

MATHEMATISCHE BESLISKUNDE OP DE BRES VOOR MAINPORT ROTTERDAM:¹

Een onderzoek aangaande de routing van Automatisch Geleide Voertuigen bij ECT.

Rommert Dekker, Nanda Piersma, Jacco de Bruin en Edwin van der Vlist²

Samenvatting

In deze bijdrage beschrijven we de rol die de mathematische besliskunde voor de Rotterdamse haven speelt. We geven een overzicht van toepassingen tot dusver, met een accent op bijdragen vanuit de Erasmus Universiteit. We betogen voorts dat bij de vele investeringsbeslissingen die genomen moeten worden om van Rotterdam een Mainport te maken de bedrijfsvoeringsaspecten niet uit het oog verloren mogen worden. Een te eenzijdige blik op de technologie kan namelijk tot slechte resultaten leiden. Het is juist de mathematische besliskunde die de bedrijfsvoering kan verbeteren en het is verstandig deze discipline reeds in het ontwerp te gebruiken. Dit illustreren we met een recente case studie voor Europe Combined Terminals. Deze studie betrof de verbetering van het routeringsconcept voor de Automatisch Geleide Voertuigen (AGV's) die bij de DSL terminal gebruikt worden. Het huidige, statische concept was niet in staat rekening te houden met congestie in het AGV verkeer, waardoor havenkranen vertraging opliepen en deadlocks konden ontstaan. Een nieuw ontwikkeld dynamisch routeringsconcept kan deze problemen voorkomen en bleek in simulatiestudies tot een aanzienlijk betere performance te leiden.

Abstract

In this contribution we describe the role operations research (could) play for the Rotterdam harbour. We give an overview of its applications so far. We argue that for the many investments which have to be made for Rotterdam Mainport, it is essential to take operations aspects into account. Too much focus on technology can lead to underperformance. Operations research is well capable of dealing with operations problems and this discipline should already be applied in the design phase of systems. We illustrate this viewpoint with a recent case study for Europe Combined Terminals. The study concerned the improvement of the routing concept of the Automatic Guided Vehicles in use at the DSL terminal. The present, static concept could not take account of the congestion in the AGV traffic with the result that the (un)loading operations of the cranes could be delayed. Besides, it was not able to take care of deadlock situations nor of breakdowns of an AGV.

¹Dit stuk is geschreven voor het oprichtingscongres van de onderzoeksschool TRAIL, een samenwerkingsverband van de TU Delft en de Erasmus Universiteit op het gebied van Verkeer, Vervoer en Logistiek.

²Vakgroep Mathematische Besliskunde, Erasmus Universiteit Rotterdam.
Postbus 1738, 3000 DR Rotterdam. Tel. 010-4081274, email: dekker@opres.few.eur.nl

A newly developed, dynamic routing concept could take care of all three problems. It was scientifically advanced and showed that operations research is useful in the design of complex systems.

1. Inleiding

De uitdrukking Mainport Rotterdam behelst dat de Rotterdamse haven een spil wordt in de distributie van goederen over West-Europa. Een spil waarlangs de meeste goederenstromen zullen gaan en waarbij andere havens een minder vooraanstaande rol hebben. Het idee is voorts dat deze spilfunctie bedrijven aantrekt die dan een verdere toegevoegde waarde aan de goederenstroom zullen geven.

Mainport Rotterdam ontstaat echter niet vanzelf. Niet alleen moeten economische krachten richting centralisatie werken, maar tevens moet de Rotterdamse haven zich van andere havens weten te onderscheiden, zowel in infrastructuur alsook in het management van de havenactiviteiten. Dit vergt een voortdurende inspanning om beide aspecten zo goed mogelijk te laten zijn. Eén van de wetenschappelijke disciplines die daarvoor hulp kan bieden is de mathematische besliskunde.

De mathematische besliskunde (of ook wel operations research) houdt zich bezig met het ontwikkelen en onderzoeken van kwantitatieve modellen ter ondersteuning van beslissingen in de bedrijfsvoering. Naast belangstelling voor de wiskundige kant van het vak, is er bij universiteiten een toenemende aandacht om de besliskunde verder te ontwikkelen aan de hand van concrete problemen uit het bedrijfsleven, waaronder de Rotterdamse Haven.

In deze bijdrage beogen we uiteen te zetten hoe de besliskunde de Rotterdamse haven van dienst kan zijn. Eerst zullen we daartoe een algemene beschouwing geven. De vermelde studies dienen meer als voorbeeld dan dat zij pogen een uitputtende opsomming te zijn. Vervolgens wordt een praktijkstudie bij Europe Combined Terminals uitgewerkt.

2. Wat kan de mathematische besliskunde doen voor Mainport Rotterdam?

2.1 Een overzicht van toepassingen in de haven

Zowel bij het ontwerp als bij de latere bedrijfsvoering van installaties kan de besliskunde van dienst zijn. Het gaat daarbij vooral om bepaling van de benodigde capaciteit van installaties onder complicerende factoren zoals een variërende of onzekere vraag en een grote beslissingsvrijheid op uitvoerend niveau. Een bekend voorbeeld is het ontwerp van haveninstallaties, zoals kades, steigers en los-, laad- en opslagfaciliteiten (voorbeelden worden gegeven in Van Hee et al. (1988), Van Hee en Wijbrands (1988) en Nieboer en Dekker (1995)). De technische kant hiervan laten we graag aan de werktuigbouwers over, maar economische aspecten met betrekking tot de performance van deze installaties is typisch iets voor de besliskundigen. Aangezien de aankomst van schepen nogal aan fluktuaties onderhevig is, zijn er zowel momenten waarop er veel schepen geladen en gelost moeten worden als momenten waarop bijna niets te doen is. Dit veroorzaakt een slechte bezetting van de installaties, hetgeen economisch onaantrekkelijk is. Een goede

