

's Nachts rijden de treinen niet en op rustige momenten zijn de treinen korter dan in de spits. Dat betekent dat er voortdurend met treinstellen gerangeerd moet worden. En dat op het intensiefst bereden spoorwegnet van Europa. **John van den Broek** en **Ramon Lentink** beschrijven de optimaliseringstechnieken die voor het plannen van de rangeerbewegingen gebruikt worden.

Rangeerplannen maken voor treinen

Inleiding

Op werkdagen maken er in Nederland ongeveer 1.100.000 mensen gebruik van de trein, wat op jaarbasis zo'n 15.000.000.000 reizigerskilometers oplevert. Om al deze reizigers te kunnen vervoeren, rijden er op een werkdag zo'n 5200 reizigerstreinen. Naast deze reizigerstreinen rijden er ook nog eens ongeveer 300 goederentreinen over dezelfde infrastructuur. Daarmee is het Nederlandse spoorwegnet het meest intensief bereden net van Europa.

Om al deze treinen op tijd te kunnen laten rijden, met daarop een machinist en het gewenste aantal conducteurs, is een hels karwei waaraan honderden planners dagelijks werken. De laatste tien jaar zijn door de ingebruikname van beslissingsondersteunende systemen, de plannen kwalitatief veel beter geworden. De in december 2006 ingevoerde nieuwe dienstregeling is hier een mooi voorbeeld van. Met behulp van wiskundige technieken zijn verschillende onderdelen van de planning binnen NS verbeterd. In dit artikel illustreren we hoe de rangeerplannen met behulp van optimaliseringstechnieken verbeterd worden.

Een belangrijke karakteristiek van het reizigersvervoer zijn de piekuren, waarin de vraag naar transport extreem hoog is. Deze uren liggen op werkdagen ongeveer tussen 7:00 en 9:00 en tussen 16:00 en 18:00. Gedurende de piekuren wordt vrijwel al het beschikbare materieel van een vervoerder ingezet. Buiten deze piekuren is er een overschot aan materieel, wat dan op een opstel terrein geplaatst wordt. In de nacht wordt vrijwel al het materieel op een opstel terrein geplaatst. Op zo'n opstel terrein ondergaat het materieel verschillende bewerkingen, zoals interne en externe reiniging, onderhoud en kleine reparaties.

Om materieel op de juiste plek op een opstel terrein te krijgen, zijn rangeerbewegingen noodzakelijk. Deze rangeerbewegingen maken gebruik van dezelfde infrastructuur als reizigerstreinen en goederentreinen. Ze moeten zo tussen deze treinen door gepland worden dat ze hen

niet hinderen. Rangeerbewegingen zijn met name noodzakelijk voor en na de spitsuren voor het verlengen en inkorten van treinen. In de ochtend moeten alle treinstellen van een startende trein van de opstel terreinen naar de perons gereden worden. 's Avonds en 's nachts moeten vanzelfsprekend eindigende treinen weer naar het opstel terrein gebracht worden. Beide vereisen ook vele rangeerbewegingen. Overdag is het grootste probleem het vinden van routes tussen de treinen in de dienstregeling. 's Nachts is het grootste probleem om zo efficiënt mogelijk gebruik te maken van de opstelcapaciteit. Het is de bedoeling dat treinstellen elkaar niet blokkeren en dat alle treinstellen op het opstel terrein geplaatst kunnen worden.

De planning van rangeerbewegingen is onder te verdelen in vier aparte stappen (Lentink, 2006):

1. Toewijzen van aankomende aan vertrekkende treinstellen.
2. Opstellen van treinstellen.
3. Routeren van treinstellen over de wissels, kruisingen en sporen.
4. Planning van het rangeer personeel.

