

De bochtige weg van idee naar implementatie

J.M. Anthonisse
AKB, Rotterdam

J.K. Lenstra
M.W.P. Savelsbergh
*Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam
Erasmus Universiteit, Rotterdam*

1. INLEIDING

Bij het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI) te Amsterdam is van 1983 tot en met 1988 gewerkt aan CAR, een interactief systeem voor de routing van voertuigen. In dit artikel worden de opeenvolgende fasen van de ontwikkeling van CAR beschreven. Hierbij staat niet het systeem zelf centraal, maar is de aandacht gericht op de organisatorische aspecten van het project en op de invloed van de ontwikkelingen op het gebied van de informatietechnologie.

In §2 geven we een korte beschrijving van de probleemsituaties die men met CAR kan aanpakken en van de oplossingsstrategie die daarbij wordt gevolgd; voor gedetailleerde informatie verwijzen we naar de functionele beschrijving van CAR [Anthonisse, Lenstra & Savelsbergh, 1987] en naar het proefschrift van Savelsbergh [1988]. Bij de bespeking van de ontwikkeling van CAR onderscheiden we drie fasen: aanvraag en honorering (§3), uitvoering en implementatie (§4), en gebruik en licentie (§5). In §6 maken we enige slotopmerkingen.

2. CAR: COMPUTER AIDED ROUTING

2.1. Praktijk

Uitgangspunt voor de ontwikkeling van CAR was het standaard voertuigrouteringsprobleem, waarbij goederen vanuit een centraal depot bij klanten moeten worden bezorgd. Elke klant heeft een gegeven vraag. Het depot beschikt over een aantal voertuigen, elk met een gegeven capaciteit. Het probleem is routes voor de voertuigen te vinden zodat elke klant wordt bezocht, de totale vraag van de klanten in een route de capaciteit van het betreffende voertuig niet overschrijdt, en de totale rijtijd minimaal is.

Dit probleem vormt de basis van vele modellen die praktijksituaties in de

fysieke distributie beschrijven. In de praktijk komt men vaak allerlei aspecten tegen die niet in het basismodel zijn opgenomen. In CAR wordt rekening gehouden met

- tijdvensters, die de beschikbaarheid van klanten, voertuigen en het depot beschrijven;
- het combineren van het bezorgen en ophalen van goederen, waarbij alle te bezorgen goederen uit het depot afkomstig zijn en alle opgehaalde goederen naar het depot moeten worden gebracht;
- prioriteiten van klanten, die boetes voor het overslaan van klanten vastleggen.

2.2. Algoritmiek

Sinds het verschijnen van het artikel van Dantzig & Ramser [1959], die het standaard voertuigrouteringsprobleem voor het eerst formuleerden, en het artikel van Clarke & Wright [1964], die de eerste algoritme presenteerden, hebben beslistkundigen zich met dit probleem beziggehouden. Sommigen werden primair gemotiveerd door de intrigerende wiskundige aspecten van het probleem, anderen door het praktisch belang van het snel vinden van goede oplossingen.

Algoritmen voor het standaard voertuigrouteringsprobleem variëren van de eenvoudige benaderingsmethoden uit de zestiger jaren, die routes construeren met behulp van heuristische vuistregels, tot de geavanceerde optimaliseringsmethoden uit de late zeventiger jaren, die zijn gebaseerd op formuleringen in termen van geheeltallige of dynamische programmering. De verdienste van deze laatste methoden is niet dat ze in staat zijn problemen van een realistische omvang op te lossen, want dat is niet het geval, maar dat ze de grondslag vormen voor de beste benaderingsmethoden die momenteel beschikbaar zijn. Christofides [1985] geeft een overzicht van deze ontwikkelingen.

CAR volgt een oplossingsstrategie die is ontleend aan het geheeltallige programmeringsmodel van Fisher & Jaikumar [1978]. Zij stellen voor het model op te lossen met behulp van Benders-decompositie. In iedere iteratie worden eerst de klanten in voertuigen gegroepeerd door het oplossen van een gegeneraliseerd toewijzingsprobleem; vervolgens wordt voor ieder voertuig een route bepaald door het oplossen van een handelsreizigersprobleem. In een latere publikatie [Fisher & Jaikumar, 1981] beschrijven ze een twee-fasenmethode, die in essentie bestaat uit de eerste iteratie van de optimaliseringsprocedure en daarmee een typisch voorbeeld is van een *cluster first-route second* methode. We gaan hier niet op de technische details in.