afweging van te voren tussen de te bouwen capaciteit en het te verwachten beroep daarop kan dan een hoop schelen, zowel voor de bouwer van de faciliteiten als de gebruiker (de Rotterdam bezoekende schepen). Concrete studies zijn voornamelijk in afstudeerwerken te vinden, zoals Lokin (1976), De Vos (1975) en Braam (1994). Het probleem wordt gecompliceerder als installaties zo nu en dan uitvallen of onderhouden moeten worden, maar technieken uit de bedrijfszekerheidsanalyse (hetgeen overlapt met de besliskunde) kunnen dan aangewend worden. Deze fluktuaties leveren trouwens ook een probleem voor de hoeveelheid benodigde mankracht. Ook de hiervoor opgerichte havenpool is wel eens onderwerp van studie geweest (zie Van Hee (1983)).

Ook in de bedrijfsvoering in de haven treden veel problemen op die met de besliskunde te lijf gegaan kunnen worden. Een bekend voorbeeld is de containeroverslag (zie ook Van Hee en Wijbrands (1983)). Hierin komen o.a. de volgende besliskundige problemen naar voren

- in welke volgorde beladen we een schip, rekening houdend met de zwaarte en het type van de containers, hun bestemmingshaven (hetgeen een groepering op het schip vereist) en de manier waarop ze zijn opgeslagen (van twee containers die boven op elkaar liggen en in hetzelfde schip moeten, wordt bij voorkeur eerst de bovenste en dan de onderste geladen).
- hoe slaan we containers op in het opslagterrein: dicht op elkaar of ver uitelkaar; in het eerste geval moet men soms de onderste container van een stapel hebben, hetgeen verkassen met zich mee brengt en in het tweede geval is er veel terrein nodig en moet men lang rijden.
- welke ploegenindeling en mankrachttoewijzing past het beste bij de (voorspelde) werklust.
- hoe schedulen (d.w.z wijzen we taken toe en bepalen het vertrektijdstip) en routeren we (automatisch geleide) voertuigen die gebruikt worden bij de overslag van containers.

Een deel van het laatste probleem (de routing) zal uitgebreid behandeld worden in sectie 3. Het zal voorts niet verwonderlijk zijn dat het grootste containeroverslagbedrijf in de haven, Europe Combined Terminals, eigen besliskundige specialisten in huis heeft.

Ook bij haven-gelieerde bedrijven zien we de besliskunde een rol spelen. In raffinaderijen wordt op grote schaal gepland middels lineaire programmering. Hoewel men reeds jaren geleden deze techniek al toepaste, vinden er nog steeds nieuwe ontwikkelingen plaats en zelfs de waterkant kan nog behoorlijk geoptimaliseerd worden (zie Braam (1994)). Daarnaast wordt ook bij scheepvaartmaatschappijen besliskunde gebruikt om lijnvaartschema's te ontwerpen en om bijvoorbeeld containerstromen (zowel volle als lege) te optimaliseren (zie Woudstra (1992)).

In de aan- en afvoer van goederen speelt het weg-, water- en railvervoer een belangrijke rol. Routing van trucks is een van de bekende successen van de besliskunde (zie Van Vliet et al. (1992) voor een Rotterdams succes in deze hoek). Bij een toenemende drukte in de haven zullen knelpunten op de weg alleen maar groter worden, vandaar de huidige DiTrans plannen (zie Evers (1994)). Een belangrijk nauwverwant terrein in opkomst (vnl. in de Verenigde Staten) is het zgn. "Intelligent Vehicle Highway Systems", waarbij het wegverkeer gestuurd wordt op basis van actuele informatie omtrent congestie. Intelligente en dynamische routing van trucks past daarbij goed en vereist een nieuwe klasse van

besliskundige routeringsalgoritmen. Tenslotte is er ook bij waterwegen zo nu en dan sprake van congestie en ook daar wordt met besliskunde aan gewerkt (zie Knoope (1993)).

Hoewel sommige van dit soort problemen al twintig jaar geleden aangepakt werden, is er toch een groot verschil tussen de oplossingen van toen en die van nu. Dit verschil zit in de opkomst van de informatietechnologie. Twintig jaar geleden waren er alleen nog logge en dure minicomputers en mainframes, terwijl personal computers van nu bijna dezelfde capaciteiten hebben tegen een duizendvoud lagere prijs. Ook de telecommunicatie infrastructuur is in de loop der tijd behoorlijk verbeterd. Een aantal havenbedrijven werkt met EDI (electronic data interchange) en nog veel meer zullen die drempel nemen. Daarnaast is ook softwarematig veel verbeterd, in die zin dat er betere software in kortere tijd te bouwen is. Maar ook hier geldt dat wat vandaag goed is, morgen verouderd kan zijn. De overdaad aan informatie en computerkracht vraagt om efficiënt en effectief gebruikt te worden, zeker bij alle beslissingen die genomen moeten worden.

2.2 Een besliskundige visie op Mainport Rotterdam

Er zullen vele grote infrastructurele werken en beheers- en besturingssystemen nodig zijn om van Rotterdam een echte Mainport te maken. De besluitvorming daaromheen zal vele aspecten hebben, zowel technische, economische als politieke, maar tevens zal men niet om de operationele besturingsaspecten heen kunnen, omdat die in veel gevallen de uiteindelijke performance en daarmee de kosteneffectiviteit bepalen. Het probleem dat in sectie 3 behandeld wordt illustreert dit punt treffend. De besliskunde combineert techniek en economie, zonder van vooringenomen standpunten uit te gaan. Het is maar al te vaak zo dat de functie van de besliskunde bestaat uit het structureren van de besluitvorming, en het objectief kwantificeren van de voor- en nadelen van een aantal opties, zodanig dat een betere beslissing genomen kan worden (zie Dekker et al. (1993) voor een toelichting hiervan in de onderhoudsoptimalisatie). De besliskunde gaat dan vaak hand in hand met beslissingsondersteunende systemen waarin haar modellen zijn ingebed.