In de eerste stap worden alle treinstellen die op een station aankomen, toegewezen aan vertrekkende treinstellen. Afhankelijk van onder andere de hoeveelheid tijd die tussen aankomst en vertrek zit, worden treinstellen naar een opstel terrein gebracht. In stap 2 moeten posities van treinstellen op opstel sporen bepaald worden, zodanig dat het opstarten van de dienstregeling 's morgens zo vlot mogelijk verloopt en er zoveel mogelijk treinstellen opgesteld kunnen worden. Zodra zo'n opstel plan gemaakt is, is ook bekend naar welk opstel spoor een treinstel gerangeerd moet worden en kan er een tijdstip bepaald worden waarop het naar het opstel terrein gebracht kan worden en via welke route. Dit gebeurt in de derde stap van de rangeerplanning. Zodra alle rangeerbewegingen gepland zijn, moet er personeel aan de rangeerbewegingen worden toegekend. Hoe binnen NS Reizigers de stappen 2 en 3 van de rangeerplanning worden aangepakt, wordt in detail besproken in dit artikel. De stappen 1 en 4 worden alleen kort geïntroduceerd.

Toewijzen van aankomende aan vertrekkende treinstellen

Voor iedere trein die aankomt of vertrekt, beschrijft de dienstregeling het tijdstip en het perron van aankomst of vertrek. Daarnaast beschrijft de dienstregeling ook de exacte volgorde van typen treinstellen in iedere trein. Deze configuraties mogen niet worden gewijzigd.

Het grootste deel van de treinstellen in aankomende treinen is op voorhand al toegewezen aan treinstellen in vertrekkende treinen. Dit geldt met name voor doorgaande treinen, die een korte periode langs een perron stoppen om reizigers in en uit te laten stappen, waarna de treinen hun weg vervolgen naar andere stations. Voor de resterende treinstellen moet de rangeerplanner een toewijzing maken.

De treinstellen worden onderverdeeld in families, bijvoorbeeld dubbeldekkers, en binnen een familie bestaan vaak twee typen. De typen binnen een familie onderscheiden zich door het aantal wagons in dit type. Van de dubbeldekkers kennen we het type met vier wagons en het type met zes wagons.

De belangrijkste doelstellingen zijn om aankomende treinstellen uit een trein zoveel mogelijk toe te wijzen aan dezelfde vertrekkende trein. Daarnaast is het wenselijk om zoveel mogelijk toewijzingen te maken met een minimaal verschil in tijd tussen aankomst en vertrek. Deze doelstellingen resulteren in een minimale hoeveelheid rangeerwerk.

Dit probleem is wiskundig gemodelleerd als een geheel-tallig lineair programmeringsprobleem, waarin voor elke aankomende en vertrekkende trein een kortste pad probleem wordt opgelost. Het doel van zo'n kortste pad probleem is het bepalen welke treinstellen van de trein bij elkaar blijven. De composities van treinstellen die komen uit deze kortste pad problemen voor de binnenkomende treinen worden simultaan toegewezen aan die van de vertrekkende treinen door middel van het geheel-tallig lineair programmeringsprobleem.

Opstellen van treinstellen

Gegeven een toewijzing van binnenkomende treinstellen aan vertrekkende treinstellen, moet men bepalen op welke opstelsporen de treinstellen opgesteld worden tussen aankomst en vertrek. In deze paragraaf bespreken we dit probleem meer in detail en beschrijven we hoe we het probleem oplossen met behulp van wiskundige technieken.

We maken onderscheid tussen LIFO en vrije opstelsporen. LIFO-opstelsporen kunnen maar vanaf één kant opgereden worden. Dit heeft als gevolg dat treinstellen het spoor oprijden en verlaten volgens het Last-In-First-Out principe. Vrije opstelsporen kunnen van twee zijden opgereden worden.

Een belangrijk begrip bij dit probleem is kruising. Een kruising op een opstelspoor treedt op als een treinstel i de aankomst of het vertrek van een ander treinstel j blokkeert. Een voorbeeld is als treinstel j als eerste een LIFO-opstelspoor wordt opgereden, waarna treinstel i ook op hetzelfde opstelspoor wordt gezet. Als j nu eerder moet vertrekken dan i is er sprake van een kruising.