2.3. Informatietechnologie

Simultaan met de hierboven aangestipte wiskundige ontwikkelingen hadden enige doorbraken op het gebied van de informatietechnologie plaats. We doelen hier op het beschikbaar komen van faciliteiten voor interactieve berekeningen en voor de rastergrafische presentatie van probleeminstanties en oplossingen. Hiermee werd de stap mogelijk van 'beslissende systemen' naar 'beslissingsondersteunende systemen'. In het eerste geval vormen model en algoritme de kern van het systeem, en de gevonden oplossing is weinig meer dan een rigide voorschrift. In het tweede geval staat de interactie tussen mens en machine

centraal. Modellen en algoritmen worden gebruikt voor het evalueren en genereren van oplossingen voor deelproblemen, het systeem als geheel biedt ondersteuning, en de planner behoudt het overzicht en daarmee de verantwoordelijkheid.

Een interactieve implementatie van planningsmethoden ontleent zijn bestaansrecht aan de observaties dat niet elke praktische beslissingssituatie volledig kan worden beschreven in termen van een wiskundig model en dat niet elk wiskundig model efficiënt is op te lossen. Doordat mens en machine in staat worden gesteld van elkaars sterke punten te profiteren, worden er sneller betere oplossingen bereikt voor een grotere variëteit van probleemttypen. Wij hebben elders uitgebreider verslag gedaan van de zegeningen van de interactie [Anthonisse, Lenstra & Savelsbergh, 1988] en volstaan hier met deze samenvatting.

3. 1981-1983: AANVRAAG EN HONORERING

In 1981 ontstond binnen de groep Combinatorische Optimalisering van de afdeling Mathematische Besliskunde en Systeemtheorie van het CWI de gedachte een project voor het ontwerpen en implementeren van een interactief routeplanningssysteem op te stellen en voor te dragen voor financiering door de Stichting voor de Technische Wetenschappen (STW). Het idee werd in eerste instantie geïnspireerd door een aantal interactieve systemen voor productie-, distributie- en transportplanning die toen in ontwikkeling waren bij het Georgia Institute of Technology in Atlanta, de Wharton School van de University of Pennsylvania in Philadelphia, en het Centre de recherche sur les transports van de Université de Montréal.

Ons voornemen werd ook gemotiveerd door de wens zowel de wetenschappelijke als de financiële basis van het CWI te verbreden. Het CWI heeft tot taak grensverleggend onderzoek te verrichten in de wiskunde, de informatica en de toepassingen daarvan, en onderzoek naar een praktisch bruikbaar planningssysteem dat recente vorderingen in de wiskunde en de informatietechnologie combineert mocht toen in Nederland grensverleggend worden genoemd. Tevens realiseerde de leiding van het CWI zich dat voor het entameren van nieuwe projecten een beroep op andere financieringsbronnen moest worden gedaan dan op de genereuze maar vrijwel constant blijvende subsidie van ZWO (thans NWO).

Eén van de eisen die STW stelt is de betrokkenheid van een industriële partner. Voor CAR werd dat Van Gend & Loos, in het bijzonder de afdeling O&O (later Logion B.V.) en de sector Hangend-Confectievervoer (later Fashion Transport Holland).

Ten tijde van het indienen van de aanvraag bij de STW, in mei 1982, hadden we een redelijk inzicht in de probleemsituatie bij Van Gend & Loos. We hadden vastomlijnde ideeën omtrent de algoritmische aanpak van het probleem; hierop komen we in §4.1 en §5.3 terug. We maakten ons geen zorgen over de beschikbaarheid van hard- en software voor interactieve berekeningen; ten onrechte, naar later bleek. Wel hadden we een duidelijk beeld van het uiteindelijke product voor ogen; het volgende citaat uit het projectvoorstel loopt vooruit op wat in hedendaags informaticaans een *toolbox* heet: *Our final aim is neither a*

single program for one specific firm nor a general purpose package for all possible practical demands, but rather a set of basic subroutines that can be tailored for many kinds of requests.