Dit verhaal zou echter een te mooi beeld van de praktijk schetsen als we ook niet wat nadelen van de besliskunde zouden opnoemen. Een probleem van de besliskunde is dat het vaak te specialistisch gevonden wordt en niet altijd makkelijk te begrijpen is. Men ziet liever een mooie kraan dan goede besturingsoftware. Toch is het in toenemende mate de software die de dienst gaat uitmaken. Dat gaat al op in de telecommunicatiewereld, maar straks ook in de haven. Een goede informatie infrastructuur zal ook een competitieve voorsprong bieden.

De wisselwerking tussen theorie en praktijk verloopt echter niet altijd harmonieus. Besliskundige adviesbureaus hebben meestal geen tijd om hun inzichten en ervaringen in wetenschappelijke artikelen om te zetten, terwijl universitaire besliskundigen het nogal druk hebben met onderwijs, bestuur en fundamenteel onderzoek. Voorts ondervinden deze laatste sterke competitie in het onderzoeksveld en is er veel druk om internationaal te publiceren. Uit ervaring kunnen we echter zeggen dat in de meeste confrontaties met de praktijk er leemten in de theorie blijken te zijn, hetgeen aanleiding geeft om nieuwe theorie te ontwikkelen. Dit komt doordat in de meeste theorie alleen versimpelde gevallen behandeld konden worden; het aanpakken van complexe problemen staat nog maar in de kinderschoenen en is zonder aanzienlijke reken capaciteit (hetgeen in het verleden ontbrak)

niet te doen. Daarnaast is het een uitdaging voor de besliskunde dat de praktijk voortdurend verandert en dat de moderne informatietechnologie steeds nieuwe vragen oproept. Dit is dan ook te zien in het probleem dat in sectie 3 behandeld wordt.

3. Routing van AGV's voor Europe Combined Terminals

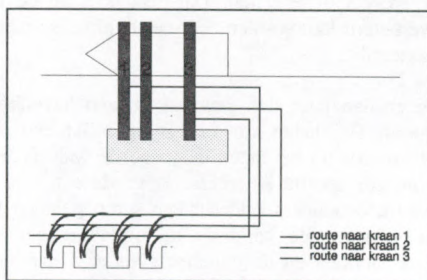
Om beter de waarde van de mathematische besliskunde te laten zien, zullen we in deze sectie een actueel probleem behandelen dat met besliskundige technieken is aangepakt.

3.1 Het probleem

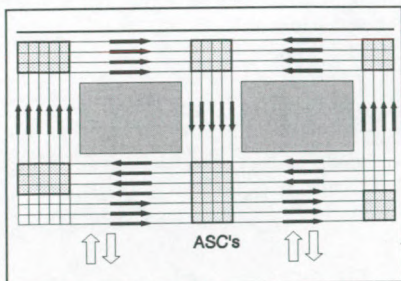
Europe Combined Terminals (ECT) heeft een aantal terminals waar containers worden overgeslagen. Op één daarvan, de DSL terminal, wordt met automatisch geleide voertuigen (AGV's) gewerkt. Deze vervoeren containers van de havenkranen naar het ook automatisch uitgevoerde opslagterrein en terug. Er zijn zo'n 48 van deze AGV's, die volledig onbemand rijden. De AGV's vrij groot, zo'n 18 bij 3 meter.

De besturing van de AGV's geschiedt door een centrale computer, die in radiografisch contact staat met de AGV's. Op het terrein zijn sensoren aangebracht in het wegdek die de AGV's in staat stellen om aan de centrale computer de huidige positie te melden. De plaatsing van de sensoren bepaalt een aantal banen waarover de AGV's zich bewegen. De computer geeft dan aan hoe snel een AGV moet rijden en wanneer een bocht moet worden gemaakt. Omdat de AGV's vrij groot zijn hebben ze veel ruimte nodig om manoeuvres, zoals draaien of van baan veranderen, uit te voeren. Om botsingen te voorkomen zal het huidige besturingssysteem ervoor zorgen dat aan de voorkant van elke AGV een gebiedje geclaimd wordt waar geen andere AGV's mogen zijn. De grootte van dit gebiedje is afgestemd op de remweg en de beweging van de AGV. Zodra het claimgebied van AGV een obstakel raakt (bijvoorbeeld een andere AGV) stopt het besturingssysteem de AGV.

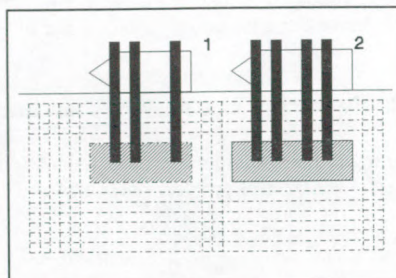
Het opslagterrein bestaat uit 25 stroken die elk door een eigen automatische kraan, ookwel ASC (Automatic Stack Crane) genaamd, bediend worden. In het huidige systeem bestaat er tussen elke kadekraan en elk overslagpunt op het opslagterrein (en vice versa) een vaste route. Om de routing eenvoudig te houden is het terrein ingedeeld in beperkt aantal rijbanen.



