewerkelijk en productiever wordt.

Het Da Vinci project richt zich op integrale en systematische kwaliteitscontrole van de drie systemen in de verkeersinformatieketen. Integrale controle wordt gerealiseerd door centrale opslag van de uitvoer van de drie verwerkingssystemen in combinatie met een *drill-down*-functionaliteit. De *drill-down*-functionaliteit biedt de mogelijkheid om gegevens en hun eventuele brongegevens interactief te analyseren, rekening houdend met de relaties tussen de verschillende ruimtelijke en temporele aggregatieniveaus van de verwerkingssystemen.

Systematische controle wordt mogelijk gemaakt door automatische detectie van potentiële fouten met detectiemethodes voor drie soorten inconsistenties:

► *Ruimtelijke* inconsistenties.

Deze worden gedetecteerd op basis van 'de wet van behoud van voertuigen'. De methode is geschikt voor het detecteren van slecht functionerende detectoren en specifieke configuratiefouten.

► *Verkeerskundige* inconsistenties.

Deze methode maakt gebruik van fundamentele verbanden tussen verkeerskundige grootheden (zoals snelheid en intensiteit). Hiermee kunnen configuratiefouten, verwerkingsfouten of falende detectoren worden opgespoord.

► *Temporele* inconsistenties.

Uitbijters en trendbreuken kunnen aanwijzingen

zijn voor tijdelijke of blijvende systeemstoringen of configuratiefouten. In het vervolg van dit artikel wordt kort ingegaan op de voor automatisch detectie van uitbijters en trendbreuken gebruikte methodiek.

### Detectie van temporele inconsistenties

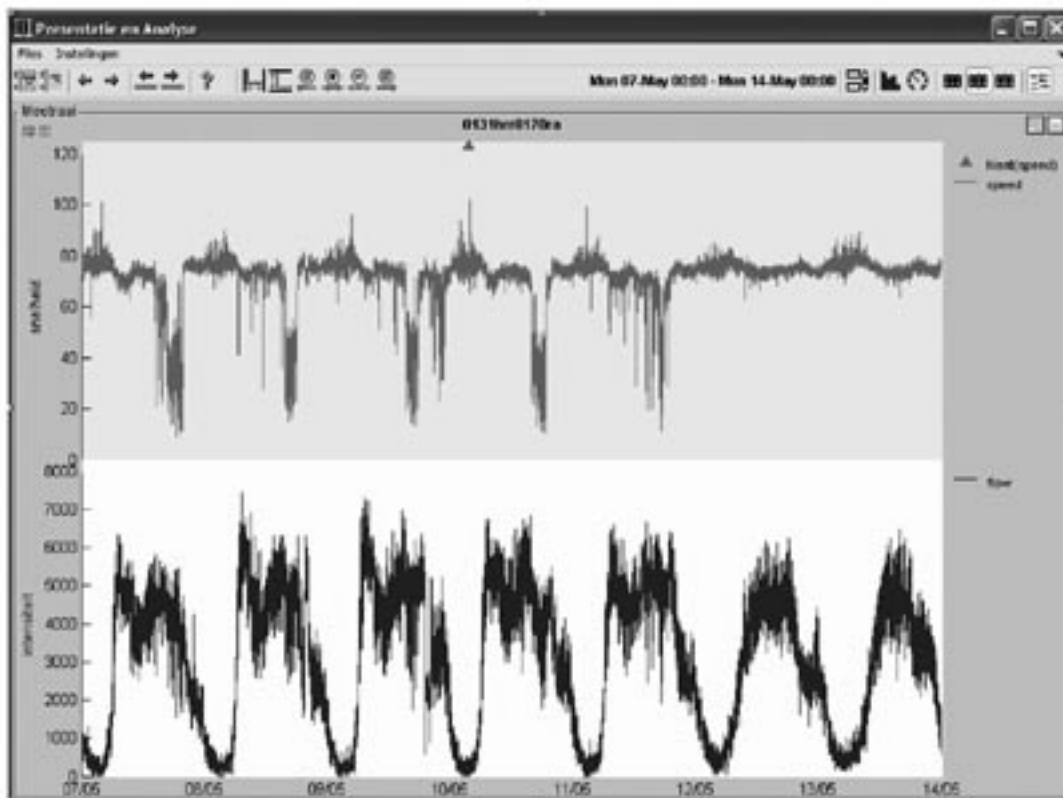
Traditionele verkeerskundige tijdreeksvalidatiemethoden maken gebruik van gemiddelde dagcurves. Hiermee kan echter niet eenvoudig onderscheid worden gemaakt tussen uitbijters en trendbreuken.

Voor systematische analyse en interactief gebruik binnen het Da Vinci systeem was derhalve behoefte aan een rekenefficiënte methodiek voor automatische detectie van uitbijters en trendbreuken. De methodiek moest toepasbaar zijn op reeksen met een lengte van een jaar en een

tijdresolutie van minimaal een minuut waarin ontbrekende waarnemingen kunnen voorkomen. Als eerste stap is ervoor gekozen om de methodiek alleen op verkeersintensiteiten toe te passen.

Om de aard van verkeersgegevens te illustreren geeft Figuur 1 een Da Vinci schermbeeld met snelheids- en intensiteitsgegevens van een meetlocatie op de A13 met een minuuttijdstap en een lengte van een week. De onderste afbeelding met intensiteiten toont duidelijk werk- en weekenddagpatronen en de relatief kleine verschillen tussen de afzonderlijke werkdagen en weekenddagen.

Om de rekentijd binnen acceptabele grenzen te brengen is een aanzienlijke vereenvoudiging toegepast. In plaats van de rekenintensieve expliciete modellering van de periodieke intensiteitspatronen met bijvoorbeeld harmonische componenten, wordt elk tijdstip binnen het weekpatroon afzonderlijk gemodelleerd. Hierbij heeft elk



Figuur 1: Het verloop van snelheid (boven) en intensiteit (onder) in een meetlocatie op de A13 van maandag 7 mei t/m zaterdag 13 mei 2007 (tijdstap 1 minuut, intensiteit op uurschaal).

model een tijdstap van een week. Bij een aangeboden tijdreeks met een tijdstap van een minuut zijn er dus 10080 (24x7x60) modellen, bij een tijdstap van een uur 168 (24x7). Door deze vereenvoudiging wordt derhalve de correlatie tussen direct naburige meetwaarden in de tijdreeks genegeerd. Elk weektijdstip wordt gemodelleerd met een toestandsmodel in de vorm van een constant niveau-model, dat slechts één toestandselement heeft.

Door het gebruik van toestandsmodellering kon een rekenefficiënte, op Kalman-filtering gebaseerde, automatische monitoringtechniek worden gebruikt (West en Harrison 1986). Deze techniek is mede gekozen omdat ze probleemloos met ontbrekende waarnemingen kan omgaan.

## Monitoringtechniek

De monitoringtechniek werkt als volgt. De voorspelling van het toestandsmodel, in het vervolg standaardmodel genoemd, wordt voor elke nieuwe waarneming vergeleken met de voorspelling van een alternatief model. De voorspelling van dit alternatieve model wordt geconstrueerd door vergroting van de voorspelvariantie van het standaardmodel. Een waarneming wordt als bijzonder gemarkeerd als de likelihoodverhouding van de voorspellingen van standaard en alternatief model een bepaalde grenswaarde onderschrijft.

Als een waarneming als bijzonder is gekenmerkt, wordt op basis van de waarneming van de erop volgende week beoordeeld of het een uitbijter of een breukaanzet betreft. Hiertoe worden wederom de voorspellingen van twee modellen vergeleken; een breuk- en een uitbijtermodel. Het breukmodel bestaat uit het standaardmodel dat extra adaptief is gemaakt door de toestandsvariantie te verhogen. Daardoor past het zich in de Kalman-filter updatestep aan het afwijkende niveau van de bijzondere waarneming aan. Het uitbijtermodel negeert de bijzon-

dere waarneming en voorspelt dezelfde waarde als het standaardmodel voor de vorige tijdstap. Als de likelihoodverhouding van de voorspellingen van breuk- en uitbijtermodel een bepaalde grenswaarde overschrijdt wordt de bijzondere waarneming van de voorgaande tijdstap als breuk gemarkeerd en wordt het breukmodel tot standaardmodel gemaakt. Anders wordt de bijzondere waarnemingen als uitbijter gemarkeerd en wordt het uitbijtermodel standaardmodel.

De methodiek biedt ook de mogelijkheid tot detectie van geleidelijke niveauveranderingen. Dit gebeurt op basis van het product van de opeenvolgende, voor de detectie van bijzondere waarnemingen gebruikte, likelihoodverhoudingen. Zodra dit product een grenswaarde onderschrijft, is een geleidelijke niveauverandering gedetecteerd. De runlengte van het product geeft een indicatie van het vermoedelijke begintijdstip van deze verandering. Vervolgens wordt het model aangepast aan het afwijkende intensiteitsniveau door het standaardmodel in de Kalman-filter stap extra adaptief te maken door verhoging van de toestandsvariantie. Tevens worden de runlengte en het product van likelihoodverhoudingen opnieuw geïntialiseerd. Initialisatie vindt overigens ook plaats op elk moment dat dit product groter wordt dan 1.

De methode is zodanig ingericht dat geleidelijke veranderingen ook kunnen worden gedetecteerd in tijdreeksen met relatief veel verspreid of groepsgewijs ontbrekende waarnemingen of uitbijters. De detectiemethode is OSCAR (*Outlier en Structural Change Auto-Recognition*) genoemd.

*Voorbeeld* Figuur 2 toont het resultaat van een OSCAR-run in de Da Vinci omgeving voor de intensiteit van een meetraai op de A20. De intensiteitsgegevens, uit de periode van 1 maart 2006 t/m 31 december 2006, zijn in dit geval geaggregeerd tot uurtotalen. De intensiteitwaarden worden in kleur weergegeven. De horizontale as bevat alle uren binnen een week en de verticale as alle beschikbare weken.

De linker grafiek geeft de intensiteit van 11:00-12:00 op dinsdagen; aangegeven met de verticale cross-hair. De grafiek onderaan geeft het weekpatroon van de intensiteit in de week van 15 t/m 21 mei 2006; aangegeven met de horizontale cross-hair. Door het OSCAR-model gedetecteerde trendbreuken worden gemarkeerd met een groene en uitbijters met rode symbolen. Uit Figuur 2 is een trendbreuk zichtbaar op dinsdag 9 mei. Op basis van externe informatie blijkt dat deze breuk niet door systeemfalen wordt veroorzaakt, maar door opening van een extra rijstrook.

## Ervaringen

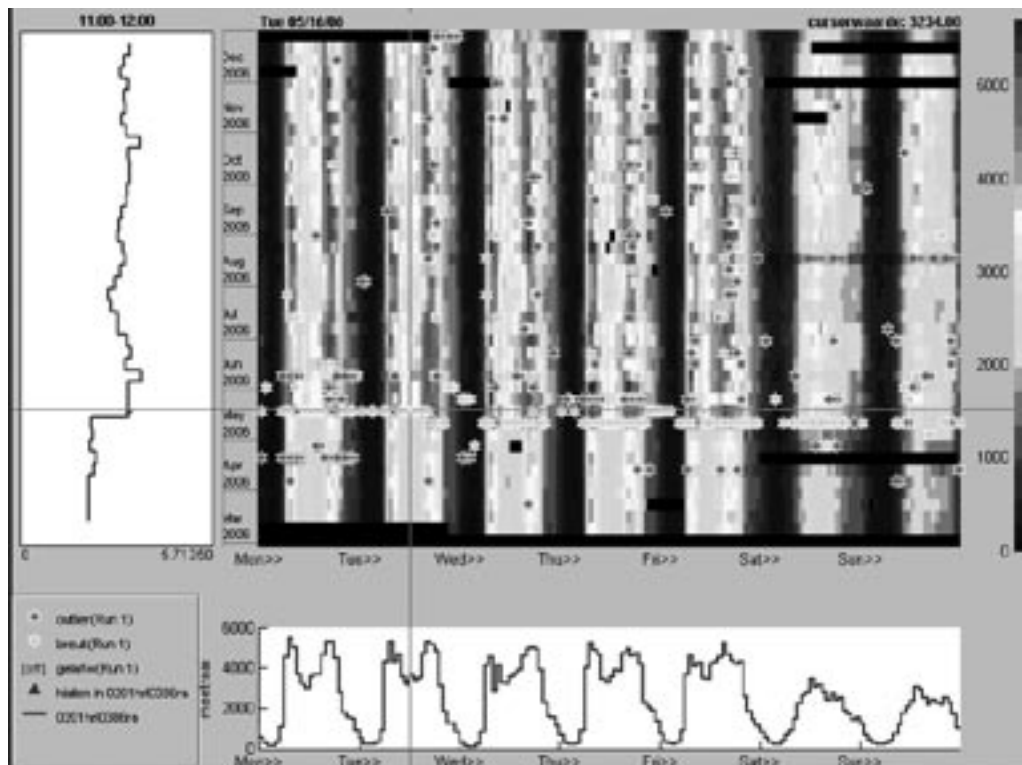
De eerste ervaringen met het gebruik van de binnen het Da Vinci systeem geïmplementeerde methodiek voor automatische detectie van temporele inconsistenties zijn positief. De methodiek is voldoende rekenefficiënt voor interactief en batch-

gebruik. Het OSCAR-model blijkt erg robuust voor de parameterinstellingen; de richtwaarden uit de literatuur blijken goed bruikbaar. In een volgende fase van het Da Vinci project wordt de opname voorzien van externe informatie over evenementen, incidenten, extreme weersomstandigheden, wegwerkzaamheden en dergelijke, zodat efficiënter onderscheid kan worden gemaakt tussen systeemfalen en externe oorzaken.