Vijf anonieme deskundigen gaven commentaar op de aanvraag. Dit commentaar was overwegend positief, hoewel opmerkingen als 'Valt hier nog wel onderzoek te doen?' en 'Hier in X doen we dit al' ook een geharde onderzoeker tot vertwijfeling kunnen brengen. Na beoordeling door een jurykamer werd de aanvraag in januari 1983 gehonoreerd. In juli 1983 ging het project van start met de aanstelling van de derde auteur van dit artikel als projectmedewerker.

De STW financierde het project tot 1986; in die periode werd de voortgang van het project bewaakt door een gebruikerscommissie, waarin naast de direct betrokkenen van CWI en Van Gend & Loos enkele Nederlandse hoogleraren zitting hadden. In 1986 werd de financiering overgenomen door de Stichting Mathematisch Centrum, waartoe het CWI behoort.

4. 1983-1987: UITVOERING EN IMPLEMENTATIE

4.1. Algoritmiek

Reeds in een vroeg stadium werd duidelijk dat tijdvensters en gecombineerd bestellen en afhalen een belangrijke rol speelden bij het hangend-confectievervoer van Van Gend & Loos. De handelsreizigersalgoritmen die we in de routeringsfase wilden gebruiken konden in principe eenvoudig worden aangepast aan deze extra eisen. Een principe is echter nog geen praktische mogelijkheid. Om aanvaardbare rekentijden te verkrijgen moesten speciale technieken worden ontwikkeld, die beschreven zijn door Savelsbergh [1986, 1989A] en wellicht de belangrijkste theoretische bijdrage van het project vormen. Routeringsproblemen met tijdvensters genieten overigens een toenemende belangstelling. Desrochers, Lenstra, Savelsbergh & Soumis [1988] geven een overzicht van het recente werk op dit terrein.

In een veel later stadium besloot Van Gend & Loos het hangend-confectievervoer te centraliseren. Daarmee werden wat betreft CAR vier één-depotproblemen met elk een vaste regio vervangen door een drie-depotprobleem zonder vaste regio's. Er moest nu een veel groter probleem worden opgelost, dat ook veel moeilijker was omdat de toewijzing van adressen aan depots niet vastlag. De algoritmiek van CAR is niet wezenlijk aan deze nieuwe situatie aangepast. Er werd een heuristische procedure ontwikkeld die het probleem terugbrengt tot een aantal problemen met elk één depot.

4.2. Informatietechnologie

Uit de opzet van het project vloeit voort dat wij de gegevensinvoer en de rapportgeneratie buiten CAR hebben gehouden. Daarmee werd de toepassing van CAR onafhankelijk van de administratieve organisatie bij de gebruiker.

De eerste technische beslissingen die genomen moesten worden betroffen de keuze van het besturingssysteem waaronder CAR zou werken, de programmeertaal waarin CAR geschreven zou worden, en het grafisch pakket dat zou worden gebruikt voor de implementatie van de gebruikersinterface.

Aangezien CAR ontwikkeld zou worden op de op het CWI aanwezige VAXen, die allen voorzien zijn van het UNIX besturingssysteem (BSD 4.3), was er voor de ontwikkelingsfase geen sprake van een keuze. Van het begin af aan is het de bedoeling geweest dat er, om ook het midden- en kleinbedrijf te bereiken, een PC-versie van CAR beschikbaar zou komen. Voor bedrijven was, en is, IBM de grootste leverancier van PC's, en dus werd er voor de PC-versie van CAR gekozen voor het MS-DOS besturingssysteem (versie 3.0).

De keuze van een programmeertaal volgde uit het gebruik van het UNIX besturingssysteem voor de ontwikkelomgeving. Bijna onverbrekelijk verbonden met UNIX is de programmeertaal C [Kernighan & Ritchie, 1973], waarin UNIX ook zelf geschreven is. Daarnaast staat C bekend om zijn overdraagbaarheid.