Figuur 1: Voorbeeld van de topologie



Figuur 2: Rijrichtingen



Figuur 3: Totaaloverzicht van het terrein

In figuren 1,2,3 is te zien dat er bij de DSL terminal zowel langs de kade als langs het opslagterrein parallelle banen lopen. Op drie plaatsen zijn er loodrecht op deze banen passagebanen (zie figuur 2). De indeling van het terrein in combinatie met de vaste routes tussen elk tweetal eindpunten (d.w.z. (kadekraan, ASC) en (ASC, kadekraan)) wordt de topologie genoemd. Zo nu en dan moet de topologie aangepast worden door veranderingen op het terrein (bijvoorbeeld door het neerleggen van dekluisen, of door aankomst en vertrek van schepen).

De prestatie van het besturingssysteem wordt gemeten in het aantal containers dat kan worden geladen of gelost per uur. Ook de vertragingen die ontstaan op het terrein zijn een maat. Het huidige besturingssysteem is niet in staat een eenmaal uitgegeven route te wijzigen - daarbij men moet bedenken dat de routetoewijzing en het volgen van de AGV's real-time problemen zijn, waarbij beslissingen binnen een beperkte tijd (een paar seconden) genomen moeten worden! De flexibiliteit van het huidige besturingssysteem is dus niet erg groot. Echter, het is niet a priori duidelijk dat er een real-time besturingssysteem bestaat met meer flexibiliteit en ook een betere performance.

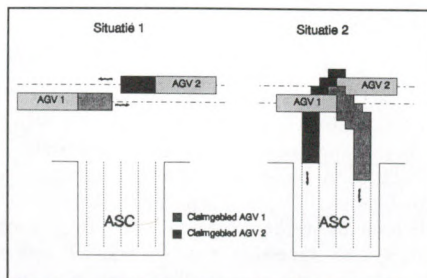
Het realiseren van de DSL terminal was een grote technologische prestatie, met voertuig-technische en logistieke aspecten, waarbij veel problemen moesten worden opgelost. Na het overwinnen van de kinderziektes voldoet de terminal aan de ontwerpisen. Voorts denkt men erover om voor de nieuw te bouwen container terminal op de Maasvlakte, de Delta-2000-8 terminal, ook AGV's in te zetten. Dat deed meteen de vraag rijzen of het huidige besturingsconcept verbeterd kan worden. Bij het huidige systeem zijn namelijk de volgende problemen geconstateerd:

- (i) AGV's arriveren zo nu en dan later dan gewenst bij een havenkraan, waardoor het beladen vertraging oploopt. Het laden van een schip blijkt een logistiek moeilijker probleem dan het lossen, omdat bij het laden de volgorde waarin de containers arriveren bij de kadekraan een rol speelt. Allereerst is er de eis van stabiliteit, hetgeen ruwweg betekent dat zware containers onderin een schip geladen moeten worden en lichte bovenop. Daarnaast speelt de volgorde bij ontlading een rol: een schip zal immers meerdere havens aandoen en de containers moeten dan ook weer makkelijk gelost kunnen worden (d.w.z. zonder andere containers te verplaatsen). Dit betekent

dat de containers per haven geladen worden. Tevens moet rekening gehouden worden met speciale containers (zoals vriescontainers die moeten worden aangesloten op stroom voor de koeling) en met de manier waarop de containers in het opslagterrein zijn gestapeld (ook hier geldt, eerst de bovenste laden, dan de onderste(n)). Tenslotte moeten de containers met hun dichte kant naar de voorkant van het schip staan. Omdat de kraan de container om technische redenen niet kan draaien moeten de AGV's de containers met de juiste oriëntatie aanvoeren, hetgeen betekent dat ze soms een halve slag moeten draaien.

Zodra een AGV met een container te laat bij een havenkraan aankomt moet de kraan wachten en kan deze meestal niet eerst een andere container laden. De andere AGV's moeten wachten en belemmeren weer AGV's op weg naar andere havenkranen. Het huidige besturingsconcept kan niet goed voorspellen wanneer een AGV bij een kraan zal aankomen. Dit hangt immers af van het verkeer dat het AGV onderweg tegenkomt. Wanneer alle AGV's extra vroeg op hun route gestuurd worden zal er alleen maar meer verkeer zijn, waarbij meer vertraging opgelopen zal worden. Bovendien kan het systeem geen alternatieve routes aanbieden wanneer er opstoppen gesignaleerd worden.

- (ii) Doordat de AGV's uitwenken zal het besturingssysteem een vrij groot gebied claimen voor elke AGV. De AGV's zullen elkaar onderweg niet alleen hinderen, maar kunnen elkaar ook vastzetten, een zogenaamde deadlock. Bij een deadlock moeten meerdere AGV's eenzelfde gebied claimen om hun route te vervolgen. De AGV's kunnen dit gebied alleen claimen wanneer de andere AGV's zijn gepasseerd, maar die wachten juist op het betreffende AGV. Dit verschijnsel wordt in figuur 4 verduidelijkt.



Figuur 4: voorbeeld van een deadlock

AGV 1 wil rechts naar beneden een ASC plaats in, terwijl AGV 2 links naar beneden wil. Omdat AGV 1 bij het nemen van de bocht iets uitslaat, overlapt zijn claimgebied dat van AGV 2 en blokkeert de computer de doorgang. Hetzelfde geldt voor AGV 2. Het zal duidelijk zijn dat ook hier het probleem is dat het besturingsconcept te statisch is. Niet alleen voorziet het systeem het deadlocks probleem niet, maar ook kan het systeem niets aan een deadlock doen. Met een statisch bestu-

ringssysteem is er geen andere oplossing voor deadlocks dan het hele verkeer stilleggen en één van de AGV's verslepen.