Een tweede begrip dat we introduceren is het begrip blok. Een blok is een verzameling treinstellen die in dezelfde trein een station binnenkomen en verlaten, en daarom ook tezamen opgesteld worden. Blokken hebben aankomst- en vertrektijden, en dus een volgorde. Een spoor-toewijzing is een toewijzing van blokken aan een specifiek opstelspoor en is toegelaten als:

- De toewijzing niet tot kruisingen leidt.
- Op elk tijdstip de totale lengte van de treinstellen kleiner is dan de lengte van het opstelspoor.
- Alle treinstellen daadwerkelijk toegelaten zijn op hun toegewezen opstelspoor. Het is met name van belang of er wel of geen bovenleiding bij een opstelspoor aanwezig is.

Lentink (2006) definieert het TrackAssignmentProbleem (TAP) als volgt: Gegeven een verzameling blokken van treinstellen en een verzameling opstelsporen. TAP is het probleem van het toewijzen van blokken aan opstelsporen op een toegelaten manier, waarbij het opstarten van de dienstregeling 's morgens zo vlot mogelijk verloopt (maximaliseren robuustheid) en er zoveel mogelijk blokken opgesteld worden.

Andere mogelijke doelstellingen zijn het minimaliseren van de geschatte routeringskosten, minimaliseren van het aantal splitsingen van treinstellen afkomstig van dezelfde trein en het minimaliseren van sporen waarop meerdere typen treinstellen geparkeerd staan.

Er zijn verschillende manieren waarop TAP gemodelleerd kan worden. We presenteren hier een voorbeeld gebaseerd op het Set Partitioning Probleem. We formuleren het als een geheel-tallig programmeringsprobleem. Daarvoor introduceren we eerst de volgende parameters:

- S = verzameling opstelsporen.
- B = verzameling van blokken die opgesteld moeten worden.
- T_s = verzameling van potentiële toewijzingen aan spoor $s \in S$.
- T_{sb} = verzameling van potentiële toewijzingen aan spoor $s \in S$ die blok b bevatten.
- f_{st} = de kosten van toewijzing t aan spoor s .
- d = een boete als een blok aan geen enkel spoor toegewezen wordt.

We merken op dat de parameter d veel groter is dan f_{st} , dit omdat het toewijzen van zoveel mogelijk blokken de meest belangrijke doelstelling is.

Naast de parameters definiëren we twee soorten beslissingsvariabelen, namelijk:

$$x_{st} = \begin{cases} 1 & \text{als toewijzing } t \in T_s \text{ gebruikt wordt voor spoor } s \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

$$N_b = \begin{cases} 1 & \text{als blok } b \text{ niet op een spoor } s \in S \text{ geplaatst wordt} \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

Gegeven deze definities kunnen we nu het geheeltallig programmeringsprobleem geven:

Minimaliseer

$$\sum_{s \in S} \sum_{t \in T_s} f_{st} x_{st} + d \sum_{b \in B} N_b$$

onder de voorwaarden:

$$\sum_{s \in S} \sum_{t \in T_{sb}} x_{st} + N_b = 1 \quad \forall b \in B$$

$$\sum_{t \in T_s} x_{st} \leq 1 \quad \forall s \in S$$

$$x_{st} \in \{0, 1\} \quad \forall s \in S, \forall t \in T_s$$

$$N_b \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B$$

De doelstelling is het minimaliseren van de totale kosten voor het opstellen van de treinstellen. De eerste voorwaarde zorgt ervoor dat elk blok toegewezen wordt aan een opstelspoor of helemaal niet opgesteld wordt. In het laatste geval geldt $N_b = 1$ voor het betreffende blok b . Voorwaarde (2) verzekert dat er hoogstens één toewijzing aan een opstelspoor gedaan wordt. Vanwege het enorm grote aantal beslissingsvariabelen is er een heuristiek ontwikkeld, gebaseerd op kolomgeneratie. De details van deze heuristiek zijn te vinden in Lentink (2006). We bespreken hier alleen de resultaten van de heuristiek voor de stations Enschede en Zwolle.