Impliciet geeft het feit dat wij een grafisch pakket zochten al aan dat wij ervoor gekozen hebben om niet zelf de grafische functies te ontwikkelen. Aangezien wij een overdraagbaar systeem wilden ontwikkelen werd gezocht naar een grafische standaard. In 1983 bleek er slechts één grafische standaard te zijn: het Graphical Kernel System (GKS) [Hopgood, Duce, Gallop & Sutcliffe, 1983]. Een bijkomend voordeel was dat de afdeling Interactieve Systemen van het CWI bezig was met de ontwikkeling van een C-implementatie van GKS. Hierdoor stonden een GKS-bibliotheek en een enorme hoeveelheid kennis over GKS tot onze beschikking.

Zowel de keuze van MS-DOS als de keuze voor GKS hebben een enorme invloed gehad op het verdere verloop van het project.

Drie belangrijke verschillen tussen UNIX en MS-DOS hebben tot problemen geleid. In de eerste plaats kent UNIX multi-tasking en MS-DOS niet. In de tweede plaats kan de hoeveelheid intern geheugen onder UNIX voor onze toepassing gezien worden als oneindig groot, terwijl onder MS-DOS slechts 640 Kb beschikbaar is. In de derde plaats is de woordlengte onder UNIX (op een VAX) 32 bits, terwijl de woordlengte onder MS-DOS (op een PC met een Intel 8086 of 80286 chip) slechts 16 bits is.

Routeringsproblemen hebben in de praktijk vaak een dynamisch karakter. Het komt regelmatig voor dat gedurende een planning nog nieuwe orders binnenkomen en het is prettig als een planningssysteem deze nieuwe orders meteen kan verwerken. In een multi-tasking omgeving is dat eenvoudig te realiseren, onder MS-DOS niet.

Als men de beschikking heeft over een oneindig groot intern geheugen kunnen alle onderlinge afstanden en rijtijden zonder probleem worden opgeslagen, waardoor deze snel toegankelijk zijn. Als er echter slechts 640 Kb intern geheugen is waarvan zo'n 440 Kb nodig is voor de opslag van het programma zelf, blijft er slechts ruimte over om problemen met niet meer dan 150 adressen te verwerken, wat praktisch gezien niet interessant is. Daardoor moeten afstanden en rijtijden worden opgeslagen op een harde schijf. Deze heeft genoeg capaciteit maar een trage toegangstijd. Door het gebruik van 'overlays' en een virtuele schijf worden deze problemen slechts ten dele weggenomen.

Het verschil in woordlengte leidt alleen tot wat extra werk. Bepaalde constanten moeten worden aangepast ($2^{32} - 1$ kan bijvoorbeeld niet meer worden gebruikt als representatie van ∞), en er moet een passend geheugenmodel

worden gezocht zodat adressering mogelijk blijft.

Toen de op de VAX ontwikkelde versie van CAR klaar was, moest er worden gezocht naar een implementatie van GKS voor PC's die geschikt was voor gebruik vanuit C-programma's. Dat was gemakkelijker gezegd dan gedaan. Er was in Nederland slechts één mogelijkheid - een Fortran-produkt van twijfelachtige kwaliteit, waarvan de fabrikant hier onvermeld blijft. Na veel herschrijven van de programmatuur ontstond er echter toch een bruikbare versie.

In de jaren tachtig zijn de technologische ontwikkelingen zo snel gegaan dat de grafische standaards op het moment dat zij beschikbaar komen al weer verouderd zijn. Dit geldt zeker voor GKS. Een van de belangrijkste tekortkomingen op dit moment is het gebrek aan blit-operaties. Blit-operaties, die stukjes scherm opslaan in het geheugen, zijn nodig voor de ontwikkeling van window-faciliteiten. Windows bieden een prettige manier om de beperkingen van de beeldschermgrootte te omzeilen.