- (iii) Eenzelfde probleem komt naar voren bij uitval van een AGV. Ook dan wordt het systeem stilgelegd en de betreffende AGV weggesleept.

Gelukkig komen deadlocks en uitval niet vaak voor, maar ze veroorzaken een aanzienlijke vertraging omdat de complete terminal wordt stilgelegd. Deadlocks kunnen wellicht worden voorkomen door de banen waarop de AGV's zich bewegen verder uit elkaar te leggen, waardoor bij het nemen van de bochten er minder of geen overlap meer is. Dit geeft echter een gedeeltelijke oplossing, bij het kruisen van AGV's zullen er altijd problemen blijven. Bovendien vermindert deze aanpak de capaciteit van het terrein en dus de performance van de terminal. Een andere mogelijke aanpak is cirkel routing waarbij de AGV's in een cirkel over het terrein bewegen. Deze methode kan niet effectief toegepast worden omdat, in ieder geval in de DSL terminal, de containers voor een schip verspreid staan over het hele opslagterrein.

De opdracht die aan ons werd voorgelegd is te onderzoeken of er een ander besturingsconcept bestaat dat de bovenstaande problemen kan voorkomen.

3.2 Een literatuuroverzicht

Systemen met automatische geleide voertuigen bestaan slechts zo'n 10 jaar en het is daarom niet verwonderlijk dat alle relevante literatuur van recente datum is. Vrijwel alle AGV besturingsystemen houden zich bezig met de interne logistiek, hetzij in een fabriek, hetzij in een magazijn. De DSL is de eerste container terminal ter wereld waar AGV's worden gebruikt. Nu kan het DSL terrein ook met een magazijn vergeleken worden, maar de dimensies zijn aanzienlijk groter. De AGV's die binnen een fabriek gebruikt worden hebben een kleine omvang, tot zo'n 5 meter lengte en 2 meter breedte. Dit heeft tot gevolg dat AGV's in de literatuur als puntbronnen zonder afmetingen beschouwd worden, hetgeen in het ECT probleem niet realistisch is.

Co en Tanchoco (1991) en Wilhelm en Evans (1987) geven overzichten van de tot nu toe bereikte resultaten binnen de mathematische beslissonde met betrekking tot de aansturing van AGV's. Aspecten die in dit soort studies aan de orde komen zijn achtereenvolgens: de bepaling van het aantal benodigde AGV's, hun capaciteit, de structuur van het wegennet, de dispatching, de routing en de verkeersregeling. De dispatching is de selectie en toewijzing van taken aan AGV's. De routing is de selectie van wegen of paden die door de AGV's gevolgd moeten worden om hun eindbestemming te bereiken, hetgeen het probleem in kwestie is.

Een evaluatie van de literatuur met betrekking tot het ECT probleem wordt gegeven in De Bruin en Van der Vlist (1994). Zij onderscheiden twee aanpakken, namelijk een statische en een dynamische routing. Bij de statische aanpak ligt de route tussen elk begin- en eindpunt vast, terwijl de route in de dynamische routing on-line wordt bepaald en per keer kan verschillen.

Het voordeel van een statische routing is dat alle routes van te voren opgeslagen kunnen

worden in de computer en dus weinig rekentijd vergen om uit te geven. Het nadeel is de beperkte flexibiliteit. Een dynamische routing kan rekening houden met de verkeersdruk- te, maar dat kan alleen als er actuele informatie is over de verkeersdruk- te. In het algemeen kan dit zowel macro als micro informatie zijn. Met macro informatie bedoelen we geaggregeerde informatie over de aantallen voertuigen op een bepaald wegvak op een bepaald tijdstip. Dit is het type informatie dat in "Intelligent Vehicle Highway Systems" (zie Khattak en Koppelman (1993)) gebruikt wordt. Micro informatie daarentegen slaat op informatie over de positie van individuele voertuigen op elk moment in de tijd. Gezien de beperkte aantallen AGV's in de studie kan er met micro informatie gewerkt worden. De informatie over de voertuigen kan zowel per voertuig opgeslagen worden als per wegdeel. Het laatste zou voor het besturingssysteem zijn te prefereren, maar vergt wel meer opslag.

Op basis van het literatuuroverzicht valt verder te concluderen dat:

- (i) De vertraging die AGV's oplopen bij het aan- of afvoeren van containers vermeden kan worden door de verkeersdruk- te per wegdeel bij te houden en daarmee in de dispatching van de AGV's rekening te houden. Hierdoor kunnen in principe ook deadlocks worden voorkomen.
- (ii) De uitval van AGV's alleen middels een dynamische routing te verhelpen is, gecombineerd met informatie over de verkeersdruk- te. In principe kan dan het snelste pad tussen elk tweetal punten bepaald worden, waarbij rekening gehouden kan worden met de claimgebieden (en de bijbehorende tijdsintervallen dat een gebied wordt geclaimd) van andere voertuigen. Algoritmen voor dit probleem zijn o.a. beschreven in Hohzaki et al. (1990).

Alternatieve aanpakken, zoals het gebruik van neurale netwerken, klinken veelbelovend, maar kunnen volgens ons het probleem niet geheel oplossen. Een neurale netwerk zal misschien wel goede vuistregels voor de verkeersregeling kunnen ontwikkelen, maar toch nooit deadlocks kunnen voorkomen, tenzij het netwerk daar precieze informatie over heeft. Dit betekent dan weer dat de verkeersdruk- te bijgehouden moet worden. Indien dat het geval is, kan net zo goed middels een tijdsafhankelijk kortste pad methode een goede route gevonden worden.