### LITERATUUR

West M. and Harrison P.J. (1986). Monitoring and adaptation in Bayesian forecasting models, *Journal of the American Statistical Association*, 80, 389, 73-83.

*KIN FAI CHAN is afgestudeerd bij TU Delft Luchtvaart en Ruimtevaarttechniek. Sinds 2000 werkzaam bij Adviesdienst Verkeer en Vervoer, nu Dienst Verkeer & Scheepvaart, afdeling Verkeerssystemen) en projectleider van het project Da Vinci. E-mail: <kinfai.chan@rws.nl>. HANS WÜST is afgestudeerd bij TU Delft Maritieme Techniek. Sinds 2004 werkzaam als adviseur statistiek bij Adviesdienst Verkeer en Vervoer (thans Dienst Verkeer en Scheepvaart, afdeling Modellen en verkenningen). E-mail: <hans.wust@rws.nl>.*



Figuur 2: Resultaat van het OSCAR-model voor intensiteiten op een meetraai op de Azo voor de periode 1 maart t/m 31 december 2006, met een tijdsresolutie van 60 minuten.





# BRAESS PARADOX

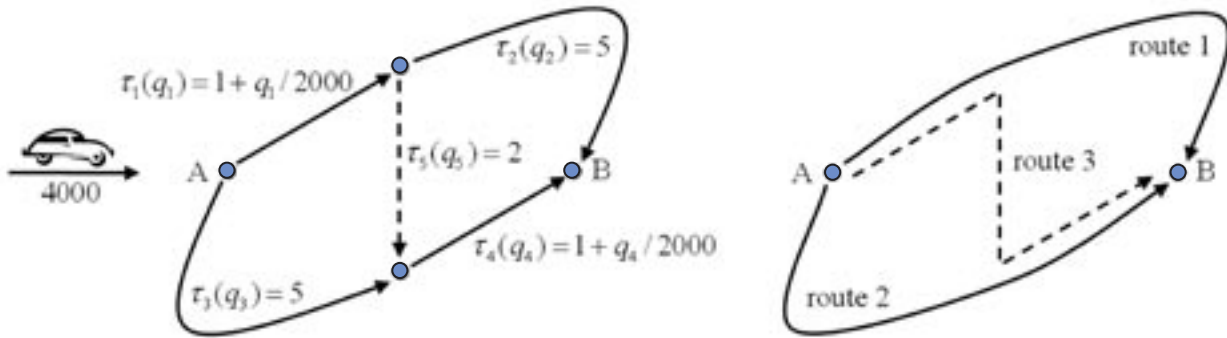
## extra wegen, meer congestie!

MICHIEL BLIEMER

De Braess paradox beschrijft het principe waarbij aanleg van meer infrastructuur kan leiden tot langere reistijden voor alle reizigers. Met een eenvoudig rekenvoorbeeld wordt aangetoond dat door aanleg van een nieuwe weg de congestie kan toenemen. Dit komt doordat reizigers (egoïstische) routekeuze beslissingen nemen zonder de gevolgen van andere reizigers daarbij in acht te nemen. Met prijsprikkels kan het gedrag van reizigers worden beïnvloed, zodanig dat het transportsysteem optimaal functioneert.

In de verkeerskunde is de Braess paradox een beroemd voorbeeld waarbij aanleg van extra infrastructuur niet leidt tot kortere reistijden, maar tot langere reistijden voor automobilisten. Dietrich Braess heeft deze paradox beschreven (zie Braess, 1968, en een Engelse vertaling in Braess et al, 2005) met behulp van een zeer eenvoudig voorbeeld. Buiten de verkeerskundige discipline is deze paradox veelal onbekend. In dit artikel zal deze paradox worden beschreven aan de hand van een aangepast voorbeeld. De Braess paradox





Figuur 1: Transportnetwerk.

is niet een hypothetische situatie, het kan zeer zeker ook in de praktijk optreden, en is om die reden interessant om te analyseren. Tevens wordt deze paradox in het licht van prijsbeleid bekeken.

### Gebruikersevenwicht

In het eenvoudige model dat Braess beschrijft wordt uitgegaan van automobilisten die hun individuele reistijd willen minimaliseren door middel van routekeuze. Dit is in principe een egoïstische keuze, aangezien daarbij geen rekening wordt gehouden met de gevolgen van hun keuze voor de andere automobilisten. Zoals later zal blijken leidt dit tot niet-optimaal gebruik van de infrastructuur.

De reistijd die de automobilisten ondervinden zal echter afhangen van de drukte op de weg. Hoe meer auto's zich op een bepaald stuk weg bevinden, hoe langer de reistijd. Dus de routekeuze wordt niet gemodelleerd als een kortste pad probleem, maar in dit geval een snelste pad probleem voor alle individuele reizigers waarbij de reistijd afhankelijk is van het aantal automobilisten op de weg.

Beschouw als voorbeeld het transport netwerk

in Figuur 1. Er zijn twee routes van A naar B, de gestippelde weg bestaat nog niet. De reistijden van elk wegsegment  $a$  wordt aangeduid met  $T_a(q_a)$ , waarbij  $q_a$  het aantal auto's is dat wegsegment  $a$  binnenrijdt. Wegsegmenten 1 en 4 hebben een beperkte capaciteit (slechts 1 rijstrook), waardoor de reistijd toeneemt als het aantal auto's  $q_a$  toeneemt. Voor wegsegmenten 2 en 4 wordt verondersteld dat zij voldoende capaciteit hebben zodat hier geen congestie optreedt. De reistijd van A naar B via beide routes is  $1+5=6$  minuten indien er geen verkeer op het netwerk is. De veronderstelde vervoersvraag van A naar B is 4000 auto's. Indien alle automobilisten allen kiezen voor route 1 of route 2, dan zal de reistijd op die route  $1+4000/2000+5=8$  minuten zijn, terwijl de ongebruikte route een reistijd heeft van 6 minuten. In deze situatie zullen een aantal reizigers naar de ongebruikte (snellere) route gaan, totdat er geen reistijdwinsten meer te behalen zijn. Dit leidt uiteindelijk tot een zogenaamd Wardrop gebruikers-evenwicht (Wardrop, 1952), waarbij geen enkele reiziger zijn/haar reistijd kan verminderen door eenzijdig van route te veranderen. De uiteindelijke situatie zal zijn dat 2000 automobilisten kiezen voor route 1 en 2000 voor route 2, met beiden een reistijd van  $1+2000/2000+5=7$  minuten.

## Uitbreiding infrastructuur

Veronderstel nu, dat een nieuwe weg wordt aangelegd (de gestippelde weg, waarbij wordt aangenomen dat deze weg voldoende capaciteit heeft), waardoor de congestievrije reistijd van A naar B wordt verkort van 6 naar 4 minuten. Maar de uiteindelijke reistijd die de automobilisten ervaren zal door de congestie een stuk hoger zijn. Uitgaande van hetzelfde principe van Wardrop zal nu iedereen de nieuwe route 3 kiezen, waardoor de reistijd oploopt tot  $(1+4000/2000)+2+(1+4000/2000)=8$  minuten. De reistijd op de andere routes is ook 8 minuten, dus er is geen reden voor de automobilisten om van route te veranderen. Vóór de aanleg van de nieuwe weg was de reistijd van A naar B 7 minuten, terwijl ná de aanleg deze oploopt tot 8 minuten!

## Analyse

De reden waardoor de reistijd toeneemt, ook al is er meer infrastructuur, ligt in het feit dat de (egoïstische) automobilisten geen rekening houden met de gevolgen van hun routekeuze. Er zijn twee bottlenecks in het transport netwerk, namelijk wegsegmenten 1 en 4. Routes 1 en 2 gebruiken slechts één van deze bottlenecks, terwijl route 3 beiden gebruikt. Indien een automobilist voor route 3 kiest, dan zal hierdoor de reistijd op schakels 1 en 4 stijgen voor *alle andere automobilisten* die deze schakels ook gebruiken. Hier houdt de automobilist echter geen rekening mee.

Indien automobilisten niet egoïstisch zijn, maar rekening houden met de vertraging die zij veroorzaken voor andere automobilisten, dan is het optimaal om alleen routes 1 en 2 te gebruiken. Dan is uiteindelijk iedereen sneller op de plaats van bestemming. Echter, route 3 heeft in dit geval een

reistijd van 6 minuten, dus lager dan de reistijd van routes 1 en 2 (7 minuten). Dit zogenaamde systeem optimum leidt tot een instabiele situatie waarin automobilisten geneigd zijn af te wijken van routes 1 en 2, waardoor het systeem wordt verstoord en uiteindelijk iedereen langer over de rit doet.

In de speltheorie is dit principe ook bekend, zoals bij het zogenaamde 'prisoner's dilemma' (zie bijvoorbeeld Poundstone, 1992). Hierbij worden twee gevangenen individueel ondervraagd. Indien zij beiden de misdaad ontkennen krijgen ze een lage straf, terwijl als ze beiden bekennen er een langere gevangenisstraf staat te wachten. Als echter één van de gevangenen de misdaad ontkent terwijl de ander bekent dat ze het hebben gedaan, dan zal degene die bekent vrijuit gaan, terwijl degene die ontkent extra straf krijgt. In het (egoïstische) Nash evenwicht, dat equivalent is aan het Wardrop evenwicht, zullen beide gevangenen bekennen, aangezien dit de beste individuele strategie is. Echter, als ze zouden samenwerken zou het beter zijn beiden te ontkennen, wat leidt tot het Pareto optimum (gelijk aan het systeem optimum). Samenwerken is echter onwaarschijnlijk aangezien er winst te behalen is door, na de afspraak om samen te werken, toch hiervan af te wijken.

## Bereiken van een systeemoptimum

In werkelijkheid maken automobilisten onderling geen afspraken om samen te werken, iedereen kiest de beste route voor zichzelf. Dus het systeemoptimum zal niet vanzelf ontstaan. Is het mogelijk om een systeemoptimum te bereiken op een andere manier? Ja, maar hiervoor zal een andere partij toezicht moeten houden, zoals de overheid. Zo zouden politieagenten het verkeer kunnen regelen. Beter zou het zijn om door mid-

del van andere prikkels de automobilisten te beïnvloeden, zodanig dat ze 'uit zichzelf' routes kiezen die optimaal zijn voor alle automobilisten. Prijsprikkels zoals tollens kunnen hiervoor worden gebruikt (voor meer over prijsbeleid op de weg, zie bijvoorbeeld Verhoef et al, 2007). Door een tol te heffen op wegsegment 5 zullen minder reizigers route 3 kiezen, waardoor uiteindelijk een systeem optimum kan worden bereikt. Merk dat wegsegment 5 (waar de tol wordt geheven) zelf geen congestie heeft. Hetzelfde kan worden bereikt door een tol te heffen op zowel wegsegment 1 als 4.

### Geen nieuwe infrastructuur?

Nu rijst wellicht de vraag of het wellicht niet beter is om wegsegment 5 helemaal niet aan te leggen. Of, indien deze weg er al ligt, deze maar geheel af te sluiten. Dit hangt van de vervoersvraag af. Bij een vervoersvraag van 4000 voertuigen is het inderdaad verstandiger om de weg niet aan te leggen, danwel af te sluiten. Echter, gedurende de dag varieert de vervoersvraag. Als er gedurende een rustige periode een vervoersvraag is van 2000 voertuigen, dan is het wél voordelig om de nieuwe weg in gebruik te nemen. Iedereen zal dan namelijk route 3 kiezen, met een reistijd van  $(1+2000/2000)+2+(1+2000/2000)=6$  minuten, terwijl routes 1 en 2 ongebruikt blijven met een reistijd van 7 minuten. Indien de nieuwe weg er niet was, zou de reistijd  $(1+1000/2000)+5=6,5$  minuten bedragen (waarbij routes 1 en 2 elk 1000 automobilisten te verwerken krijgen). Oftewel, er kan per automobilist een halve minuut bespaard worden door de aanleg van de nieuwe weg. De hierboven beschreven tol zou dus moeten variëren over de dag en over de verschillende dagen, waarbij een hoger tarief geldt gedurende drukke perioden, en een lage tol tijdens rustige perioden.

### Conclusie

Het mag duidelijk zijn dat extra infrastructuur niet altijd de oplossing is voor de fileproblematiek. Door middel van prijsprikkels zouden automobilisten gestuurd kunnen worden in hun gedrag, zodat het transport systeem efficiënter wordt benut, waarbij zelfs iedereen erop vooruit zou kunnen gaan (dit zal niet altijd het geval zijn, soms zal een kleine groep automobilisten slechter af zijn, waarbij een grote groep automobilisten beter af is). Het is dan ook niet verbazingwekkend dat in vele landen er veel interesse is voor het invoeren van prijsbeleid op wegen, en in diverse landen is dit inmiddels (veelal lokaal) ook ingevoerd, zoals in London en Singapore. Ook in Nederland staat prijsbeleid (zoals kilometerheffing) hoog op de agenda als instrument om verkeer te sturen naar een efficiënter gebruik van de wegen, en invoering hiervan lijkt onvermijdelijk.

#### LITERATUUR

- Braess, D. (1968) Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. *Unternehmensforschung* 12, pp. 258-268.
- Braess, D., A. Nagurney, and T. Wakolbinger (2005) On a Paradox of Traffic Planning. *Transportation Science* 39(4), pp. 446-450.
- Poundstone, W. (1992) *Prisoner's dilemma*. Doubleday, New York.
- Verhoef, E.T., G.P. van Wee, L. Steg, en M.C.J. Bliemer (eds) (2007) *Pricing in road transport: a multi-disciplinary perspective*. Edward Elgar, UK.
- Wardrop, J.G. (1982) Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II(1)*, pp. 325-362.

MICHEL BLIEMER, afgestudeerd in de Econometrie / Operations Research in Groningen in 1996, werkt als universitair hoofddocent Vervoermodelkunde aan de Technische Universiteit Delft. Hij houdt zich voornamelijk bezig met de ontwikkeling van dynamische verkeersmodellen voor planningsdoeleinden en heeft diverse onderzoeksbijdragen geleverd op het gebied van prijsbeleid. E-mail: <m.c.j.bliemer@tudelft.nl>



## Over stoeten, files en filles

FRED STEUTEL

'De eerste file van Nederland ontstond op eerste Pinksterdag, 27 mei 1955. Deze file was een echte bezienswaardigheid. Radio en televisie deden er uitgebreid verslag van.' Zo lees ik op het internet. Ik denk dat de laatste file nog enige tijd op zich zal laten wachten.

Met het woord 'file' is van alles mis. Het is natuurlijk niet echt een Nederlands woord, maar het wordt toch in Nederland, en alleen daar, gebruikt voor dit verkeersverschijnsel. De Engelsen zeggen *queue* of *traffic-jam*, de Duitsers *Stau* en de Fransen *embouteillage* of *bouchon*. Omdat sommigen dachten dat het een Frans woord was, en ten onrechte dachten dat het als 'fille' werd geschreven en als 'fieje' moest worden uitgesproken, deden zeer flauwe grappen de ronde over mannen die 'in een fille hadden gezeten'. Merkw aardigerwijs reageert Google op mijn zoekcombinatie 'auto, files, wiskunde' met 'bedoelt u misschien 'auto, **filles**, wiskunde'? Akkoord gaan levert 888 hits, waarbij maar in een heel enkele niet fille maar file wordt bedoeld. Een extra probleem met het woord 'file' op internet is dat de meeste hits te maken hebben met het Engelse woord voor computerbestand en niet met autoverkeer.

Ik kocht mijn eerste auto in 1963, toen files weliswaar bestonden, maar nog geen groot pro-

bleem vormden. Hij kostte ongeveer 6000 gulden, toen ongeveer mijn halve jaarsalaris. Ik werkte op het CWI (Mathematisch Centrum) in de Tweede Boerhaavestraat, en parkeren was geen probleem. Benzine kostte ongeveer 50 (gulden)cent, gecorrigeerd voor inflatie ongeveer even duur als nu. Volgens een Duitse website moest men in 1965 veertien minuten werken voor een liter benzine en nu vier minuten. We zijn rijker geworden. De auto's zijn nu ook ongeveer even duur als toen, maar wel veel beter, en we hebben meer geld. Vooral deze omstandigheid leidt tot meer auto's en meer files. Bangladesh is met bijna tien keer zoveel mensen meer dan twee keer zo dicht bevolkt als Nederland, maar bijna iedereen is er arm, en daarom zijn er minder auto's, minder wegen en minder files, al is het lokaal soms toch nog erger is dan bij ons.

Statistici en kansrekenaars hebben zich natuurlijk ook met files bemoeid, maar ze zijn vrij lastig te vinden. De eerste artikelen die ik onder het trefwoord *congestion* vind in de *Mathematical Reviews* en het *Zentralblatt für Mathematik* gaan over wacht- en verliesproblemen bij telefoonverkeer. Verder zijn er veel artikelen die natuurkundige modellen hanteren, zoals stroming in gassen en vloeistoffen. Bij *queues* gaat het meestal over

wachttijden bij loketten. Onder de eerste statistische artikelen over wegverkeer zijn die van twee zeer bekende auteurs, John Hammersley en Leo Breiman, beide uit 1962. Het Mathematisch Centrum (CWI) was iets eerder dan deze heren. In mijn boekenkast vind ik een artikel (Rapport S 272, april 1960 van de toenmalige Statistische Afdeling): 'De statisticus achter het stuur', geschreven door A.H. (Anne) Haitzma (net afgestudeerd) en J.Th. (Theo) Runnenburg (net gepromoveerd). Hier wordt het volgende model bekeken. Auto's vertrekken aan het begin van een weg volgens een Poissonproces. De auto's hebben onafhankelijke 'rijtijden' met dezelfde verdeling. Zo'n rijtijd is de tijd die een auto nodig zou hebben om ongestoord de hele weg af te rijden. Problemen ontstaan, omdat er niet ingehaald kan worden. Als een auto een langzamere heeft bereikt, blijft hij daarachter 'hangen'. Er wordt gevraagd naar de lengte van de 'stoet' (het woord file valt niet) bij aankomst van een 'voorste auto' aan het einde van de weg. Er wordt heel wat wiskunde overhoopgehaald, met name integraalrekening en genererende functies. Door het ontbreken van computers kon er maar weinig worden uitgerekend. In één speciaal geval kon expliciet de verwachting worden uitgerekend van de lengte van de 'stoet'. Als de gemiddelde rijtijd  $N$  keer zo groot is als het gemiddelde tijdinterval tussen twee vertrekkende auto's, dan is – voor grotere waarden van  $N$  - de verwachte stoetlengte (file) ook ongeveer  $N$ .

In de afgelopen 47 jaar is er heel wat rekenwerk over files bijgekomen en niet alleen op het CWI. Veel geholpen heeft het niet. Het is moeilijk om realistische modellen te maken, en bovendien houdt het verkeer zich slecht aan die modellen. Veel files ontstaan door ongelukken, met name ongelukken met vrachtwagens.

FRED STEUTEL is emeritus hoogleraar kansrekening aan de TU Eindhoven. Hij is redacteur van STATOR.  
E-mail: <f.w.steutel@tue.nl>

# AGENDA

## 2 - 14 november 2007

De jaarlijkse Bijeenkomst van Stochastici zal gehouden worden van 12 t/m 14 november 2007 in het Congrescentrum De Werelt te Lunteren. Eenieder die wenst deel te nemen aan de bijeenkomst – inclusief degenen die niet willen overnachten – wordt vriendelijk verzocht zich in te schrijven voor 1 oktober. Voor registratie en overige informatie zie <[www.cwi.nl/events/2007/lunteren/lunteren2007.html](http://www.cwi.nl/events/2007/lunteren/lunteren2007.html)>.

## 7 - 9 november 2007

The Stats group at Bristol organizes a workshop on inverse problems and estimation under constraints. Participation free. Contributed talks welcome. See <[www.sustain.bris.ac.uk/ws-curves.html](http://www.sustain.bris.ac.uk/ws-curves.html)>. Invited speakers: Raymond Carroll, Laurie Davies, Graham Dunn, Peter Hall, Oliver Linton, Yanyuan Ma, Ivan Mizera, Marc Raimondo, James Ramsay, Richard Samworth, Sylvain Sardy, Naisyin Wang, Joachim Weickert.

## 4 - 7 maart 2008

**GOCPs 2008** provides an international forum for presentation and discussion of new results in probability and statistics. Participants from universities, business, administration, and industry are welcome. Conference website <<http://gocps2008.rwth-aachen.de>>.

## 26 - 28 juni 2008

We would like to invite you to participate in the **Workshop on Nonparametric Inference – WNI2008**, which will be held in Coimbra, Portugal, on June 26-28, 2008. For more information please see the attached file and our website <[www.mat.uc.pt/~wni2008](http://www.mat.uc.pt/~wni2008)>.





# Coca-Cola Enterprises optimaliseert zijn productdistributie

GOOS KANT

Gedurende 2004 en 2005 heeft Coca-Cola Enterprises – 's werelds grootste bottelaar en distributeur van Coca-Cola producten – de ritplanningssoftware van ORTEC geïmplementeerd. De software bevat geavanceerde OR-algoritmie en wordt dagelijks door meer dan 300 planners gebruikt om meer dan 10.000 trucks te plannen. Naast het rekening houden met diverse speciale voorwaarden in het algoritme betreft de implementatie ook een stapsgewijze transitie vanuit het huidige bedrijfsvoogpunt. Het resultaat is een jaarlijkse kostenbesparing van 45 miljoen dollar en een aanzienlijke serviceverbetering. Het succes van deze aanpak is inmiddels verspreid naar andere Coca-Cola bottelaars en naar bierbrouwerijen. Met dit project was de combinatie Universiteit van Tilburg|ORTEC|Coca-Cola Enterprises finalist voor de Franz Edelman Award 2007 (zie het kader hiernaast).

Coca-Cola Enterprises (CCE) is 's werelds grootste producent en distributeur van de Coca-Cola Company. Jaarlijks distribueert CCE meer dan 2 miljard kratten frisdrank vanuit 64 fabrieken naar 430 DC's en van daaruit rechtstreeks naar de verkooppunten (*Direct Store Delivery*-concept). Dit bevat vele types van winkels, restaurants / cafe's en drinkautomaten. Naast Coca-Cola betreft dit ook producten zoals MinuteMaid, Powerade, Nestea, Sprite en soms de distributie voor andere bedrijven. CCE bedient het grootste gedeelte van USA en daarnaast Canada en zes Europese landen, in totaal ongeveer 400 miljoen inwoners. Het bedrijf heeft na de US Postal Service het grootste aantal vrachtwagens in Amerika. Dat aantal is de laatste twee jaar enorm toegenomen (van 13.000 voertuigen in 1986 naar 54.000 vandaag de dag). Mede hierdoor wil CCE de planning graag verder



standaardiseren en optimaliseren. Hierbij staan de volgende doelstellingen centraal:

1. Verzorgen van zeer hoge service naar hun klanten;
2. Optimaliseren van arbeidsuren en resources;
3. Reduceren van dieselverbruik en CO<sub>2</sub>-uitstoot;
4. Leveren van productieve en realistische werkdagen aan de medewerkers.

Klanten beschouwen het als een hoge service wanneer zij altijd beleverd worden door dezelfde chauffeur. Gegeven de fluctuaties in de vraag is dit onmogelijk, maar moet dit wel zoveel mogelijk gerespecteerd worden. Daarnaast verzorgt de chauffeur ook de opbouw in de winkel, dit betekent dus speciale laad-, los- en stoptijden. De dienst moet natuurlijk voldoen aan het rijtijdenbesluit en kunnen chauffeurs ook verschillende starttijden hebben. Een winkel vereist vaak speciale trucktypes. Er zijn 15 totaal verschillende types, zij verschillen in capaciteiten (van zeer groot tot klein), snelheden en aanwezige attributen (certificaten, technische uitrustingen, lift) die voor sommige adressen noodzakelijk zijn. Tot slot heb je te maken met allerlei vormen van files en speciale restricties en openingstijden voor de stadscentra.

## Algoritme

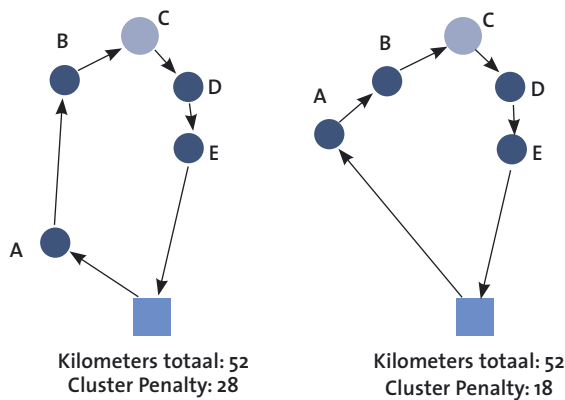
Integer lineair programmering technieken zijn niet zo succesvol gebleken bij dergelijke vraagstellingen, vandaar dat we de VRP-heuristieken nader onderzocht hebben. Als eerste bekeken we hoe het bekende Savings-algoritme omgevormd kon worden om rekening te houden met bovenstaande restricties. Hoewel dit goede resultaten gaf in zijn algemeenheid (zie [1]) waren we toch niet voldoende tevreden voor deze case. Dit komt omdat het Savings-algoritme in de basis sterk geografisch georiënteerd is, terwijl naarmate de

## Over de Franz Edelman Award

De Franz Edelman Award is de prestigieuze jaarlijkse prijs voor het best wereldwijd toegepaste OR-Project vanuit de wetenschap. Deze prijs wordt jaarlijks met een groot gala uitgereikt op de door INFORMS georganiseerde Conference on O.R. Practice in de USA of in Canada. Na Rijkswaterstaat (1984) en Philips/CQM (2004) heeft Nederland in 2007 met het in dit artikel beschreven project opnieuw de finale bereikt. Winnaar in 2007 was het Amerikaanse kankerinstituut Sloan-Kettering, samen met het onderzoeksinstituut GeorgiaTech. GeorgiaTech heeft een methode bedacht om zo nauwkeurig mogelijk (plaats, diepte en hoeveelheid radioactieve stof) naalden te plaatsen voor de behandeling van kanker. Meer informatie en dvd's van alle finalisten van de afgelopen jaren zijn te verkrijgen op <[www.scienceofbetter.org/Edelman/](http://www.scienceofbetter.org/Edelman/)>.

Jaarlijks organiseert INFORMS de Conference on O.R. Practice. Hier komen ongeveer 500 deelnemers, ongeveer gelijk verdeeld over bedrijfsleven en onderzoeksinstituten. Dit geeft aan dat de toepassing van Operations Research enorm leeft in Amerika. Er is een strenge selectie van de papers en de auteurs (ondermeer op presentatievaardigheden) wat de kwaliteit van de inhoud en de discussie zeer ten goede komt. Grote Amerikaanse bedrijven, zoals UPS, Boeing, Pepsico, Amazon presenteerden afgelopen voorjaar indrukwekkende resultaten. Belangrijke aandachtspunten behalve de software-tools en OR-technieken waren dit jaar ook de kwaliteit en beschikbaarheid van data, het denken in supply chains en de implementatie-aspecten om te komen tot daadwerkelijke besparingen.

Cluster Penalty:  $AC + BC + DC + EC$



Figuur 1: Clusteren met de cluster-penalty.

restricties toenemen dit steeds minder belangrijk is om te komen tot een goede oplossing.

Daarom hebben we het *Insert*-algoritme volgens het volgende concept toegepast:

- Stap 1** Selecteer de *moeilijkste* en ongeplande winkel.
- Stap 2** Wijs deze winkel toe aan het grootste voertuig dat toegelaten en ongepland is.
- Stap 3** Voeg andere winkels toe aan deze rit (op de beste plaats) totdat de rit vol is.
- Stap 4** Verplaats de rit (indien mogelijk) naar een kleiner en toegelaten voertuig.

Bij de moeilijkste winkel moet gedacht worden aan een combinatie van allerlei criteria, zoals afstand tot het DC, aantal toegelaten voertuigen voor deze opdracht en de grootte van het tijdvenster. Deze criteria spelen ook een belangrijke rol in Stap 3, waarbij daarnaast ook de afstand tot de moeilijkste winkel uit Stap 1 meegenomen wordt.

Vervolgens worden allerlei lokale verbeter-routines toegepast om de oplossing te verbeteren. Dit betreft de diverse Opt-routines (2-Opt, 3-Opt, Or-Opt), waarin daarbij ook het clusteren van de opdrachten centraal staat (zie Figuur 1). De 'cluster-

functie' is een penalty-functie met de afstand van alle stops in een rit tot aan de centrale opdracht in de rit. Hoe meer geclusterd de opdrachten in een rit, hoe minder kruisingen tussen de ritten, hoe esthetischer het geheel, hoe hoger de acceptatiegraad van de chauffeurs, maar mogelijk wel hogere kosten. Zie ook [1] voor allerlei esthetische *Key Performance Indicators* (KPI) voor het evalueren van plannings. De planners kunnen zelf met de cluster-functie scenario's maken en de kosten van een planning afwegen tegen de acceptatiegraad van de chauffeurs. Initieel starten de planners met een hoge cluster-factor, maar naarmate de chauffeurs meer gewend zijn aan de werkwijze wordt deze functie steeds meer losgelaten.

De laatste stap in het algoritme is het toewijzen van de ritten aan de chauffeurs. Elke chauffeur heeft een eigen centrum van zijn verzorgingsgebied, een 'ankerpunt' genaamd. Om elke rit aan de beste chauffeur toe te wijzen wordt voor elke rit en toegelaten mogelijke chauffeur de afstand van elke stop uit die rit tot aan het 'ankerpunt' van deze chauffeur berekend. De som van deze afstanden zijn de toewijzingskosten van de rit en de chauffeur. Vervolgens wordt met een toewijzingsmodel elke chauffeur aan een rit toegewezen, waarbij dus elke chauffeur zoveel mogelijk winkels in de buurt van zijn verzorgingsgebied belevt.

## Implementatie

De volgende stap is om dit te implementeren in de organisatie. In feite betekent dit een volledige verandering van de dagelijkse beleving van Coca-Cola richting de 400 miljoen consumenten. Hiervoor werd de implementatie aangepakt per divisie (dit is ongeveer een of meerdere staten in de USA). De implementatie bestaat uit een strak programma van drie onderdelen van in totaal 17 weken: (1) de data-preparatie, (2) de on-site imple-

mentatie, en (3) de zelf-implementatie (op eigen benen de planning maken). Vooral de eerste fase, het verkrijgen van correcte data, is heel essentieel. Een belangrijke training is dan ook het checken op compleetheid en correctheid van data. Een vervolgstap is het trainen met de applicatie en het inzien van de effecten van alle parameters en het valideren van het plan, zowel geografisch in de kaart als in de lijsten en in een planbord. De complete roll-out in de 25 divisies (een divisie heeft 10 – 15 gebruikers) werd gerealiseerd in 1,5 jaar door een centraal team, waarin telkens drie divisies parallel werden geïmplementeerd.

Voor de besparingen werden de verschillen gemeten in transportkosten versus geleverd volume in een jaar. In figuur 2 zijn de voorbeelden voor 2 depots uitgewerkt, waarbij er niet gecompenseerd is voor prijsstijging in 2005 (dieselprijs en inflatie). Conservatief gemeten over de diverse divisies is de besparing ongeveer \$ 0,03 per krat. Gegeven ongeveer 1,5 miljard kratten, die jaarlijks hiermee gepland worden is dit een besparing van 45 miljoen dollar per jaar. Daarnaast een grote service-verbetering (minder retouren, grotere voorspelbaarheid van leveringen, beter omgaan met striktere tijdafspraken) en tot slot ook milieubesparingen: minder uitstoot van schadelijke stoffen en minder stress bij chauffeurs en winkelpersoneel.

Dit concept wordt inmiddels uitgerold bij andere Coca-Cola distributeurs en bij bierbrouwers, zoals Heineken, Carlsberg en InBev. In lang niet alle gevallen is hierbij het DC vooraf bekend van waaruit een winkel beleverd moet worden of zijn ook de leverdagen nog onbekend. In dit laatste geval is er sprake van een PVRP-probleem: het bepalen van de mogelijke leverdagen door de week, zodanig dat voldaan wordt aan de behoefte van de klant, er een zo goed mogelijke geografische clustering van de opdrachten is en er een zo goed mogelijke balans is tussen de verschillende leverdagen. Dit probleem wordt opgelost met een

Vershil 2005 t.o.v. 2004	Depot A (1 van de 10 grootste)	Depot B (Gemiddeld depot)
Toename volume	18%	1%
Toename personeelskosten	1%	15%
<b>VERBETERINGEN</b>		
distributie kosten per krat	15%	16%
niet-beleverde winkels	62%	26%
retouren	18%	27%

Figuur 2: Voorbeelden van besparingen bij twee depots.

Capacitated Clustering Problem (CCP) middels een LP-formulering met een afrondingsheuristiek (zie [2]). Deze methode geeft vooral een veel betere spreiding en balans ten opzichte van de huidige praktijk. In dit concept worden mogelijke lever-schema's voor elke klant gegenereerd. Elk lever-schema betekent dat er op bepaalde dagen een klant beleverd wordt, elke leverdag kent hierbij een eigen hoeveelheid. Vervolgens wordt in de LP-formulering aan elke klant een leverschema toegekend zodanig dat elke dag ongeveer evenveel volume en/of werktijd, bezoektijd, etc., wordt toegekend, met anderzijds een minimalisatie van de cluster- en distributiekosten.

#### LITERATUUR

1. Poot, A., G. Kant and A.P.M. Wagelmans, A savings based method for real-life vehicle routing problems, *Journal of the Operations Research Society* (2002), 53, pp. 57 – 68.
2. Hoendervoogt, A., *Period Scheduler: an algorithm for strategic planning*, Master Thesis, Tilburg University – dept. of Econometrics & Operations Research, nov. 2006.

GOOS KANT is directeur bij ORTEC en hoogleraar Operations Management & IT bij de Universiteit van Tilburg. Daarnaast is hij hoofdredacteur van STATOR. E-mail: <GKant@ortec.nl>.



Foto: ipv Delft

## OPERATIONS RESEARCH IN HET OPENBAAR VERVOER

Volgens *NRC Handelsblad* is de dienstregeling van de Nederlandse Spoorwegen de enige vorm van hogere wiskunde waar door iedereen in Nederland over gediscussieerd wordt. Maar behalve bij het ontwerpen van dienstregelingen spelen modellen uit de wiskunde en de Operations Research (OR) ook een belangrijke rol bij tal van andere aspecten in het Openbaar Vervoer (OV). Dit artikel geeft een beknopt overzicht.

### LEO KROON

Reisplanners waren de eerste aansprekende toepassingen van OR modellen in het OV. De luchtvaart heeft bij de verdere toepassing van OR modellen steeds voorop gelopen, onder andere door de moordende concurrentie aldaar. Maar inmiddels probeert men dergelijke modellen ook in andere OV modaliteiten (trein, metro, tram, bus, etc.) toe te passen, om daarmee zowel de

service voor de reizigers als de efficiency van het systeem te verhogen.

Typische toepassingen van OR in het OV liggen op het gebied van de operationele planning. Dat wil zeggen, het maken van de dienstregeling en de inzet van materieel en personeel. De verwachte vervoersomvang en de capaciteiten van de resources infrastructuur, materieel en personeel worden

daarbij als gegeven beschouwd. Deze operationele planningsproblemen zijn complexe problemen met een hoog combinatorisch karakter, waar met geschikte modellen, geavanceerde oplostechnieken, krachtige hardware, en voldoende rekentijd vaak bruikbare resultaten bereikt kunnen worden.

Dit overzicht beperkt zich tot deze onderwerpen. Andere onderwerpen blijven daardoor achterwege. Aan de ene kant van het logistieke spectrum is dat de strategische planning, waarbij een prognose van de vervoersomvang gemaakt wordt en ernaar gestreefd wordt de capaciteiten van infrastructuur, materieel en personeel daar in de tijd zo goed mogelijk bij te laten aansluiten. Aan de andere kant staat de real-time bijsturing. Op dit gebied staat de toepassing van OR nog in de kinderschoenen. Een en ander is schematisch weergegeven in Figuur 1.

	Strategisch	Operationeel	Real-time
Infrastructuur	capaciteitsplanning	toewijzing onderhoud	bijsturing bij incidenten
Dienstregeling	lijnvoering dienstregeling		
Materieel	capaciteitsplanning	omloop onderhoud	
Personeel	capaciteitsplanning	diensten roosters	

Figuur 1: Relevante problemen in het Openbaar Vervoer.

## Dienstregeling

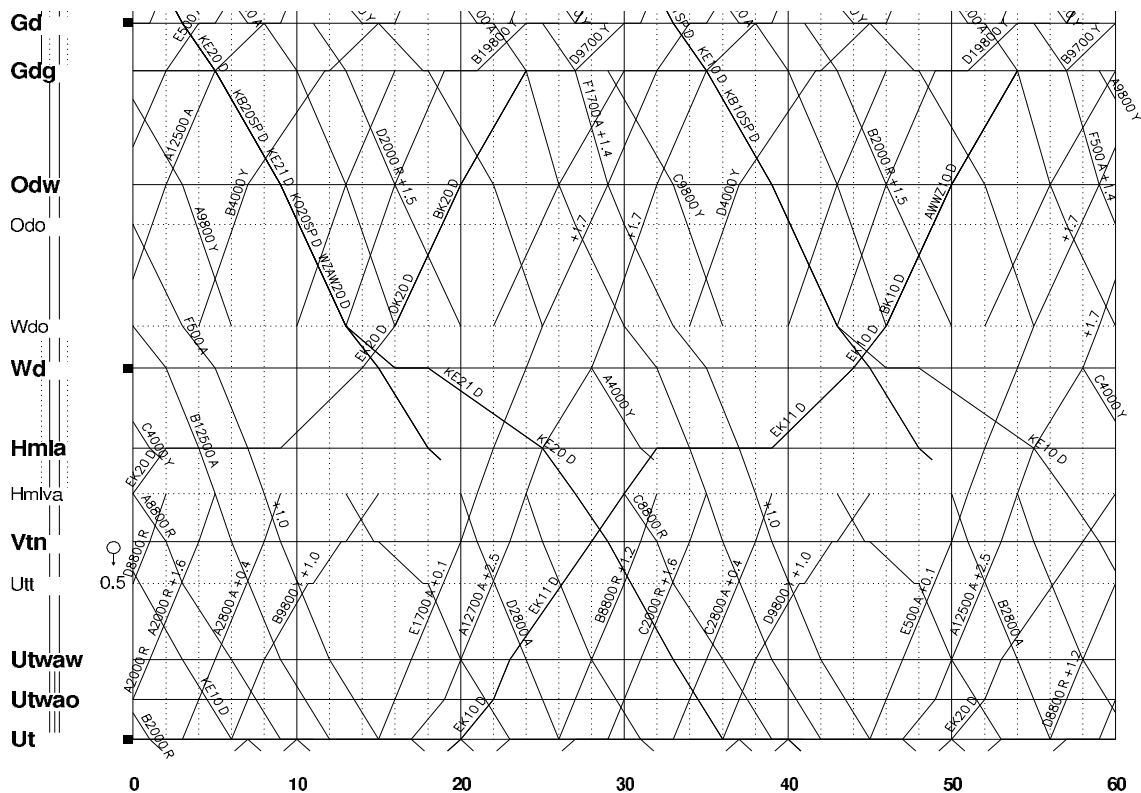
De dienstregeling bestaat uit twee componenten, namelijk een lijnvoering en een tijdligging. De lijnen beschrijven de rechtstreekse verbindingen in het systeem. Iedere lijn heeft een beginpunt, een eindpunt en een frequentie. Daarnaast kan

een lijn ook een type hebben, bijvoorbeeld een lijn kan door intercity's of door stoptreinen gereden worden. De lijnvoering bepaalt een groot deel van de service die door het OV systeem geboden wordt, bijvoorbeeld het aantal rechtstreekse reismogelijkheden. Daardoor heeft de lijnvoering een grote invloed op de totale vervoersomvang. De lijnvoering bepaalt ook al een groot deel van de kosten van het systeem. Voor het ontwerpen van lijnvoeringen zijn wel optimalisatiemodellen ontwikkeld, maar in de praktijk wordt meer gebruik gemaakt van evaluatiemodellen, waarmee verschillende varianten van de lijnvoering aan what-if analyses onderworpen kunnen worden.

De dienstregeling beschrijft de vertrek- en aankomsttijden van de ritten. Dienstregelingen in het OV zijn vaak cyclisch. Dat wil zeggen dat de dienstregeling na iedere cyclus herhaald wordt. Dat heeft onder andere als gevolg dat van iedere halte met een vaste frequentie naar de verschillende bestemmingen gereisd kan worden. Door middel van de vertrek- en aankomsttijden kan ook voor goede overstapmogelijkheden gezorgd worden.

Voorals de capaciteit van de infrastructuur een bottle-neck vormt en er ritten voorkomen met sterk verschillende karakteristieken, zoals de al eerder genoemde intercity's en stoptreinen, is het ontwerpen van een dienstregeling een complexe zaak. Voor het oplossen van dergelijke problemen kan gebruik gemaakt worden van het PESP-model (Periodic Event Scheduling Problem, Serafini en Ukovich, 1989). Het DONS systeem dat door NS en ProRail gebruikt wordt voor het maken van een opzet van de dienstregeling op het spoor is op dit model gebaseerd (Schrijver en Steenbeek, 1993). Het model wordt opgelost met behulp van Constraint Propagatie technieken. Daarnaast is ook de routing van de treinen door de stations van belang. In de luchtvaart is dit probleem vergelijkbaar met het toewijzen van vliegtuigen aan gates op een luchthaven. Voor het evalueren van





Figuur 2: Tijd-weg diagram voor het baanvak Gouda – Utrecht (Gd – Ut). De diagonale lijnen geven treinbewegingen weer als relaties tussen tijd (horizontaal) en plaats (verticaal). Merk op dat het diagram in principe eindeloos in de tijd herhaald kan worden (d.w.z. in horizontale richting).

dienstregelingen op hun robuustheid wordt vaak gebruik gemaakt van meer of minder gedetailleerde simulatiemodellen.

## Materieelinzet

Als de dienstregeling is vastgesteld, moet iedere rit van materieel voorzien worden. Bij de meeste OV modaliteiten gaat het om één voertuig per rit (bus, tram, vliegtuig), maar op het spoor kunnen meerdere treinstellen aan elkaar gekoppeld worden. De basis van de modellen die gebruikt kunnen worden voor de planning van de materieelinzet wordt meestal gevormd door een multi-commodity flow model. Ieder type materieel wordt daarbij gerepresenteerd door een type flow. In het netwerk komen de dimensies tijd en plaats voor. Een belangrijke regel is dat een voertuig pas van een bepaalde plaats kan vertrekken als het daar

eerder is aangekomen, ofwel de flow balans van het materieel dient te kloppen. Zitplaatskans en efficiency zijn belangrijke doelstellingen.

Bij de praktische toepassing van deze modellen dient met tal van complicerende factoren rekening gehouden te worden. Zo staan meestal alleen de ritten voor het reizigersvervoer in de dienstregeling vast. Maar om de materieelbalansen te herstellen kan het noodzakelijk zijn om zogenaamde leeg-materieel ritten te plannen. Het zo gunstig mogelijk kiezen van deze ritten is een lastig probleem. Ook het opstellen van materieel dat tijdelijk niet gebruikt wordt, bijvoorbeeld 's nachts of buiten de spits, kan tot lastige combinatorische vraagstukken leiden.

Daarnaast speelt ook het onderhoud van het materieel een belangrijke rol. Ieder voertuig dient met een zekere regelmaat onderhouden te worden. Wanneer dit onderhoud al in detail in de materieelomloop ingepland moet worden, dan is



ook dat een sterk complicerende factor. Een alternatief is om in de materieelomloop alleen voldoende ruimte voor onderhoud in te bouwen. In dat geval kan een voertuig dat onderhoud nodig heeft dan in de real-time uitvoering naar een onderhoudswerkplaats gedirigeerd worden.

Op het spoor is het al eerder genoemde punt dat een trein uit meerdere treinstellen kan bestaan een sterk complicerende factor. Daarmee kan de capaciteit van een trein tot op zekere hoogte aan de vervoersvraag worden aangepast. Maar wanneer een trein uit twee treinstellen van verschillende types bestaat, dan is de volgorde van die treinstellen in de trein relevant in verband met de rangeermogelijkheden in de stations. Dit aspect is geen onderdeel van standaard multi-commodity flow modellen, maar kan met behulp van zogenaamde transitiegrafen daaraan worden toegevoegd (Fiolle et al, 2006). Een transitiegraaf beschrijft per station welke overgangen in de samenstellingen van de treinen kunnen plaatsvinden.

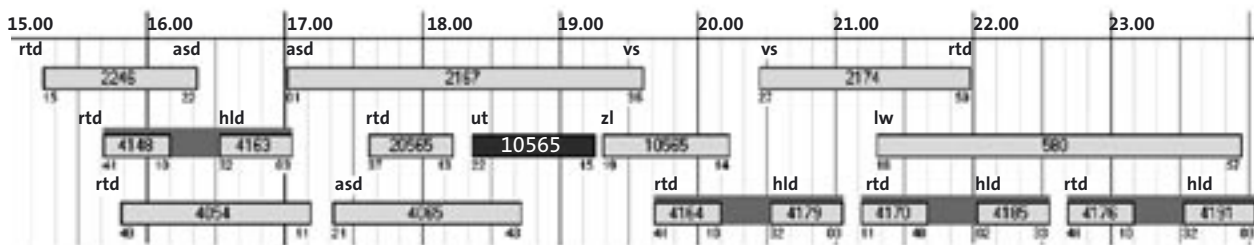
## Personeel

De inzet van het personeel wordt meestal in twee stappen gepland, namelijk eerst de diensten en dan de roosters. Een dienst is een reeks opeenvolgende taken die door één medewerker moet worden uitgevoerd. In veel gevallen beslaat iedere

dienst één dag. Een dienst eindigt op dezelfde plaats als waar hij begonnen is. Daarna wordt iedere dienst in een rooster geplaatst. Daarin wordt aangegeven welke diensten op achtereenvolgende dagen moeten worden uitgevoerd. Roosters kunnen cyclisch zijn, maar het individuele roosteren wordt de laatste tijd steeds populairder. Bij individuele roosters kan met de wensen van individuele medewerkers rekening gehouden worden.

Het standaardmodel voor het plannen van de diensten is het Set Covering model. Dit model heeft als voordeel dat het op relatief eenvoudige wijze rekening kan houden met lastige randvoorwaarden op het niveau van de diensten. Bijvoorbeeld, iedere dienst mag maximaal 9 uur duren, en binnen 5,5 uur na het begin dient een lunchpauze ingepland te worden.

Het Set Covering model veronderstelt dat a priori een lijst van potentiële diensten is opgesteld. Het model kiest daaruit dan een zodanige deelverzameling dat iedere uit te voeren rit door ten minste één dienst wordt afgedekt, dat aan de randvoorwaarden op het niveau van de standplaatsen voldaan is, en dat het geheel zo efficiënt mogelijk is. Een voorbeeld van een randvoorwaarde op standplaats-niveau is de eis dat in iedere standplaats de gemiddelde dienstlengte niet groter mag zijn dan 8 uur (Abbink et al, 2005). Voor het oplossen van praktische instanties van het Set Covering model wordt meestal gebruik gemaakt



Figuur 3: Drie diensten voor machinisten uit de standplaats Rotterdam (Rtd). De tijd staat in horizontale richting weergegeven. De rechthoeken representeren de taken in de diensten. Iedere taak heeft een begin- en eindtijd en een begin- en eindlocatie.

van dynamische kolomgeneratie, omdat het aantal potentiële diensten te groot is om ze allemaal a priori te kunnen genereren.

Individueel roosteren is wiskundig gezien enigszins vergelijkbaar met het plannen van de diensten. Immers, hier moet aan iedere medewerker een reeks diensten toegewezen worden, waarbij met tal van lastige randvoorwaarden rekening gehouden moet worden. Daarbij moeten uiteindelijk alle diensten toegewezen worden, en dient het eindresultaat zo efficiënt mogelijk te zijn. Cyclisch roosteren is anders, want daar wordt per roostergroep van medewerkers slechts één rooster opgesteld.

## Verdere ontwikkelingen

Inmiddels wordt een aantal van de bovengenoemde OR modellen al bij verschillende OV bedrijven succesvol toegepast. Daardoor lijkt de vraag naar verdere ontwikkeling van de bestaande modellen alleen maar toe te nemen.

Een nieuwe ontwikkeling is onder andere de toepassing van OR modellen ten behoeve van de real-time bijsturing. Het gaat hier om het re-actief omgaan met verstoringen en incidenten als deze zich eenmaal in de uitvoering hebben voorgedaan. Rekening is daarbij cruciaal: modellen en technieken die uren rekening nodig hebben zijn in de real-time bijsturing onbruikbaar. Er zullen heuristische ontwikkeld moeten worden die in korte tijd bruikbare oplossingen kunnen genereren. Een belangrijk punt hierbij is dat er tegenwoordig steeds meer real-time informatie beschikbaar is over de posities van reizigers, materieel en personeel. Het is een grote uitdaging voor de OR om hier zo goed mogelijk gebruik van te maken.

Daarnaast speelt ook de robuustheid van de plannen een steeds grotere rol. Robuustheid is het pro-actief omgaan met verstoringen. Ofwel, hoe kan je er in de planning al voor zorgen dat

het systeem in de uitvoering zo weinig mogelijk gevoelig is voor verstoringen. Een voorbeeld is het zo effectief mogelijk verdelen van spelingen en buffertijden in de dienstregeling door middel van een Stochastisch Optimalisatie model (Vromans, 2005).

Tenslotte is ook het integreren van de modellen een relevant onderwerp voor verder onderzoek. Zo lijken bijvoorbeeld in het interregionale busvervoer aanzienlijke efficiency voordelen behaald te kunnen worden door de materieel- en de personeelinzet tegelijkertijd te plannen (Huisman, 2004). Deze voordelen komen voort uit het feit dat bij een sequentiële benadering de personeelinzet op het verkeerde been gezet kan zijn door de eerder geplande materieelinzet. Maar het integreren van de modellen leidt uiteraard ook tot modellen met een hogere complexiteit. Ook hier ligt nog een mooie uitdaging voor de OR.

### LITERATUUR

- Abbink, E.J.W., Fischetti, M., Kroon, L.G., Timmer, G., en Vromans, M.J.C.M. (2005). Reinventing Crew Scheduling at Netherlands Railways. *Interfaces*, 35(5):393–401.
- Fioole, P.J., Kroon, L.G., Maróti, G., en Schrijver, A. (2006). A Rolling Stock Circulation Model for Combining and Splitting of Passenger Trains. *European Journal of Operational Research*, 174(2):1281–1297, 2006.
- Huisman, D. (2004). *Integrated and Dynamic Vehicle and Crew Scheduling*. Ph.D. thesis, Erasmus Universiteit Rotterdam.
- Schrijver, A. en Steenbeek A. (1994). *Dienstregeling ontwikkeling voor Railned*. Technisch rapport CWI, Amsterdam. <<http://homepages.cwi.nl/~lex/files/rapp1a.pdf>>.
- Serafini, P. en Ukovich, W. (1989). A Mathematical Model for Periodic Event Scheduling Problems. *SIAM Journal of Discrete Mathematics*, 2:550–581.
- Vromans, M.J.C.M. (2005). *Reliability of Railway Systems*. Ph.D. thesis, Erasmus Universiteit Rotterdam, Rotterdam School of Management.

LEO KROON werkt parttime als logistiek adviseur bij de afdeling Logistiek van NS. Daarnaast is hij parttime hoogleraar kwantitatieve logistiek aan de Rotterdam School of Management van de Erasmus Universiteit. E-mail: <[lkroon@rsm.nl](mailto:lkroon@rsm.nl)>.



# NIEUWE DIENSTREGELING VAN NS

DENNIS HUISMAN EN COR VAN 'T WOUDT

Op 10 december 2006 ging de nieuwe dienstregeling van NS in. Dit was de eerste compleet nieuwe dienstregeling sinds 1970. Dat wil zeggen dat de dienstregeling niet incrementeel is aangepast aan die van het jaar daarvoor, maar dat die helemaal vanaf nul is opgebouwd.

In dit artikel geven we eerst een antwoord op de vraag waarom er een nieuwe dienstregeling moest komen. Vervolgens gaan we in op de vraag hoe de dienstregeling tot stand is gekomen en de rol van de besliskunde daarin.

## Waarom?

Sinds 1970 is het vervoer op het Nederlandse spoorweginet continu gestegen. Dit geldt voor zowel het reizigersvervoer (15,4 miljard reizigers-

kilometers in 2006 ten opzichte van 8,0 miljard reizigerskilometers in 1970) als het goederenvervoer (een stijging van 285 % gemeten in tonkilometers). Als gevolg daarvan zijn er meer en langere treinen gaan rijden. Omdat de infrastructuur slechts sporadisch is uitgebreid, is het Nederlandse spoorweginet één van de drukst bereiden netten ter wereld. Tussen 1970 en 2006 zijn deze extra treinen steeds tussen de al bestaande treinen ingelegd. Ook zijn er 64 nieuwe stations bijgekomen. Het gevolg daarvan was dat de marges in het systeem soms te klein werden, waardoor er automatisch vertragingen ontstaan. Aan de andere kant zijn uitgangspunten uit 1970 inmiddels achterhaald. Een mooi voorbeeld hiervan is dat door de reizigersgroei de werkelijke halteertijd (tijd waarin passagiers kunnen in- en uitstappen) op sommige haltes groter was dan

de geplande tijd. Eén van de uitgangspunten bij het ontwerpen van de nieuwe dienstregeling was dan ook om deze tijd te vergroten van 30 naar 36 seconden.

De enige oplossing om met de veel hogere vraag om te gaan, was dus uiteindelijk een nieuwe dienstregeling maken. Om de beperkte infrastructuur optimaal te benutten is gekozen voor een meer gehomogeniseerde dienstregeling met minder rijtijdverschillen tussen de verschillende treinen. Tegelijkertijd konden hiermee nieuwe wensen worden gerealiseerd. Een voorbeeld hiervan is de introductie van treinformules, waarbij er op het hoofdrailnet alleen nog plaats is voor Intercity's en sprinters. Hierdoor was het mogelijk om een simpel product neer te zetten met op de belangrijkste verbindingen ieder kwartier een Intercity en ieder kwartier een sprinter.

Overigens is er gekozen om de nieuwe dienstregeling in te laten gaan op 10 december 2006, omdat oorspronkelijk verschillende grote infrastructuurprojecten (HSL Zuid, Betuweroute en spoorverdubbeling Amsterdam Bijlmer – Utrecht) zouden worden geopend op deze datum. Achteraf bleken deze projecten allemaal later (of nog steeds niet) te zijn geopend, waardoor er uiteindelijk twee nieuwe dienstregelingen zijn ontworpen. Eén voor de eindsituatie in 2009 met behulp van besliskundige modellen en een handmatige afgeleide daarvan die is ingegaan op 10 december 2006. Als we in de rest van dit artikel over de nieuwe dienstregeling spreken, hebben we het dus feitelijk over de dienstregeling voor de eindsituatie in 2009.

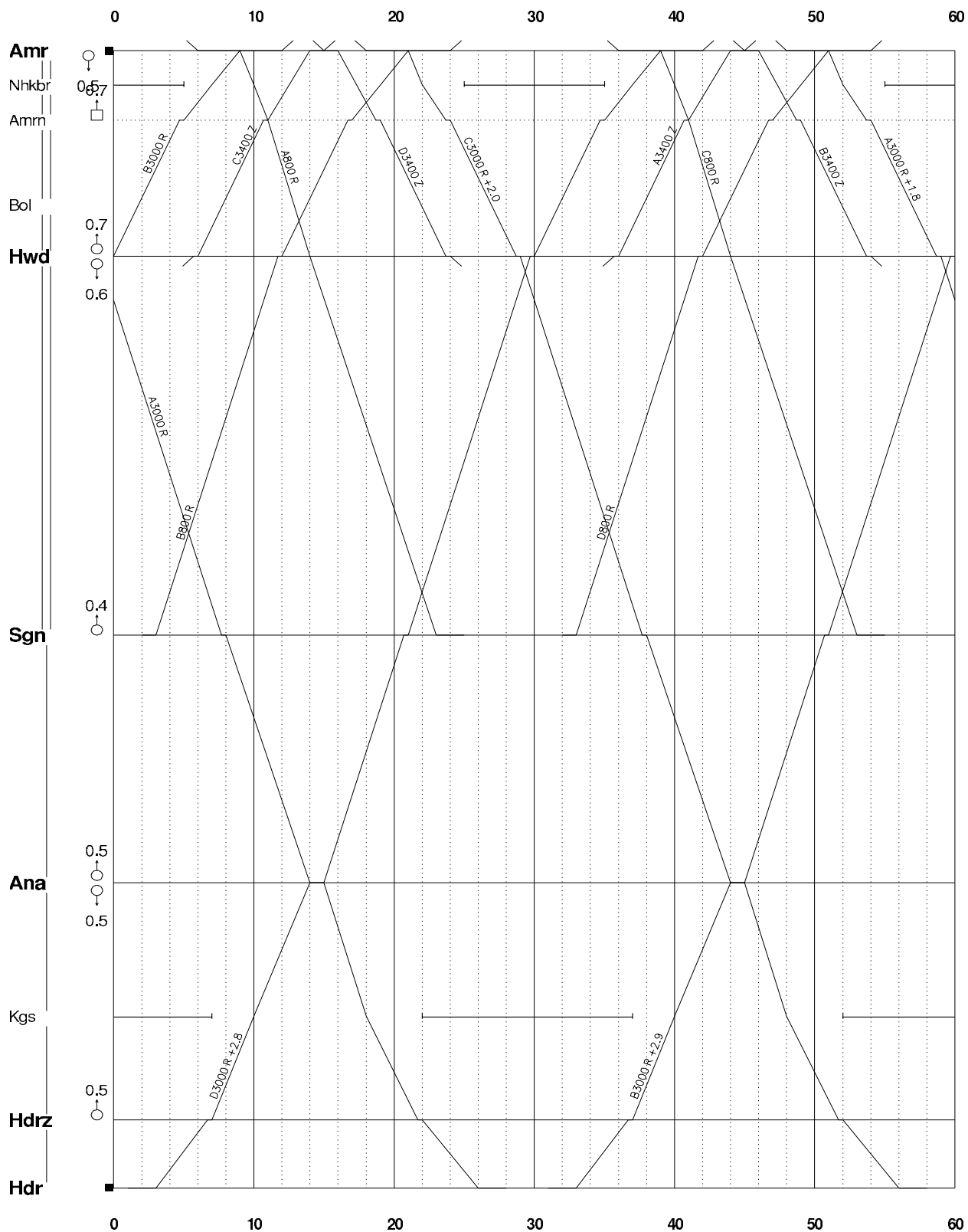
## Hoe?

Het tot stand komen van een nieuwe dienstregeling en de daarvan afgeleide logistieke plannen ten aanzien van de inzet van materieel en personeel is een complexe puzzel. Daarom wordt het proces

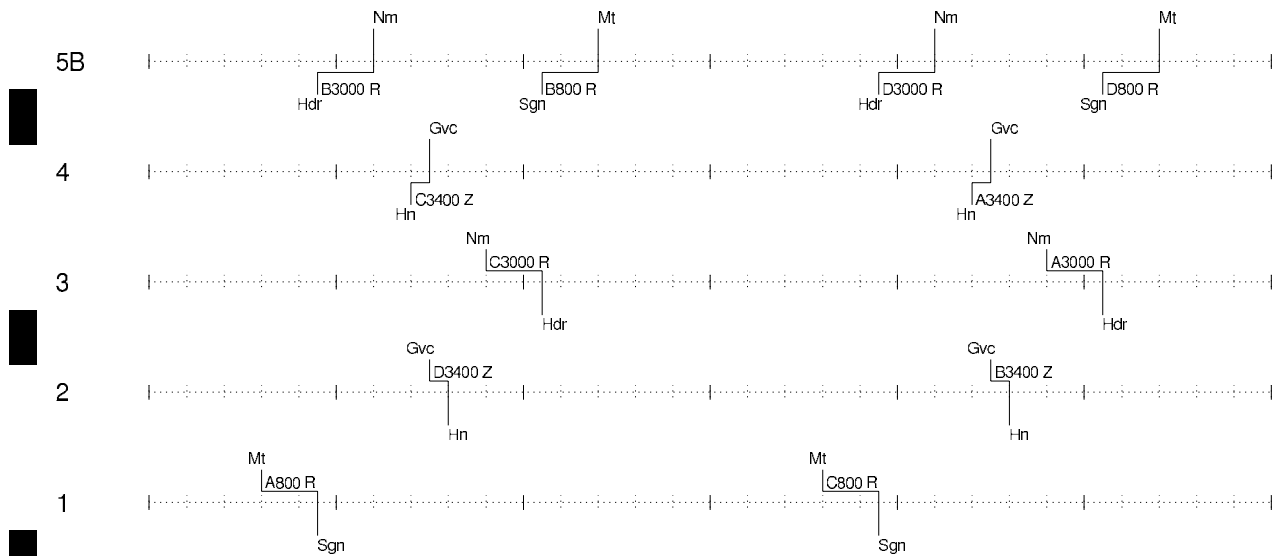
in meerdere stappen opgesplitst. We beschrijven hier in het kort de verschillende stappen, voor een uitgebreidere uiteenzetting verwijzen we naar Huisman et al (2005). Allereerst wordt er een bedieningsmodel gemaakt bestaande uit een lijnvoering, waarbij voor iedere lijn z'n begin- en eindstation wordt bepaald plus alle tussengelegen stations waar onderweg zal worden gestopt, en de bijbehorende frequenties en de gewenste aansluitingen. Vervolgens wordt er een dienstregeling gemaakt voor dit bedieningsmodel. In Nederland kennen we een cyclische dienstregeling, waarbij ieder uur van de dag hetzelfde is. Daarom wordt er in eerste instantie een plan voor een uur gemaakt dat vervolgens wordt gebruikt om er een plan voor een hele dag en vervolgens een hele week van te maken. Ten slotte wordt het materieel en het personeel gepland zodat iedere trein voorzien is van materieel en een machinist en conducteur.

Nadat het bedieningsmodel eenmaal is vastgesteld, begint de meest complexe puzzel: het maken van een basisuurpatroon (BUP) en basisspooropstelling (BSO). In het BUP wordt voor iedere trein z'n precieze ligging in het uur bepaald. Een voorbeeld voor het traject Alkmaar – Den Helder is te zien in figuur 1. Daarvan afgeleid, is de BSO, waarin voor ieder station wordt bepaald welke trein op welk spoor rijdt. Dit plan wordt zo gemaakt dat alle treinen conflictvrij door het knooppunt kunnen rijden. Een voorbeeld van station Alkmaar is te zien in Figuur 2.

Het maken van een BUP en BSO is een complex vraagstuk. Hierbij komt de besliskunde goed van pas. De meeste besliskundige modellen voor het maken van een BUP zijn gebaseerd op het *Periodic Event Scheduling Problem* (PESP). In het PESP model worden cyclisch een aantal gebeurtenissen (*events*) gepland (in dit geval dus eens per uur). Laat  $e$  een gebeurtenis zijn die plaatsvindt op tijdstip  $v$  (in minuten) en dus ook op  $\{..., v - 120, v - 60, v, v + 60, v + 120, ...\}$ . In het BUP zijn deze gebeurtenissen de start- en eindtijden van bepaalde



Figuur 1: Basisuurpatroon Alkmaar (Amr) – Den Helder (Hdr) voor een ochtendspitsuur. Merk op dat het traject Den Helder - Schagen (Sgn) enkelspoor is. Hierdoor moeten twee treinen uit verschillende richtingen elkaar passeren bij een station. De horizontale lijnen in de figuur zijn brugopeningen.



Figuur 2: Basisspooropstelling Alkmaar voor een ochtendspitsuur.

processen (aangeduid met de verzameling  $P$ ). Een voorbeeld van zo'n proces is het rijden van een trein van A naar B. De technisch minimale rijtijd van A naar B geeft dan het minimale verschil aan in tijd tussen de aankomst in B en het vertrek in A. Meer formeel kunnen we de relatie tussen twee gebeurtenissen als volgt beschrijven:

$$(V_{e'} - V_e) \bmod T \in [L_{e, e'}, U_{e, e'}] \quad \forall (e, e') \in P$$

waarbij  $V_e$  en  $V_{e'}$  de tijden zijn waarop respectievelijk gebeurtenis  $e$  en  $e'$  plaatsvinden, en  $L_{e, e'}$  en  $U_{e, e'}$  een ondergrens en bovengrens is op de procestijd van het proces  $(e, e')$ . Door het introduceren van een binaire variabele  $Q_{e, e'}$  kunnen we dit als volgt lineariseren:

$$L_{e, e'} \leq (V_{e'} - V_e) + T \cdot Q_{e, e'} \leq U_{e, e'} \quad \forall (e, e') \in P$$

Met dit soort restricties kunnen alle verbanden tussen verschillende gebeurtenissen worden gemodelleerd. Men kan daarbij denken aan opvolgtijden bij kruisingen, rijtijden tussen twee stations, overstappen, enzovoort. Merk hierbij op

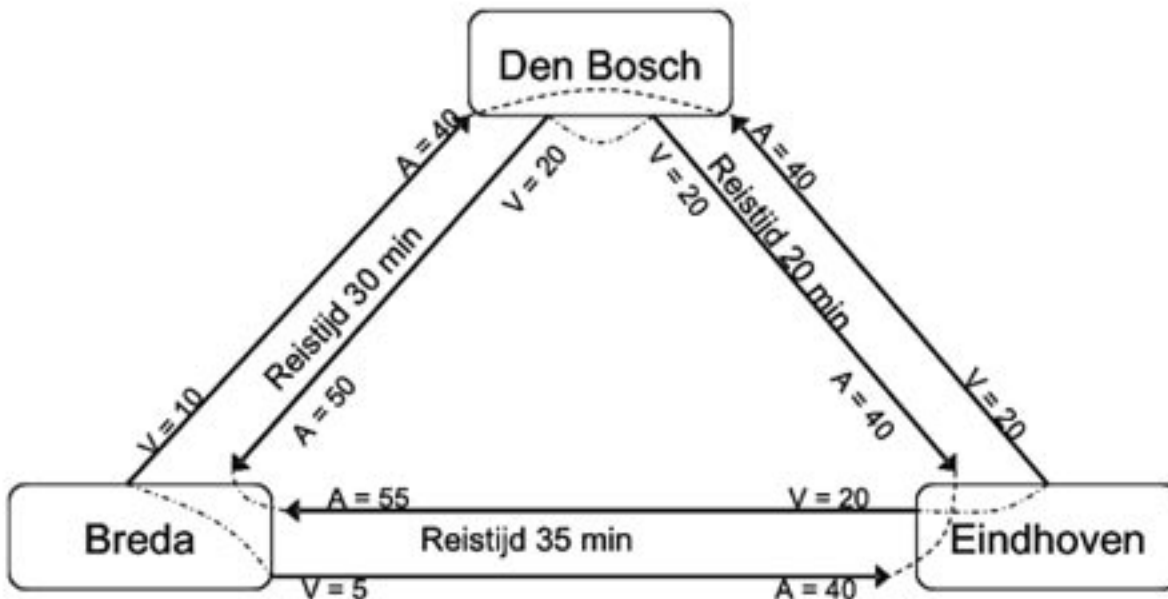
dat sommige restricties harde eisen zijn, terwijl anderen slechts wensen zijn (bijvoorbeeld goede overstaprelaties en korte rijtijden).

Door de zwakke LP relaxatie is het PESP model niet geschikt om op te lossen met behulp van een standaard MIP solver. Daarom kozen Schrijver en Steenbeek (1994) voor een *constraint propagation* algoritme. Dit algoritme, genaamd CADANS, is geïmplementeerd in het DONS systeem dat door NS en Prorail gebruikt wordt voor het maken van een BUP. Een andere module in DONS, STATIONS, is geschikt voor het maken van een BSO (zie Zwaneveld et al 1996).

Voor het maken van een BUP voor heel Nederland is het totaal aantal eisen en wensen enorm en is het zeer onwaarschijnlijk dat er een toegelaten oplossing is van het stelsel ongelijkheden. Er zijn dan ook drie mogelijke uitkomsten van een DONS berekening:

1. Er is een oplossing en deze wordt gegeven;
2. Er is geen mogelijke oplossing en de conflicterende keten van gebeurtenissen wordt gegeven;
3. Het systeem geeft binnen redelijke tijd geen uitsluitsel.





Figuur 3: Uitgangspunt is vaste aankomt en vertrektijd in Breda uit de richting Eindhoven om aan te sluiten op de hogesnelheidstrein. Daarnaast zouden alle treinen onderling moeten aansluiten om overstappen te kunnen bieden, bijvoorbeeld vanuit Den Bosch naar Utrecht en Nijmegen. In dit cijfervoorbeeld blijkt beginnend vanuit Breda naar Eindhoven dat uiteindelijk de treinen uit Den Bosch in Breda geen aansluiting meer bieden.

Helaas komt de tweede mogelijkheid het meest voor. Vaak is de reden duidelijk, bijvoorbeeld als het bedieningsmodel vraagt om een kwartiersdienst van een intercity waar geen gewenste stoptreinen meer tussen passen. Dit probleem speelt regelmatig op lange trajecten met veel stations en beperkte inhaalmogelijkheden, zoals Amersfoort-Zwolle. In zulke gevallen zal de invoer aangepast moeten worden. Deze aanpassingen kunnen gedaan worden in de infrastructuur\*, het materieel, maar meestal in de rijtijden (bijvoorbeeld het 'vertragen' van een intercity om homogenere rijtijden te krijgen) of het bedieningsmodel. Soms is het echter niet duidelijk waar precies het probleempunt zit, vooral als een lange keten van gebeurtenissen en afhankelijkheden wordt gegeven. Een eenvoudig voorbeeld hiervan is uitgewerkt in Figuur 3.

Het sterke punt van DONS, rekening houden

met al deze samenhangende gebeurtenissen, eisen en wensen, wordt een zwak punt als de gebruiker de melding krijgt dat een lange keten van gebeurtenissen onderling conflicterend is. De gebruiker zal sommige wensen moeten laten vervallen, waarbij de vraag is welke? Het doorbreken van de keten op een bepaald punt wil niet zeggen dat er geen nieuwe (langere) keten ontstaat, aan de andere kant kan de gemaakte aanpassing veel groter zijn dan nodig is om een oplossing te vinden.

Om dit probleem te ondervangen is er daarom voor gekozen om de dienstregeling stap voor stap op te bouwen, waarbij er begonnen is met de meest kritische regio, namelijk de regio rond Amsterdam/Schiphol. Vervolgens zijn er binnen dit gebied stapsgewijs trajecten toegevoegd, zodat er uiteindelijk een plan voor heel Nederland ontstond. Door deze iteratieve aanpak gaat een deel

van de kwaliteit van de oplossing verloren, maar blijft het proces wel stuurbaar en is het inzichtelijk welke wensen tijdens het proces zijn losgelaten.

### Tot slot

De nieuwe dienstregeling loopt nu op het moment van schrijven een half jaar en al te grote problemen zijn uitgebleven. De aanvankelijke scepsis bij het grote publiek is omgeslagen in vertrouwen en ook objectieve criteria laten zien dat het de goede kant uitgaat. Opvallend is dat in de regio waar de dienstregeling als eerste is gemaakt, ook de grootste stijging in de punctualiteitscijfers is opgetreden. Dit kan echter ook komen door de andere lijnvoering rond Amsterdam en het feit dat andere delen van het land meer nadeel hebben van het later gereed komen van de Betuweroute.

\* De infrastructuur was voor de nieuwe dienstregeling gegeven.

#### LITERATUUR

Huisman, D., Kroon, L.G., Lentink, R.M. en Vromans M.J.C.M. (2005). Operations Research in passenger railway transportation. *Statistica Neerlandica*, 59, 467-497.  
Schrijver, A. en Steenbeek A. (1994). *Dienstregeling ontwikkeling voor Railned*. Technisch rapport CWI, Amsterdam  
Zwaneveld, P., Kroon, L., Romeijn, H. Salomon, M., Dautère-Pères S., Hoesel C. van en Ambergen H. (1996). Routing trains through railway stations: Model formulation and algorithms. *Transportation Science*, 30, 181-194.

*DENNIS HUISMAN werkt part-time als logistiek adviseur bij NS. Tevens heeft hij een part-time aanstelling als universitair docent bij het Econometrisch Instituut van de Erasmus Universiteit Rotterdam.  
E-mail: <huisman@few.eur.nl>*

*COR VAN 'T WOUTD is werkzaam bij het bedrijfseconomisch bureau van NS Binnenlands Reizigersvervoer. Na zijn studie beslistkunde aan de Erasmus Universiteit heeft hij bij de afdeling Logistiek gewerkt aan het ontwerp van de nieuwe dienstregeling. E-mail: <cor.vantwoudt@ns.nl>*

## column

# WEGVERKEERD

### ONNO BOXMA

Ieder mens is vertrouwd met wachten. U wacht gemiddeld meer dan een half uur per dag: op het vrijkomen van de badkamer, voor een verkeerslicht, op de trein, op een lift, aan de telefoon, op het beschikbaar komen van een webpagina, bij de kassa van de supermarkt, op opslag. Sommige van deze wachtsituaties worden prachtig gevangen in modellen uit de wachtrijtheorie, en de analyse en optimalisering van zulke modellen heeft een belangrijke impact gehad op de inrichting en het functioneren van allerlei systemen, zoals call centers, het internet en draadloze communicatienetwerken. De prestatieanalyse van computer- en communicatienetwerken is zelfs jaarlijks onderwerp van enige grote congressen, en diverse bedrijven hebben onderzoeksgroepen op dit terrein. Maar de wachtrijtheorie kent niet louter succesverhalen. Ik krijg het schaamrood op de kaken als ik denk aan wat de wachtrijtheorie heeft gedaan met liften: ze laten vallen als





bakstenen. We praten over een vakgebied met tienduizenden publicaties, dat toch maar twee of drie fatsoenlijke studies (bv. [1]) heeft geproduceerd betreffende een wachtverschijnsel dat zo velen dagelijks ergert. Elke werkdag moet ik naar de 9de verdieping, en de laatste 50 jaar doe ik dat niet meer met de trap. We hebben vier liften in ons zeer brede en 12 verdiepingen hoge hoofdgebouw; twee aan elk van de twee uiteinden. Dat klinkt verstandig, maar is het goed onderbouwd? Zou er een goede wiskundige theorie bestaan die aangeeft hoeveel liften je moet hebben bij een dergelijk gebouw, en waar je ze moet plaatsen, en wat hun stopstrategie moet zijn?

### **Wegverkeer: wachtrijtheorie gefileerd**

Helaas is de staat van dienst van de wachtrijtheorie in het wegverkeer niet heel veel beter. Laat ik, met Weiss [2], drie onderwerpen onderscheiden: (A) statische situaties zoals het wachten voor een

gat in een verkeersstroom en het wachten bij verkeerslichten; (B) dynamische situaties zoals het ontstaan en oplossen van files; (C) regeling en optimalisering van verkeersstromen. Het eerste artikel over het wachten op een gat in een verkeersstroom dateert al van 1936 [3]. Bij dit soort problemen gaat het erom dat een voetganger, of een auto die een voorrangsweg nadert, wacht tot de verkeersstroom op de hoofdweg een gat laat vallen dat groot genoeg is om over te steken of zich in het verkeer te voegen. Dit was een onderwerp dat de wachtrijtheorie nog wel aankon; Weiss [2] noemt diverse resultaten en verwijzingen, ook voor de meer gecompliceerde situatie dat een stroom auto's de voorrangsweg nadert.

Verkeerslichten hebben me altijd gefascineerd. De situatie bij verkeerslichten raakt, wachtrijtheoretisch gezien, aan twee onderwerpen die buitengewoon grondig zijn geanalyseerd: (i) wachtrijen waarin de bediende onderbroken wordt dan wel op vakantie gaat (rood licht voor een verkeersstroom), en (ii) polling systemen, waarin een bediende diverse wachtrijen in cyclische volgorde enige tijd bedient (groen licht voor stroom 1, dan voor stroom 2, enz.). Er zijn wel duizend artikelen gewijd aan polling systemen, dikwijls geïnspireerd door protocollen voor communicatienetwerken of door productieprocessen (een machine produceert enige tijd producten van type 1, dan van type 2, enz.). Er is, ook door promovendi van mij, onderzocht hoe lang je producten van elk type zou moeten produceren alvorens om te schakelen, ten einde de kosten te minimaliseren. Je zou denken dat veel van die resultaten overdraagbaar zijn naar kruispunten met verkeerslichten – ook al zijn er subtiele verschillen zoals linksafslaand verkeer dat interfereert met rechtdoor gaande tegenliggers.

Een recent afstudeerproject van Monique van den Broek in onze groep heeft me verder gesterkt in die opvatting. Zij analyseerde, met moder-

ne methoden uit de wachtrijtheorie, een groot kruispunt in Eindhoven. Gebruik makend van combinatorische optimalisering probeerde ze vervolgens een zo goed mogelijke groencyclus voor het verkeer te construeren. Ze versloeg de door de gemeente gehanteerde verkeersinstelling heel overtuigend. En passant leidde ze een benaderingsformule [4] af voor de gemiddelde wachttijd van een verkeersstroom, die beduidend beter is dan een klassieke benadering van Webster [5] – wat een rare maar vrij nauwkeurige formule is, die is opgebouwd uit een paar standaard wachtrijtermen en een term die voortkomt uit het fitten van door simulatie voorspeld gedrag van die gemiddelde wachttijd. Dat Webster's benadering verbeterd kon worden, is niet zo gek als je bedenkt dat hij uit 1958 stamt; opzienbarend is wel, dat de formule nog steeds volop gebruikt wordt. Dat moet haast komen omdat wiskundige wachtrijtheorie in verkeerskringen veel minder ingeburgerd is dan in bijvoorbeeld telecomkringen.

### Files van files vs. files van auto's

Dat brengt me bij onderwerp (B): dynamische situaties zoals het ontstaan en oplossen van files. Dit lijkt veel meer het domein van civiel ingenieurs en fysici dan van wachtrijtheoretici. Inderdaad lijken de gehanteerde modellen ver af te wijken van klassieke wachtrijmodellen, en veel dichter te staan bij de kinetische theorie van transportproblemen zoals je die vindt in de statistische mechanica, en de theorie van schokgolven. Zulke theorieën zijn macroscopisch, terwijl de klassieke wachtrijtheorie meestal kijkt naar individuele klanten (dus individuele auto's). Maar bij wachtrijmodellen voor moderne communicatienetwerken wordt op allerlei schalen gekeken, van bytes tot alternerend aan en uit zijnde 'vloeistofstromen'. Je zou mogen hopen dat de enorme – en succesvolle – inspanning van de laatste decennia

betreffende het modelleren, analyseren en optimaliseren van verkeersstromen in communicatienetwerken ook tot bruikbare inzichten leidt bij de genoemde problemen (B) en (C) in wegverkeersstromen. Rekeningrijden en toeritdosering hebben immers al geruime tijd goed bestudeerde tegenhangers in communicatienetwerken.

Frank Kelly, één der meest vooraanstaande onderzoekers in de prestatie-analyse van communicatienetwerken, en hoofdspreker op het 14th Applied Probability INFORMS congres dat EURANDOM onlangs organiseerde, was in Engeland van 2003 tot 2006 Chief Scientific Advisor voor het Department of Transport van de Britse overheid (zie <[www.statslab.cam.ac.uk/~frank/transport/](http://www.statslab.cam.ac.uk/~frank/transport/)>). Hij zei in Eindhoven dat hij de overtuiging is toegedaan dat wachtrijtheorie veel meer kan betekenen voor onderwerpen (B) en (C) dan tot dusver is gebleken. Wel acht hij de uitdagingen, zeker bij netwerkstructuren, enorm. Bij files, en bij een aaneenschakeling van verkeerslichten, zie je bijvoorbeeld ingewikkelde zelfreguleringsmechanismen. Welke promovendus wil zich hieraan eens wagen?

#### LITERATUUR

1. G.F. Newell (1996). Two elevators serving up-traffic. *Queueing Systems* 23, 57-76.
2. G.H. Weiss (1965). A survey of some recent research in road traffic. In: W.L. Smith en W.E. Wilkinson (eds.). *Proceedings of the Symposium on Congestion Theory*. The University of North-Carolina Press, Chapel Hill, pp. 253-288.
3. W.F. Adams (1936). Road traffic considered as a random series. *J. Inst. Civ. Engrs.* London 4, 121-130.
4. M.S. van den Broek, J.S.H. van Leeuwen, I.J.B.F. Adan en O.J. Boxma (2006). Bounds and approximations for the fixed-cycle traffic-light queue. *Transportation Science* 40, 484-496.
5. F.V. Webster (1958). *Traffic signal settings*. Road Res. Laboratory Tech. Rep. 39.

ONNO BOXMA is hoogleraar Stochastische Besliskunde bij de Faculteit Wiskunde en Informatica van de Technische Universiteit Eindhoven en wetenschappelijk directeur van EURANDOM. E-mail: <[boxma@win.tue.nl](mailto:boxma@win.tue.nl)>.

Er bestaan in Nederland heel wat organisaties die raakvlakken hebben met het werk van de VVS. Een daarvan is de NOSMO waaraan in dit nummer van STATOR aandacht wordt besteed. In volgende nummers hoopt de redactie over nog meer van deze instellingen te kunnen berichten.

## De NOSMO en de NOSMO Methodologendag

De NOSMO is de Nederlandse Organisatie voor Sociaal-wetenschappelijk Methodologisch Onderzoek. Zij organiseert o.a. jaarlijks een methodologendag. In de sociaal-wetenschappelijke onderzoekswereld waarin onderzoeksscholen zich specialiseren op hun eigen discipline en onderzoeksdomein heeft deze dag een nuttige functie. De NOSMO methodologen kijken graag over de grenzen van onderzoeksscholen heen en proberen kennis uit verschillende domeinen op een methodologisch verantwoorde wijze met elkaar te combineren.

Centraal bij dit soort uitwisseling van kennis staat de vraag hoe je geldige en betrouwbare kennis over een onderzoeksdomein verkrijgt. Dat blijkt nog steeds een intrigerende vraag die op de NOSMO methodologendagen leidt tot levendige uiteenzettingen en discussies, aangezet door gerenommeerde onderzoekers.

Zo was er in 2004 een plenaire presentatie en discussie (aan de hand van een themanummer van Stator 2004-2) over de geldigheid en betrouwbaarheid van het gebruik van statistiek in de rechtszaal. Aan de hand van het inmiddels beroemde geval van Lucia B. werd onder andere door Heico Kerkmeester kritische kantekeningen geplaatst bij de wijze waarop in de bewijsvoering wel of niet gebruik werd gemaakt van kansredeneringen om de schuld van een verdachte te bewijzen. Baysiaanse redeneringen werden niet geschuwd en lieten zien dat in zaken van leven of dood geavanceerde statistische redeneringen een

rol kunnen spelen. Statistiek bleek zo een wetenschap in ontwikkeling waarin fundamentele vragen over de rol van toeval in het leven gesteld kunnen worden die soms beantwoord worden en soms niet.

### Onderzoeksgroepen

De grenzen verkennen van wat wetenschappelijk mogelijk is en die verleggen is iets wat alle leden van de NOSMO aanspreekt, of het nu om psychologen, antropologen, sociologen, bestuurskundigen of statistici of wiskundigen gaat. Zij hebben zich naast hun actieve deelname aan onderzoeksscholen voor dat doel in de NOSMO verenigd in onderzoeksgroepen.

De groep 'Dataverzameling, Instrumentatie & Researchdesign' ziet zich daarbij als discussieplatform voor onderzoekers die geïnteresseerd zijn in conceptualiseren en meten, en in de relatie tussen de keuze van het onderzoeksontwerp en conceptualiserings- en meetproblemen. Leden van deze groep zijn spraakmakend als het gaat om survey-onderzoek en de vraag hoe 'betrouwbaar' dat onderzoek is. Daarnaast hebben kwalitatieve onderzoekers zich verenigd in het platform Kwalon. Om een tegenwicht te bieden tegen wat zij als 'dominerende' kwantitatieve stroming in de sociale wetenschappen ervaren organiseren zij studiedagen, geven zij cursussen en publiceren een eigen tijdschrift *Kwalon*.

Wat deze groepen gemeen hebben is hun maatschappelijke interesse, of het nu om de invloed van



verkiezingsonderzoek gaat (NRC 24-11-2006) of om de participatie in ontwikkelingssamenwerking (Kwalon, 2006-3). Die maatschappelijke interesse geldt ook voor de groep 'Sociale Netwerk Analyse' die zich bezig houdt met het onderzoek naar sociale netwerken, zowel netwerken van persoonlijke relaties als netwerken waar organisaties, thema's, landen en dergelijke centraal staan. Aan de wieg van deze groep stond onderzoek van de socioloog Stokman naar de netwerken van macht in Nederland (1973). Tegenwoordig timmert de groep aan de weg met behulp van onderzoek naar vriendschapsnetwerken.

Hoe de wisselwerking tussen individu en maatschappij onderzoeksmatig in kaart gebracht kan worden is een kolfje naar de methodologische hand van de onderzoeksgroep 'Multi-level research'. Baanbrekend werk is wat dat betreft in Nederland verricht door Tom Snijders (voorzitter van deze groep en oud-voorzitter van de NOSMO) en door Joop Hox (oud-voorzitter van de NOSMO). De vraag hoe het ingewikkeld geheel van een samenleving goed in kaart kan worden gebracht is het onderwerp van de onderzoeksgroep 'Methodologie voor Complexe Maatschappelijke Problemen'. Nog meer dan andere groepen manifesteert deze groep zich de laatste tijd internationaal en interdisciplinair, bijvoorbeeld in het gezelschap van 'Operational Research' onderzoekers. Daarbij zijn complexe 'real life' problemen vaak het onderwerp van aandacht.

De combinatie van wetenschappelijke en maatschappelijke interesse brengt NOSMO leden vaak aan de grenzen van wat wetenschappelijk gezien mogelijk is. Voor statistici wordt dat duidelijk bij de onderzoeksgroep 'Longitudinale Modellen'. Han Oud, voorzitter van deze groep, pioniert al jaren op het domein van continue tijd modellering. Het vaak door sociale wetenschappers gehanteerde software programma SPSS laat je daarbij in de steek. Om desondanks de uitkomsten van onderzoek en simulatie in continue

tijd te confronteren met empirische data heb je geavanceerde statistiek nodig en passende software zoals Mx. Dat is een opgave die voor de leden van de groep een bredere wetenschappelijke samenwerking vereist. Vandaar ook dat er over de grenzen wordt gekeken en wordt samengewerkt met leden van verwante internationale methodologische groeperingen zoals RC33 (Research Committee on Logic and Methodology) en de EAM (European Association of Methodology).

Die drang om over wetenschappelijke (en nationale grenzen) heen te kijken vindt men ook terug bij de onderzoeksgroep 'Simulatie' die zich in het bijzonder bezig houdt met computersimulatie maar spelsimulatie niet verwaarloost. Ook in die groep speelt de vraag hoe de uitkomst van (complex) simulatie modellen kan worden vergeleken met empirische data en statistisch gevalideerd kunnen worden een belangrijke rol. Na Nederlandstalige publicaties verschenen er Engelstalige publicaties van leden van de groep over dat onderwerp.

De interesse voor continue tijd die beide groepen delen leidde voor de methodologendag van 9 maart 2007 tot de uitnodiging aan Han van der Maas om te spreken over zijn baanbrekend artikel in *Psychological Review*. Daarin wordt beschreven dat de continue simulatie van ontwikkelingsprocessen tot verrassende inzichten in de rol van toeval leidt en een nieuw vergezicht geeft op de statistiek. Voor lezers van *Stator* kan dit de moeite waard zijn evenals als de andere voordrachten (kwantitatief of kwalitatief georiënteerd) die door de onderzoeksgroepen van de NOSMO in groter en in kleiner gezelschap op deze dag georganiseerd worden.

Cor van Dijkum, voorzitter NOSMO

Op de website van de NOSMO ([www.nosmo.nl](http://www.nosmo.nl)) vindt U alle informatie over de onderzoeksgroepen en over de Methodologendag.

# Halvering opslagkosten reserveonderdelen

## Beste Europese proefschrift Operations Research van dr.ir. Bram Kranenburg MTD

Het beste proefschrift op het gebied van Operations Research aan een Europese universiteit is van de hand van dr.ir. Bram Kranenburg MTD uit Helmond. Hij promoveerde eind vorig jaar aan de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) tot doctor in de technische wetenschappen. Kranenburg heeft op 11 juli de prijs tijdens de Europese conferentie over Operations Research in Praag in ontvangst genomen.

Er waren in totaal 28 proefschriften genomineerd voor deze onderscheiding. Tijdens de conferentie hebben drie onderzoekers in een finale gestreden om de EURO Doctoral Dissertation Award. Bram Kranenburg kwam als beste uit de bus met zijn dissertatie 'Spare parts inventory control under system availability constraints'. De onderscheiding bestaat uit een geldbedrag van duizend euro en een oorkonde. Hij is als consultant in dienst van het adviesbureau CQM in Eindhoven.

In zijn proefschrift beschrijft Kranenburg een nieuwe planningsmethode, die een slimme voorraadbeheersing van reserveonderdelen mogelijk maakt. De methode gaat uit van een verregaande samenwerking tussen verschillende magazijnen. De methode zorgt ervoor dat de planning van de voorraden voor alle onderdelen in meerdere magazijnen geïntegreerd verloopt. Zo kan de voorraad worden verlaagd en de wachttijd op reserveonderdelen worden verkort. Dit is mogelijk dankzij de fundamentele wiskundige modellen van Bram Kranenburg.

### Big Business

De opslag van reserveonderdelen is in Nederland Big Business. Jaarlijks gaan hier miljarden euro's in om. Elke industrie- of servicetak met complexe apparatuur heeft ermee te maken. Denk maar aan elektronica, ziekenhuizen, industriële apparatuur

en de auto-industrie. Eén goedkoop onderdeelje dat defect is, kan al genoeg zijn om een hele machine voor geruime tijd buiten bedrijf te stellen. Daarom worden sinds jaar en dag hoge eisen gesteld aan de voorraad en distributiesnelheid van reserveonderdelen.

### Poolen

Voor het optimaliseren van het gehele logistieke proces is dan ook al veel onderzoek verricht. Toch wordt meestal de voorraadplanning voor elk magazijn afzonderlijk gedaan. ASML benaderde de TU/e met de vraag of dat niet slimmer kon en dat is in het promotieonderzoek van Kranenburg een belangrijk thema geworden. Kranenburg: 'De crux van mijn model zit in het "poolen" van verschillende magazijnen. Als een regionaal magazijn een onderdeel niet op voorraad heeft, zou deze ook een ander regionaal magazijn kunnen inschakelen zonder meteen centraal te gaan. Als je dat vervolgens structureel wil aanpakken, kan je veel winnen door in de voorraadplanning daar rekening mee te houden. Maar om dat echt goed te doen, wordt het wiskundig zeer complex om dat allemaal uit te rekenen. Daar ben ik in mijn promotieonderzoek mee bezig geweest en ASML heeft mijn model en algoritmes al direct weten te implementeren.'

De modellen zijn praktisch zeer relevant en kunnen leiden tot grote besparingen. Kranenburg: 'Voor sommige theoretische data sets vonden we kostenbesparingen van wel 50%! In zijn onderzoek heeft Kranenburg verder nog gewerkt aan modellen met geïntegreerd voorraadbeheer voor verschillende machines en voor verschillende groepen klanten. Alle modellen zijn universeel toepasbaar.

*Bron: Technische Universiteit Eindhoven*

# Let's GO!

TNT's activities are divided between two operational divisions: TNT Post en TNT Express.

TNT Express division is among the world's largest express operators and the number 1 in Europe.

TNT Express division continually expands its air and road network in Europe, Asia, Australia, South America and de Middle-East.

## Become an **Optimization Analyst** for the **Global Optimization (GO)** team of TNT Express

### What?

Primary objectives of the job are:

- To support the optimization of TNT's Supply Chain operations on a global scale through development & implementation of optimization analysis and modelling solutions (strategic and tactical planning);
- To conduct and manage optimization projects using solutions from the Global Optimization Toolbox;
- To develop optimization tools that are currently non-existent within TNT Express;
- To generalize pilot project results of new tools into encompassing implementation packages.

### Mobility

Travelling is requested. Daytime job – working and travelling after office hours required / high level of flexibility

TNT offers an attractive package of salary and conditions of employment.

### Where?

TNT - Division: Express – Business Unit: Global Networks & Operations – Department: Strategy – Location: Duiven

Information [www.tnt.com](http://www.tnt.com) – Corporate - Career