4.3. *Praktijk*

Vaak mislukken automatiseringsprojecten door het gebrek aan steun vanuit het management of de planningsafdeling. Ondanks de vele personeelwisselingen bij Van Gend & Loos gedurende het project heeft het tijdens de ontwikkeling nooit aan enthousiasme bij een van de deelnemende groepen ontbroken. Alle betrokken partijen hebben met veel plezier veel tijd in het project gestoken.

Het werd al snel duidelijk dat de invoering van routeplanning met behulp van CAR een administratieve reorganisatie bij de depots zou vereisen. De belangrijkste reden hiervoor was de invoer van de gegevens. In de oorspronkelijke situatie werden gegevens uitsluitend achteraf, ten behoeve van de facturering, verwerkt. Om geautomatiseerd te kunnen plannen moet het grootste deel van de gegevens vooraf worden ingevoerd. Een bijkomend probleem was het feit dat facturering centraal op het hoofdkantoor plaatsheeft en dat planning decentraal op de depots geschiedt. Op de depots zijn dan ook geen typevaardige mensen in dienst. Door de inzet van de betrokkenen heeft dit echter niet tot onoverkomelijke problemen geleid.

Ondanks de gebruikersvriendelijkheid van CAR is een zekere opleiding in het gebruik ervan wenselijk. Aangezien ervaren planners schaars zijn binnen bedrijven is het geen eenvoudige zaak hen enkele dagen vrij te maken voor een cursus. Gelukkig is het mogelijk gebleken zowel in de ontwerpfase als in de implementatiefase een aantal bijeenkomsten te beleggen, die ook voor de ontwikkeling van CAR van grote waarde zijn geweest.

De zomer van 1987 werd een van de belangrijkste fasen in het project. De PC-versie van CAR was ver genoeg ontwikkeld om daadwerkelijk bij Fashion Transport Holland te worden geïnstalleerd. Daarnaast werd de geruchtenstroom over een op handen zijnde overname van Van Gend & Loos, met de daaruit voortvloeiende en niet te overziene gevolgen voor het project, steeds sterker. Uiteindelijk bleken beide gebeurtenissen vlak na elkaar plaats te hebben.

5. 1987-1989: GEBRUIK EN LICENTIE

5.1. *Praktijk*

Na de gebruikelijke aanloopproblemen hebben de routeplanners van Fashion Transport Holland enkele weken lang de dagelijkse planning met behulp van CAR verricht, misschien nog niet alle mogelijkheden benuttend maar toch tot tevredenheid van alle partijen. Deze eerste installatie van CAR was echter geen lang leven beschoren. Van Gend & Loos, en daarmee Logion en Fashion Transport Holland, werd overgenomen door Nedlloyd. Fashion Transport Holland kwam terecht bij een ander onderdeel van het Nedlloyd-concern, en voor het nieuwe management had de verbetering van de administratieve automatisering een hogere prioriteit dan de verbetering van de planning.

Zoals we al eerder opmerkten werd CAR niet uitsluitend voor deze ene toepassing ontwikkeld. Al spoedig na de start van het project toonden verscheidene bedrijven belangstelling voor CAR. Hieronder waren zowel mogelijke gebruikers als adviesbureaus. Omdat het CWI niet de geëigende instelling is om met een dergelijk produkt de markt op te gaan, werd besloten het pakket in licentie te geven. Na besprekingen met een aantal kandidaten werd uiteindelijk een licentieovereenkomst afgesloten met Logion B.V. te Culemborg. Logion zocht op zijn beurt contact met Neddata, de automatiseringsafdeling van de Nedlloyd. In deze constructie neemt Neddata het beheer van de programmatuur voor zijn rekening en verzorgt Logion de contacten met de klanten.

5.2. *Informatietechnologie*

Neddata heeft CAR uitgebreid tot CAR-PLUS. Het PLUS-gedeelte, dat de gegevensinvoer en de rapportgeneratie verzorgt, is gebaseerd op programmatuur die door Fashion Transport Holland was geschreven. Terwijl CAR een sterk modulaire opzet heeft en van geval tot geval aan de wensen van specifieke gebruikers zal moeten worden aangepast, is er bij het ontwerpen van PLUS naar gestreefd vooruit te lopen op de wensen van alle mogelijke gebruikers. In hoeverre deze combinatie levensvatbaar is zal de praktijk moeten leren.