3.3. Een nieuw besturingsconcept

Omdat het huidige besturingsconcept een statisch karakter heeft en een dynamische routing volgens ons de beste perspectieven biedt, is er voor gekozen om deze laatste verder uit te werken. Het ontwerpen van een dynamisch routingssysteem is echter niet eenvoudig: er moeten oplossingen worden gevonden voor, onder andere, een keuze uit de vele mogelijke routes tussen elk begin- en eindpunt, de controle op de volgordebewaking bij het laden, het constateren van vertraging en voor het schatten van aankomsttijd van een AGV bij het eindpunt. We zullen een globale beschrijving geven van een aantal aspecten van het systeem.

In het huidige besturingsconcept wordt gewerkt met een "meerijsend" claimgebied aan de voorkant van elke AGV. Voor een dynamische routingssysteem moet op elk moment in de tijd bekend zijn welk deel van het terrein wordt geclaimd door elke AGV. Het terrein wordt daartoe opgedeeld in kleine zones. Een AGV claimt een aantal zones tegelijkertijd. Het gedrag van het AGV in termen van de claimgebieden moet beschreven worden in

termen van de zones op het terrein. Vanwege het uitzwenkgedrag van de AGV's bij het nemen van een bocht of bij het veranderen van baan claimt het AGV ook aan de zijkant een aantal zones gedurende een bepaald tijdsinterval.

Vervolgens is er een algoritme nodig dat de snelste route tussen een tweetal willekeurige punten bepaalt. Voor het normale kortste pad probleem kan de beste oplossing eenvoudig gevonden worden middels het welbekende Dijkstra algoritme (als n het aantal gebieden aangeeft, dan heeft Dijkstra's algoritme een aantal rekenstappen nodig proportioneel met n^2). Een probleem voor het toepassen van dit algoritme in een besturingssysteem is echter het grote aantal zones (zo'n 2500) en het feit dat op elk tijdstip een andere deelverzameling van de zones niet beschikbaar is omdat ze worden geclaimd door op het terrein aanwezige AGV's. Daarom is er een afschattingsfunctie gebruikt die de afstand tussen twee punten in korte tijd kan benaderen. Met die functie kan de boom met kortse paden effectief in de richting van het eindpunt gestuurd worden.

Elke nieuw uit te geven route behelst dus voornamelijk het oplossen van een kortste pad probleem op een andere verzameling claimgebieden (het dispatching systeem zelf is niet aangepast). Het dynamische besturingssysteem is in staat om elke AGV een andere route te geven. Zodra een route is bepaald wordt deze niet meer veranderd, tenzij er zich een onverwachte gebeurtenis voordoet, zoals uitval van een AGV. In dat geval moeten alle routes opnieuw gecontroleerd en uitgegeven worden.

Men kan zich afvragen of het niet verstandig is om uitgegeven routes wel te wijzigen op een later tijdstip ten gunste van een dan uit te geven route. Immers, bij het uitgeven van een route houdt men geen rekening met de routes die daarna moeten worden uitgegeven. Correctie van eerder uitgegeven routes kan dus voordelig zijn.

Dit aspect is vooralsnog te complex om met een methode die on-line een oplossing moet persenteren aan te pakken: wanneer men één eerder uitgewezen route wijzigt dan zal men alle andere routes ook moeten nalopen op veranderingen. Echter, het is mogelijk om eerder uitgegeven routes te wijzigen met behulp van simpele heuristieken, die hun oorsprong in andere toepassingen hebben. Een voorbeeld is de 2-opt heuristiek die nagaat of door uitwisseling van een deel van de routes van twee AGV's de aankomsttijd van beide verbeterd kan worden. Het ontworpen systeem bij ECT staat geen veranderingen toe in uitgegeven routes om de rekentijden van het systeem beperkt te houden.

3.4 Performance evaluatie

Het voorstellen van een nieuwe routeringsmethode en het invoeren van deze nieuwe methode zijn twee verschillende fases. Het invoeren van het nieuwe besturingsconcept houdt een aantal risico's in en is kostenintensief. Voordat tot invoering besloten wordt zal men dus inzicht willen hebben in de grootte van de verbetering en de assumpties die daaraan ten grondslag liggen. Een welbekend gereedschap uit de besliskunde, namelijk simulatie, kan deze beslissing ondersteunen. Bij simulatie wordt het toekomstige gedrag van het systeem nagebootst op de computer. Op deze manier hoopt men inzicht te krijgen in de performance van het systeem zonder dat het systeem daadwerkelijk moet worden geïmplementeerd en er een tijdlang wordt proefgedraaid.

Binnen ECT is er aanzienlijke ervaring met het gebruik van simulatie. Er waren al simulatiemodellen voor het statische AGV systeem ontwikkeld en ook waren er al op ruime

schaal data verzameld. Daardoor was al bekend dat allerlei taken (zoals het lossen van een container) met wisselende snelheid werden uitgevoerd, hetgeen de effectiviteit van het systeem kan beïnvloeden. Bij het schrijven van een simulatieprogramma voor het dynamische systeem is gebruik gemaakt van kennis opgedaan uit simulaties voor het statische systeem. De grootste vraag vooraf was of het dynamische besturingssysteem in beperkte tijd routes kan bepalen die de performance verbeteren in vergelijking met het veel eenvoudigere statische besturingssysteem.

Het nieuwe simulatieprogramma kan draaien op een PC en heeft redelijke rekentijden. Zowel laad- als losoperaties werden gesimuleerd. Daarnaast werden uitgebreide gevoeligheidsstudies gedaan om het effect van een andere terreinconfiguratie te bepalen en om te kijken welke factoren de behaalde prestatie het meest beïnvloeden.

In alle gevallen bleek de dynamische routing aanzienlijk beter te scoren dan de huidige routing, de performance gemeten als het aantal geladen containers per uur, was substantieel beter. Opvallend is dat de grootste verbetering wordt bereikt bij de moeilijkste operatie, het laden, waar een goede voorspelling van vertragingen belangrijker is vanwege de volgorde restricties. Het dynamische besturingssysteem stelt de gebruikers ook in staat een voorspelling te doen over de aankomsttijden van de AGV's en van eventuele vertragingen die onderweg zullen optreden.

Deadlocks kunnen worden vermeden in het dynamisch besturingssysteem, hoewel een AGV nog wel vertraagd kan worden door andere passerende AGV's. Bij uitval van een AGV zal het besturingssysteem gedurende lange tijd zones van het claimgebied blokkeren voor andere AGV's. De andere AGV's kunnen dus in principe doorrijden of worden omgeleid, en alleen volgorde restricties bij het laden kunnen het noodzakelijk maken om het systeem stil te leggen.

4. Theorie en praktijk in Mainport Rotterdam

4.1. De rol van de mathematische besliskunde in de praktijk

In deze sectie willen we kort de rol van de mathematische besliskunde bij het probleem uit de voorgaande sectie bespreken. Het probleem is zeer geschikt voor de besliskunde, omdat de beslissers een computer is. Mensen zijn vaak in staat allerlei aspecten, die moeilijk te modelleren zijn, toch mee te nemen. In het geval van een computer is de beschikbare informatie precies en eenduidig omschreven. Bovendien is een geformaliseerd beslissingsproces nodig, hetgeen door de besliskunde aangeleverd kan worden.

De uitdaging is echter dat het probleem, en dus het beslissingsproces, vrij complex is. Allereerst zijn er vele ontwerp-parameters die het probleem beïnvloeden, zoals het aantal AGV's, hun interactie, de fysieke mogelijkheden van elke AGV enz. Het aantal AGV's heeft bijvoorbeeld een grote invloed op de verkeersdruk, en daarmee op de performance van het besturingssysteem. Het aantal AGV's werd als een vast gegeven beschouwd in de ECT studie. Toch is het niet ondenkbaar dat de capaciteit van de terminal in relatie staat tot het aantal AGV's. Te weinig AGV's zullen de capaciteit van een terminal nadelig beïnvloeden, maar ook teveel AGV's kunnen een nadelige invloed hebben, onder andere

door een te grote verkeersdrukke.

Om de capaciteit van het terrein maximaal te gebruiken zullen de AGV's elkaar zo min mogelijk moeten hinderen. Vooral wanneer het aantal AGV's groter wordt is congestie steeds moeilijker te voorkomen. Door elke AGV zo kort mogelijk op het terrein te laten rijden (een kortste pad probleem!) wordt vertraging zoveel mogelijk beperkt. Oplosmethoden voor eenvoudige, bekende problemen uit de besliskunde kunnen zo helpen om een veel complexere toepassing aan te pakken.

Daarnaast is het van belang om de aankomsttijden bij de kranen zo goed mogelijk te voorspellen, en dus is het gewenst om goede schattingen te geven van de rijtijden en van de vertragingen. Het gebruik van simulatiemodellen om de performance van een systeem te testen, stelt de ontwerpers van de terminal in staat om alternatieve ontwerpen door te rekenen op capaciteit. Dat betekent dat de performance van alternatieven met bijvoorbeeld AGV's die twee containers kunnen vervoeren of een terrein met meer kadekranen kan worden bestudeerd zonder dat ze daadwerkelijk moeten worden gerealiseerd.

Door de gestructureerde routeringsaanpak heeft de besliskunde een duidelijke bijdrage aan dit operationele probleem geleverd. Niet alleen kon een nieuw routeringsconcept ontwikkeld worden, maar ook kon van te voren voorspeld worden hoeveel het zou uitmaken en welke factoren dat zou beïnvloeden. Het duidelijk dat het negeren van het aanstuur probleem van de AGV's leidt tot een duidelijk verlies aan effectiviteit van de nogal omvangrijke investeringen in het AGV systeem.

4.2. De rol van de praktijk in de mathematische besliskunde

De aansturing van AGV's bij ECT heeft een aantal interessante wetenschappelijke vragen opgeworpen waarvan de beantwoording verder onderzoek vereist.

De grootte van de AGV's bij ECT maken het onmogelijk om deze te modelleren als puntmassa's. Daardoor zijn wiskundige modellen bekend uit de literatuur niet toe te passen. Voor het ECT probleem is een oplossing gevonden door het terrein in zones op te delen, maar andere wiskundige modellen zijn zeker het bestuderen waard.

Dynamische besturingssystemen met meer dan 20 AGV's zijn nog niet eerder beschreven, ookal blijft het aantal AGV's in het ECT probleem beperkt in vergelijking met macro informatie in Vehicle Highway Systems. Dat dynamische besturingssystemen ook effectief kunnen werken voor meer AGV's is nu aangetoond in de studie bij ECT, en de vraag is hoe besturingssystemen zich in het algemeen gedragen voor grotere aantallen AGV's. In andere woorden, waar ligt de grens van wat de huidige besturingssystemen aankunnen? En wat is de relatie, indien deze bestaat, tussen de grootte en vorm van het terrein en de tijd nodig voor het bepalen van een route?

Tenslotte bestaan er meerdere versies van het kortste pad probleem in de ECT toepassing. Door de verkeersdrukke en vertraging op de route is het niet bekend hoe lang een AGV nodig heeft om van een punt op de route naar een ander te gaan. Stochastische netwerken kunnen deze onzekerheid modelleren en zijn reeds bestudeerd met eenvoudige wiskundige

modellen (zie o.a. Hassin en Zemel (1985), Steele (1981) en Frieze en Grimmett (1985)). De ECT toepassing laat zien dat meer geavanceerde modellen voor het bepalen van het kortste pad in een stochastisch netwerk nodig zijn. Ook oplosmethoden voor het bepalen van het kortste paden met tijdsvensters behoeven meer aandacht (zie voor een overzicht van bekende methoden Solomon en Desrosiers (1988)). Kortste paden met onzekerheid omtrent de exacte tijdsvensters zijn nog niet eerder bestudeerd.

5. Conclusies

In deze bijdrage hebben we de rol geschetst die de mathematische besliskunde kan spelen in Mainport Rotterdam. We beweren dat er vaak geen goede beslissing over investeringen in infrastructuur te nemen is zonder goed naar de latere bedrijfsvoering te kijken. Daarnaast geldt dat Rotterdam alleen een Mainport kan worden als de aanwezige infrastructuur zo goed mogelijk wordt ingezet. De mathematische besliskunde biedt mogelijkheden om deze aspecten objectief en gestructureerd te lijf te gaan. In het bijzonder hebben we deze mogelijkheden geïllustreerd met de ontwikkeling van een nieuw besturingsconcept van Automatische Geleide Voertuigen op een container terminal. Ook daar bleek een substantiële performance verbetering mogelijk.

Nawoord

De auteurs zijn ir. R. van der Ham van ECT dankbaar voor zijn inbreng in de vermelde studie.

Literatuur

Braam, E.G. (1994), "Optimalisatie van de waterfrontperformance van Shell Nederland Raffinaderij", afstudeerscriptie Bedrijfseconometrie, Erasmus Universiteit Rotterdam.

Bruin, J. de en Vlist, E. van der (1994), "Onderzoek naar routeringsmethoden voor AGV's op het Delta 2000-8 project van ECT", afstudeerscriptie Bedrijfseconometrie, Erasmus Universiteit Rotterdam (confidentieel).

Co, C.G. en Tanchoco, J.M.A., (1991), "A review of research on AGVS vehicle management", *Engineering Cost and Production Economics*, 21, p. 35-42.

Dekker, R., C.F.H. van Rijn en A.C.J.M. Smit, (1993), "Onderhouds optimalisatie modellen: nuttig voor de onderhouds manager?", *Doelmatige Bedrijfsvoering*, 1/2, p.4-7.

Evers, J.J.M., (1994), "DiTrans - toekomstgericht geautomatiseerd containertransport", TRAIL Studies nr. 94/4, TRAIL, Delft.

Frieze, A.M. en Grimmett, G.R. (1985), "The shortest path problem for graphs with random arc-length", *Discrete Applied Mathematics*, 10, p. 57-77.

Hassin, R. en Zemel, E. (1985), "On shortest paths in graphs with random weights", *Mathematics of OR*, 10, p. 557-564.

- Hee, K.M. van, (1983), "Verdelen van lusten en lasten in een pool van havenwerkers", in "Kwantitatieve methoden in het management", C.B. Tilanus, O.B. de Gans en J.K. Lenstra (ed)., Aula-paperback 69, Het Spectrum, Utrecht.
- Hee, K.M. van, Huitink, B. en Leegwater, D.K. (1988), "PORTPLAN, decision support system for port terminals", *European Journal Operational Research*, 34, p. 249-26.
- Hee, K.M. van, Wijbrands, R.J. (1988), "Decision support system for container terminal planning", *European Journal Operational Research*, 34, p. 262-272.
- Hohzaki, R. Fujii, S. en Sandoh, H., (1990), "A solution for the shortest time path problem with time-windows of arrival and departure time constraints", *Electronics and Communication in Japan, Part III, Fundamental Electronic Science*, 73, p.97-105.
- Khattak, A.J. en Koppelman, F.S., (1993), "Commuters' enroute diversion and return decisions: analysis and implications for Advanced Traveler Information Systems", *Transportation Research, A*, 27A, p. 101-111.
- Knoope, E.M. (1993), "Vaargeulbreedtes", afstudeerscriptie Bedrijfseconometrie, Erasmus Universiteit Rotterdam.
- Lokin, C., (1976), "Planningsmodel voor ladingbehandeling ten behoeve van het stuwa-doorsbedrijfs", afstudeerscriptie Bedrijfseconometrie, Erasmus Universiteit Rotterdam.
- Nieboer, R.A.J.J. en Dekker, R., (1995), "Brownian motion approximations for tankage assessment and stock control", *European Journal of Operational Research*, vol. 85, no. 1.
- Solomon, M.M. en Desrosiers, J. (1988), "Time window constrained Routing and Scheduling problems", *Transportation Science*, 22, p. 1-13.
- Steele, J.M. (1981), "Complete convergence of short paths and Karp's algorithm for the TSP", *Mathematics of Operations Research*, 6, p. 374-378.
- Vliet, A. van, Rinnooy Kan, A.H.G. en Boender, C.G.E., (1992), "Interactive optimization of bulk sugar deliveries", *Interfaces*, 22, p. 4-14.
- Vos, J.A.M. de (1975), "Een studie rond de problematiek van de steigerbezetting van de tankinstallaties van Paktank Nederland B.V.", afstudeerscriptie Bedrijfseconometrie, Erasmus Universiteit Rotterdam.
- Woudstra, H., (1992), "Optimalisatie van volle en lege containerstromen", afstudeerscriptie Bedrijfseconometrie, Erasmus Universiteit Rotterdam.
- Wilhelm, M.R. en Evans, G.W., (1987), "The state-of-the-art in AGV systems analysis and planning", *AGVS'87 seminar and exhibit, section 1-3*, p. 51-70.