Station Enschede heeft dertien opstelsporen waarvan de lengte varieert tussen de 55 en 650 meter, waarvan elf vrije sporen en twee LIFO-sporen. Het aantal blokken dat opgesteld moet worden, is achttien. Station Zwolle staat bekend als het ingewikkeldste station van Nederland wat betreft rangeren. Het heeft negentien opstelsporen met lengtes tussen de 110 en 400 meter. De opstelsporen bestaan uit twaalf vrije sporen en zeven LIFO-sporen. Voor station Zwolle moeten gemiddeld vijftig blokken opgesteld worden.

Aangezien met behulp van kolomgeneratie de LP-relaxatie opgelost wordt, hebben we een ondergrens tot onze beschikking. De oplossingswaarden van de heuristiek blijken erg dicht bij deze ondergrens te liggen (het gat

tussen de oplossingswaarde en ondergrens is kleiner dan 3%) wat aangeeft dat de heuristiek uitstekende resultaten geeft. Voor alle instanties blijkt tevens dat alle blokken toegewezen kunnen worden aan een opstelspoor. De rektijd van de heuristiek is voor Enschede verwaarloosbaar en voor station Zwolle enkele minuten.

Met behulp van de hierboven besproken wiskundige technieken bieden we een uitstekend hulpmiddel aan planners voor het maken van een toegelaten opstelplan. Aan het model zijn nog een aantal extra opties toegevoegd om de planner oplossingen te laten kiezen, bijvoorbeeld door treinstellen van hetzelfde materieeltype aan hetzelfde opstelspoor toe te wijzen of bepaalde opstelsporen bij voorkeur door bepaalde materieeltypen te laten gebruiken. Een leuk voorbeeld hierbij is het volgende: Voor verschillende opstel terreinen in Nederland geldt de eis dat er 's nachts dubbeldekkers op de buitenste opstelsporen moeten staan; deze dienen dan tevens als geluidswal.

Routeren van treinstellen

We gaan nu het bepalen van tijdstippen en routes voor rangeerbewegingen wat nader in detail bespreken. Daarnaast leggen we uit hoe we dit probleem oplossen met behulp van wiskundige technieken. Meer details over dit probleem zijn te vinden in Van den Broek (2002 en 2006).

Op een station hebben we te maken met dienstregelings-treinen, goederentreinen en rangeerbewegingen. Zowel voor goederentreinen als dienstregelings-treinen geldt dat de aankomst- en vertreksporen bekend zijn, en dat de plantijd bekend is en niet gewijzigd mag worden. Goederentreinen worden door ProRail gepland en daaraan mag door ons niets gewijzigd worden. Aangezien in stap 2 van de rangeerplanning al bepaald is naar welke opstelsporen het materieel gebracht moet worden, is ook voor rangeerbewegingen de aanname dat vertrek- en aankomstsporen bekend zijn, reëel. Verder worden treinbewegingen gekarakteriseerd door hun route over de infrastructuur en hun plantijd. De plantijd van een beweging is de aankomst- of vertrektijd op de perrons. Voor een vertrekkende reizigerstrein is de plantijd dus gelijk aan zijn vertrektijd en voor goederentreinen komt de plantijd overeen met de doorkomsttijd langs de perrons. Voor rangeerbewegingen is een interval gegeven waarbinnen de plantijd van de rangeerbeweging moet komen te liggen. Dit interval is bijvoorbeeld afhankelijk van de aankomsttijd van de volgende trein die van een perron gebruikmaakt. Het doel is om voor alle rangeerbewegingen een plantijd en route over de infrastructuur te bepalen. Een complicerende factor treedt op als een opstel terrein parallel ligt aan de perronsporen, dan zijn namelijk zaagbewegingen noodzakelijk. In figuur 1 is een plattegrond van station Groningen gegeven, waar vele zaagbewegingen plaatsvinden. Een

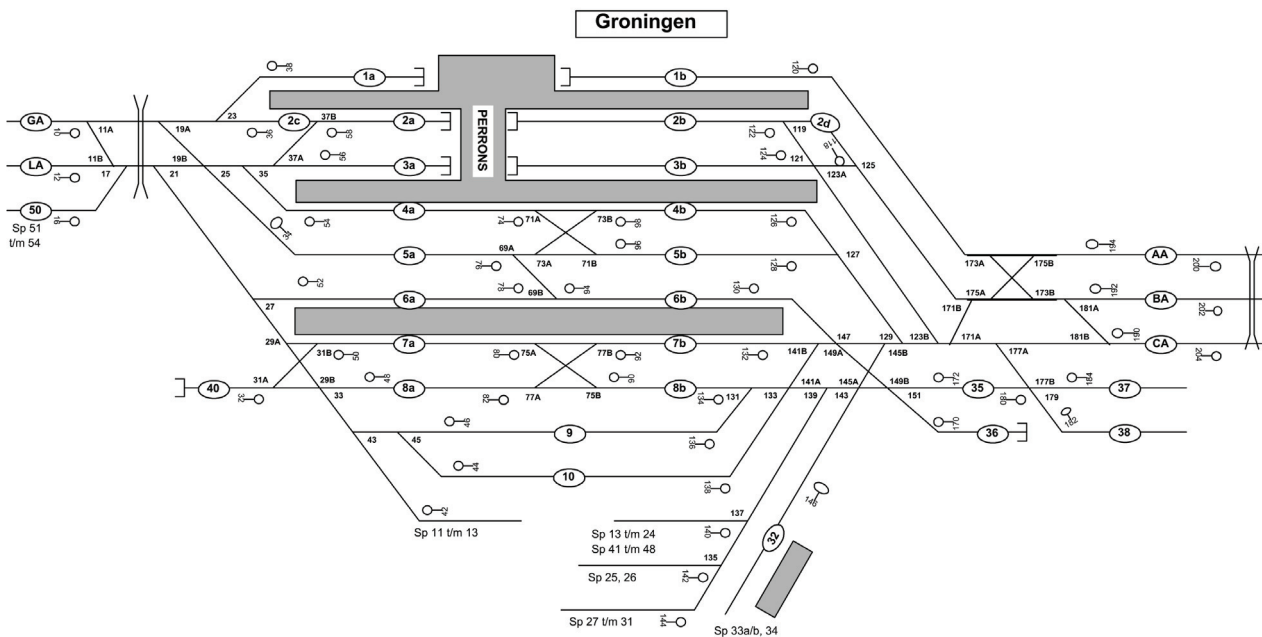


fig. 1 station Groningen

voorbeeld hiervan is als een treinstel van spoor 1B naar spoor 10 gebracht moet worden. Het treinstel gaat dan eerst van spoor 1B naar bijvoorbeeld spoor CA dat hij dan enkele minuten bezet houdt, omdat de machinist moet omlopen. Daarna vertrekt hij van spoor CA naar spoor 10. Om ervoor te zorgen dat twee treinen niet tegelijkertijd gebruikmaken van een wissel, kruising of spoor, moet er een minimum aantal minuten tussen de plantijden van treinen zitten die gebruikmaken van eenzelfde infraelement. Dit aantal minuten wordt gegeven door normen. Als bijvoorbeeld trein A vertrekt en trein B kort daarna binnenkomt op een ander perron en beide gebruiken een zelfde wissel of kruising, dan moet er minimaal drie minuten tussen de vertrektijd van trein A en aankomsttijd van trein B zitten.

Het probleem wordt weer opgelost met behulp van geheeltallige lineaire programmering. Ter illustratie gaan we nu in op de wat vereenvoudigde versie waarbij we veronderstellen dat de route van een beweging gegeven is. Hiervoor definiëren we de volgende parameters:

- J is de verzameling van alle treinbewegingen.
- r_j = het eerst mogelijke plantijdstip van beweging j .
- d_j = het laatst mogelijke plantijdstip van beweging j .
- l_{jk} = het aantal minuten dat tussen de plantijden van de bewegingen j en k moet zitten, gegeven dat j als eerste over het conflictpunt gaat.

De beslissingsvariabelen die we gebruiken, zijn:

- y_j = de plantijd van beweging j
- $u_j = \begin{cases} 1 & \text{als beweging } j \text{ niet op tijd ingepland kan worden} \\ 0 & \text{als beweging } j \text{ wel op tijd ingepland kan worden} \end{cases}$

$$x_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{als beweging } j \text{ voor beweging } k \\ & \text{over het conflictpunt gaat} \\ 0 & \text{anders} \end{cases}$$

Als $r_j \leq y_j \leq d_j$, dan is de beslissingsvariabele u_j gelijk aan nul, anders wordt hij één. Voor reeds geplande reizigerstreinen j geldt $y_j = r_j = d_j$ en $u_j = 0$. Het geheeltallig programmeringsprobleem dat we oplossen om de plantijd van rangeerbewegingen te bepalen, ziet er dan als volgt uit: minimaliseer

$$\sum_{j \in J} u_j$$

onder de voorwaarden:

$$y_j \geq r_j \quad \forall j \in J \quad (1)$$

$$y_j \leq d_j + u_j M \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$y_j + l_{jk} \leq y_k + (1 - x_{jk})M \quad \forall j, k \in J \quad (3)$$

$$x_{jk} + x_{kj} = 1 \quad \forall j, k \in J \quad (4)$$

$$x_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall j, k \in J \quad (5)$$

$$y_j \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$u_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (7)$$

Het doel is om een toegelaten plantijd te bepalen voor alle rangeerbewegingen; daarom minimaliseren we het aantal rangeerbewegingen waarvoor we geen plantijd binnen het gewenste interval kunnen vinden. De eerste twee typen restricties zorgen ervoor dat de plantijd in het vereiste interval gekozen wordt en als dit niet mogelijk is, wordt u_j op één gezet. Het derde type restrictie zorgt ervoor dat er voldoende minuten tussen de plantijden van de bewe-

gingen j en k zitten. M is een willekeurig groot geheel getal wat ervoor zorgt dat dit type restrictie geen functie heeft als $x_{jk} = 0$. Merk op dat l_{jk} gelijk is aan nul als de bewegingen j en k geen infra-element gemeenschappelijk hebben. Ten slotte, het vierde type restrictie eist dat j voor k komt of andersom.

Voor vrijwel alle grotere stations in Nederland is het model inmiddels getest. Hieronder bespreken we de resultaten voor de stations Groningen en Utrecht. Station Groningen is een relatief klein station met één opstel terrein, zie figuur 1. Doordat het opstel terrein parallel ligt aan de perrons, vinden er in Groningen relatief veel zaagbewegingen plaats. Een typische weekdag van 24 uur in Groningen bevat ongeveer 600 treinbewegingen waarbinnen zaagbewegingen dubbel meegeteld worden. Van deze 600 bewegingen zijn er ongeveer 200 rangeerbewegingen waarvan we de plantijd moeten bepalen.

Station Utrecht is het grootste station van Nederland. Treinen vertrekken in alle richtingen van het land. Het station bevat inmiddels drie opstel terreinen die alleen toegankelijk zijn door gebruik te maken van infrastructuur die ook door de reizigerstreinen gebruikt wordt. Om een rangeerbeweging tussen alle reizigerstreinen door te plannen is daardoor een zeer lastig karwei. Dagelijks vinden er in Utrecht zo'n 2000 treinbewegingen plaats waarvan ongeveer 200 rangeerbewegingen. Zaagbewegingen komen eigenlijk zelden tot niet voor in Utrecht. Het geheeltallig programmeringsprobleem wordt opgelost met behulp van het commerciële programma CPLEX. Dit programma lost het programmeringsprobleem binnen enkele seconden optimaal op en geeft als uitvoer plantijden van de op tijd ingeplande rangeerbewegingen. Het gebouwde programma wordt op dit moment ingepast in het planproces van NS Reizigers. Hierbij lopen we tegen een aantal problemen aan. Eén van de grootste problemen is bijvoorbeeld om de juiste invoergegevens te krijgen. De normtijden verschillen bijvoorbeeld per station en niemand heeft hier een overzicht van. Een ander voorbeeld zijn de infrastructuurgegevens. Deze gegevens wijzigen regelmatig als gevolg van bijvoorbeeld nieuwe perrons en daardoor blijkt het lastig te zijn om deze gegevens up-to-date te houden. Uit tests blijkt nochtans dat het programma een rangeerplan genereert waar planners zeer tevreden over zijn en zij staan dan ook te popelen om van het gereedschap gebruik te kunnen maken.

Planning van rangeerpersoneel

In principe worden de activiteiten die volgen uit de rangeerplanning door lokaal rangeerpersoneel uitgevoerd.

Deze activiteiten omvatten het rangeren van treinstellen van en naar opstel terreinen, assisteren bij het (ont-)koppelen van treinstellen en het reinigen van treinstellen. Voor de verschillende activiteiten is personeel met verschillende kwalificaties nodig. Dit probleem onderscheidt zich van een traditioneel personeelsplanningprobleem, omdat taken een flexibele start- en eindtijd kunnen hebben (bijvoorbeeld het rangeren van treinstellen naar een opstelspoor), en omdat de meeste taken een korte duur hebben, waardoor er veel taken in een dienst passen. Meer details over dit probleem en enkele heuristieken om dit op te lossen, zijn te vinden in Hoekert (2001).

Huidige stand van zaken

Voor alle vier de stappen in de rangeerplanning zijn inmiddels bruikbare prototypen ontwikkeld en worden er tests uitgevoerd. Vele gesprekken met planners zijn noodzakelijk geweest om te komen tot de huidige prototypen en nog vele zullen er nodig zijn om de tools verder te verbeteren. Op dit moment zijn we druk doende de prototypen in het planproces van NS Reizigers in te passen, wat een geweldige uitdaging op zich is.

Met behulp van de ontwikkelde beslissingsondersteunende systemen kunnen in de nabije toekomst in korte tijd, kwalitatief goede rangeerplannen ontwikkeld worden. Ook dit draagt bij tot een hogere betrouwbaarheid op het spoor, wat een betere service voor onze klanten betekent en daar is het uiteindelijk allemaal om te doen.

*John van den Broek,
TU Eindhoven en NS Reizigers, Utrecht
Ramon Lentink,
NS Reizigers, Utrecht*

Literatuur

- Broek, J.J.J. van den (2002). *Toets op Inplanbaarheid van Rangeerbewegingen*, M.Sc. thesis. Eindhoven: University of Technology.
- Broek, J.J.J. van den & L.G. Kroon (2007). A Capacity Test for Shunting Movements. In: F. Geraets, L.G. Kroon, A. Schoebel, D. Wagner & C. Zaroliagis *Algorithmic Methods for Railway Optimization LNCS volume 4359*, 108-125.
- Hoekert, W. (2001). Het maken van diensten voor rangeerpersoneel, M.Sc. scriptie. Rotterdam: Erasmus Universiteit.
- Lentink, R.M. (2006). *Algorithmic Decision Support for Shunt Planning*, Ph.D. thesis. Rotterdam: Erasmus University.