In 1987 kondigde IBM aan dat de PC/AT niet langer leverbaar zou zijn en vervangen werd door het nieuwe Personal System 2 (PS/2). Nog vervelender was de mededeling dat de versie van GKS die in de PC-versie van CAR gebruikt werd, niet langer zou worden onderhouden en dat er geen driver voor de VGA-kaart van de PS/2 zou komen. Maar Logion kon moeilijk de markt op met een produkt dat alleen beschikbaar was op een niet leverbare computer. Opnieuw moest er gezocht worden naar een PC-versie van GKS en opnieuw moest een groot deel van de grafische functies worden aangepast.

5.3. *Algoritmie*

Het veelvuldig gebruik van CAR in deze periode heeft aangetoond dat de twee-fasenmethode van Fisher & Jaikumar slechtere ritten produceert naarmate de randvoorwaarden stringenter en talrijker zijn. De splitsing van het oplossingsproces in een clusteringsfase en een routeringsfase blijkt dan eerder een nadeel dan een voordeel. Dit inzicht heeft geleid tot de ontwikkeling van een

nieuwe routeringsalgoritme [Savelsbergh, 1989B], die minder gevoelig is voor extra voorwaarden. Deze methode is aan de bestaande verzameling algoritmische modulen toegevoegd.

De contacten tussen CWI en Logion hebben ook de behoefte aan planningssystemen voor het 'rechtstreeks-vervoerprobleem' aan het licht gebracht. Bij rechtstreeks vervoer heeft er geen overslag van goederen plaats; goederen die bij een klant worden opgehaald kunnen direct bij een andere klant worden afgeleverd. De wiskundige modellen die voor dergelijke problemen zijn opgesteld wijken sterk af van de modellen voor het standaard voertuigrouteringsprobleem en hebben tot nu toe binnen de besliskunde weinig aandacht gekregen. Kortom, dit gebied is wiskundig vrijwel onontgonnen en praktisch zeer relevant. Er is dan ook besloten een nieuw project te starten waarin algoritmen voor het *pickup and delivery problem* zullen worden ontworpen en geanalyseerd. De STW heeft inmiddels besloten het project te honoreren. Het zal opnieuw in samenwerking met Logion worden uitgevoerd.

Een niet minder belangrijke spin-off van het CAR-project is het onderzoek naar computerondersteuning bij het modelleren van praktische probleemsituaties en bij het kiezen en eventueel construeren van oplossingsmethoden. In een dergelijk *model and algorithm management system* wordt niet gemanipuleerd met probleeminstanties en numerieke oplossingen, maar met probleemttypen en algoritmen. Een aanzet tot het ontwerpen van zo'n systeem wordt gegeven door Desrochers, Lenstra & Savelsbergh [1989] en Desrochers, Jones, Lenstra, Savelsbergh & Stougie [1989].

6. SLOTOPMERKINGEN

Wij besluiten dit artikel met enige algemene observaties naar aanleiding van de ontwikkeling van CAR.

Het project heeft naar onze mening zowel wetenschappelijke als praktische waarde gehad. Wat betreft de mathematische besliskunde heeft het geleid tot nieuwe en efficiënte algoritmen voor routeringsproblemen met voorwaarden. Gedurende het project zijn onze inzichten in de functionele aspecten van de mens-machine interactie aanmerkelijk vergroot; dat een dergelijk inzicht slechts door ervaring kan worden verkregen lijkt in overeenstemming met het empirische karakter van het terrein van de informatiesystemen. Op het praktische vlak heeft het geleid tot programmatuur die ingezet kan worden in een veelheid van probleemsituaties.

CAR heeft ook een belangrijk uitstralend en stimulerend effect gehad. Het heeft de ontwikkeling van soortgelijke systemen gemotiveerd, zowel in de wetenschappelijke als in de commerciële wereld. Het heeft een voorbeeldfunctie vervuld binnen een nationaal NFI-project op het gebied van de beslissingsondersteunende systemen. Zoals al in §5.3 werd aangegeven heeft het geleid tot het formuleren en starten van twee vervolgprojecten. Een voor ons onverwacht aspect was de publicitaire waarde van het systeem; de belangstelling van buiten dreigde soms de voortgang van het project te belemmeren.

De opzet van CAR als *toolbox*, waarbij op grond van de eigenschappen van een probleemsituatie bepaalde functies worden gecombineerd tot een in die

situatie nuttig systeem, is nog niet tot zijn recht gekomen, omdat CAR-PLUS geleverd wordt als één product. Wel is duidelijk geworden dat onze keuze om het planningsgedeelte los te koppelen van de administratieve organisatie een goede is geweest.

De ontwikkeling van CAR is voor een belangrijk deel gestuurd door onvoorziene en onvoorzienbare gebeurtenissen van organisatorische en informatietechnologische aard. Om niet het gevaar te lopen te worden ingehaald door dergelijke ontwikkelingen moet een systeem dat tot doel heeft de operationele planning te ondersteunen eigenlijk binnen één jaar worden ontwikkeld en geïmplementeerd.

LITERATUUR

- J.M. ANTHONISSE, J.K. LENSTRA, M.W.P. SAVELSBERGH (1987). *Functionele beschrijving van CAR, een interactief systeem voor 'computer aided routing'*, Notitie OS-N8701, Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam.
- J.M. ANTHONISSE, J.K. LENSTRA, M.W.P. SAVELSBERGH (1988). Behind the screen: DSS from an OR point of view. *Decision Support Systems* 4, 413-419.
- N. CHRISTOFIDES (1985). The vehicle routing problem. E.L. LAWLER, J.K. LENSTRA, A.H.G. RINNOOY KAN, D.B. SHMOYS (red.) (1985). *The Traveling Salesman Problem: a Guided Tour of Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester, Ch. 12.
- G. CLARKE, J.W. WRIGHT (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Oper. Res.* 12, 568-581.
- G.B. DANTZIG, J.H. RAMSER (1959). The truck dispatching problem. *Management Sci.* 6, 80-91.
- M. DESROCHERS, C.V. JONES, J.K. LENSTRA, M.W.P. SAVELSBERGH, L. STOUGIE (1989). *A Model and Algorithm Management System for Vehicle Routing and Scheduling Problems*, Rapport BS-89xx, Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam.
- M. DESROCHERS, J.K. LENSTRA, M.W.P. SAVELSBERGH (1989). A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. Te verschijnen in *European J. Oper. Res.*
- M. DESROCHERS, J.K. LENSTRA, M.W.P. SAVELSBERGH, F. SOUMIS (1988). Vehicle routing with time windows: optimization and approximation. B.L. GOLDBEN, A.A. ASSAD (eds.) (1988). *Vehicle Routing: Methods and Studies*, North-Holland, Amsterdam, 65-84.
- M.L. FISHER, R. JAIKUMAR (1978). *A Decomposition Algorithm for Large-Scale Vehicle Routing*, Working paper 78-11-05, Department of Decision Sciences, University of Pennsylvania, Philadelphia.
- M.L. FISHER, R. JAIKUMAR (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks* 11, 109-124.
- F.R.A. HOPGOOD, D.A. DUCE, J.R. GALLOP, D.C. SUTCLIFFE (1983). *Introduction to the Graphical Kernel System (GKS)*, Academic Press, London.
- B.W. KERNIGHAN, D.M. RITCHIE (1973). *The C Programming Language*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- M.W.P. SAVELSBERGH (1986). Local search for routing problems with time windows. *Ann. Oper. Res.* 4, 285-305.

- M.W.P. SAVELSBERGH (1988). *Computer Aided Routing*, Proefschrift, Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam.
- M.W.P. SAVELSBERGH (1989A). An efficient implementation of local search algorithms for constrained routing problems. Te verschijnen in *European J. Oper. Res.*
- M.W.P. SAVELSBERGH (1989B). *A Parallel Insertion Heuristic for Vehicle Routing with Side Constraints*, Rapport BS-89xx, Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam.