

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„ Ein Literaturüberblick über verschiedene Methoden
der Tourenplanung “

Verfasser

Martin Štěpán

Angestrebter akademischer Grad

Magister der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften
(Mag. rer. soc. oec.)

Wien, im Juli 2010

Studienkennzahl:	A157
Studienrichtung:	Internationale Betriebswirtschaft
Betreuer:	O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Richard F. Hartl

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. EINLEITUNG.....	1
2. ALLGEMEIN	3
2.1 Unterscheidung nach Müllbereichen.....	3
2.2 Sammelmethoden und die Fahrzeugflotte.....	4
2.3 Vehicle Routing Problem.....	6
2.3.1 Periodisches VRP.....	7
2.3.2 VRP mit Zeitfenstern	9
2.3.3 VRP mit intermediate facilities (VRP-IF)	10
2.3.4 VRP mit mehreren Depots.....	11
2.4 Arc Routing Problem	12
3. VERWENDETE LÖSUNGSVERFAHREN BEI DER MÜLLABFUHR.....	14
3.1 Exakte Methoden	15
3.2 Heuristiken	16
3.2.1 Eröffnungsverfahren	17
3.2.2 Verbesserungsverfahren.....	18
3.3 Metaheuristiken.....	19
4. REALE TOURENPLANUNGSPROBLEME UND CASE STUDIES.....	20
4.1 Haushaltsmüllentsorgung.....	20
4.1.1 VRP mit Zeitfenstern	20
4.1.1.1 Reales Kapazitätsproblem mit Zeitfenstern in Castrovillari in Italien	21
4.1.1.2 Verbesserung der Fahrzeugauslastung mit fixen Zeitfenstern	24
4.1.1.3 VRPTW bei der Tourenplanung der Müllabfuhr	27
4.1.2 PVRP mit unterschiedlichen Fahrzeugmodellen	30
4.1.2.1 The Val Trompia case	33
4.1.2.2 The Antwerp case	35
4.1.3 VSP mit mehreren Recyclinganlagen in Porto Alegre.....	37
4.1.5 3-stufiges Sammelsystem in Hanoi.....	40
4.1.6 Mobile Depots.....	44

4.1.7	<i>Methodenvergleich der Müllabfuhr von separiertem Müll</i>	46
4.2	Betriebsmüllentsorgung.....	48
4.2.1	<i>Einsammlung und Abfuhr von medizinischem Abfall in Istanbul</i>	49
4.2.2	<i>Optimierung der Abfallwirtschaft in Ägypten</i>	54
4.3	Containermüllsammung	59
4.3.1	<i>Dynamic routing bei Containermüllentsorgung</i>	59
4.3.2	<i>Vehicle routing in the 1-skip collection problem</i>	63
4.3.3	<i>Locating landfills – Optimization vs. Reality</i>	66
4.3.4	<i>Abfallmanagement in Pakistan – ein Sonderfall</i>	67
5.	SCHLUSSWORT	70
	Literaturverzeichnis	72
	Anhang A: Abstract	76
	Anhang B: Lebenslauf	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleichstabelle (früher vs. neues Modell).....	39
Abbildung 2: Effekt der Mülltrennung auf die Gesamtkosten.....	47
Abbildung 3: Three-dimensional model	54

Abkürzungsverzeichnis

1-SCP	=	Skip Collection Problem
bzw.	=	beziehungsweise
ca.	=	circa
CARP	=	Capacitated Arc Routing Problem
CARP-MD	=	Capacitated Arc Routing Problem with Mobile Depots
COP	=	Change-over point
CVRP	=	Capacitated Vehicle Routing Problem
d.h.	=	das heißt
et al.	=	und andere
exkl.	=	exklusive
GPS	=	globales Positionsbestimmungssystem
GVNT	=	Guided Variable Neighborhood Thresholding
inkl.	=	inklusive
PPM	=	Altpapier, Plastik und Metall
PVRP	=	Periodic Vehicle Routing Problem
RRVRP	=	Rollon-Rolloff vehicle routing problem
SPVRPTW	=	Stochastic Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows
TS	=	Tabu-search
TSP	=	Traveling Salesman Problem
u. a.	=	unter anderem
usw.	=	und so weiter
VNS	=	Variable Neighborhood Search
VRP	=	Vehicle Routing Problem (Tourenplanungsproblem)
VRP-IF	=	Vehicle Routing Problem with Intermediate Facilities
VRPPD	=	Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery
VRPTW	=	Vehicle Routing Problem with Time Windows
VRPTW	=	Vehicle Routing Problem with Time Windows
VSP	=	Vehicle Scheduling Problem
zB.	=	zum Beispiel
MDVRP	=	Vehicle Routing Problems with multiple depots

1. EINLEITUNG

Die Müllsammlung, die Mülltrennung oder weitere Verwendung sowie alle damit verbundenen Transportbewegungen sind in der heutigen Zeit ein wesentliches soziales, wirtschaftliches und ökologisches Problem. Die Müllproduktion hat in allen industriellen Ländern eine ständig wachsende Tendenz und man kann behaupten, dass diese Problematik zukünftig noch mehr an Bedeutung bekommt.

Heute befinden wir uns in der Lage, dass die traditionelle Methode der Mülldeponie von unsortiertem Abfall nicht mehr tragbar ist. Und dies aus einem einfachen Grund, weil die heutigen Abfallmengen nicht mehr ein Platz in den klassischen Mülldeponien finden. Daher müssen wir uns die Frage stellen, welche andere Wege die Gesellschaft wählen kann und soll, damit wir nicht in der Zukunft in den Abfallbergen versinken. Mit diesen allen Fragestellungen ist auch die ganze Transportproblematik sehr eng verbunden. In der weiteren Folge werde ich mich ausschließlich mit der Transportproblematik beschäftigen, ich werde verschiedene Lösungsansätze vorstellen und vergleichen, sowie diverse real-world Probleme zusammenfassen.

Die heutige Situation mit der Abfallproduktion und der Entsorgung zwingt die Gesellschaft zum Nachdenken, wie man mit dem Müll am besten umgeht. Es ist zweifelsfrei, dass der Weg die Richtung Mülltrennung gehen muss, damit die Mengen von ungetrenntem Abfall verringert werden. Und vor allem kann man alle wertvollen Rohstoffe durch das Recycling wieder gewinnen. Der Weg der Wiederverwertung von diversen Materialien wie Glass, Papier, Plastik und Metall scheint die beste Möglichkeit der Müllentsorgung zu sein. Auf der anderen Seite entstehen die Mehrkosten bei der Trennung und primär bei der Müllabfuhr, denn jeder Stoff muss separat behandelt werden. Der sogenannte Restmüll wird dagegen in den Verbrennungsanlagen weiter behandelt. Einerseits um die großen Mengen zu reduzieren, andererseits um die Wärme oder den Strom zu erzeugen. Damit wird ein zusätzlicher Nutzen erreicht und gleichzeitig werden die Kosten der ganzen Abfalldisposition etwas gesenkt.

Mit dieser Überlegung der Müllentsorgung entstehen natürlich dann viele weitere Fragen, die man beim Erstellen eines funktionierenden Systems berücksichtigen muss. Wie bereits oben erwähnt, entstehen zusätzliche Kosten pro Haushalt für weitere

Mülltonnen alleine durch die Mülltrennung. Zweitens sollen weitere Räumlichkeiten gefunden werden, wo dieser separierte Müll zwischengelagert wird und vor allem die Müllabfuhr bestmöglich eingeplant werden muss. Im Vordergrund steht heute wie bei vielen anderen Wirtschaftszweigen der ökonomische Aspekt, der natürlich durch Unmengen an Restriktionen beschränkt wird. In einem größerem Gebiet oder einer Stadt wird man wohl bei der Standortplanung von Deponien, Zwischenlager für den getrennten Abfall oder Verbrennungsanlagen eingeschränkt sein. Wir nehmen diese Standorte als bereits angelegt und fix. Daher betrachten wir diese wichtigen Orte in unserem System als gegeben an und widmen uns einer anderen Fragestellung, nämlich der ganzen Transportdurchführung.

Das ist prinzipiell eine der wenigen Möglichkeiten, bei der sehr viel an finanziellen Mitteln einsparen kann. Immerhin müssen wir weiter unterscheiden, ob man in einem konkreten Problem, z.B. in einer Stadt, nur den nicht getrennten Müll hat oder ob es mehrere verschiedene Abfallarten gibt. In meisten Fällen, wie zum Beispiel in Österreich, ist die Abfalltrennung gesetzlich vorgeschrieben. Daher gehen wir davon aus, dass wir mindestens fünf Abfallkategorien haben, die man separat zu behandeln hat. Diese Annahme macht unser Sammelsystem noch komplizierter, denn die einzelnen Tätigkeiten müssen miteinander technisch, zeitlich und ökonomisch abgestimmt werden.

Zu den wichtigsten Kostenfaktoren bei der Müllabfuhr sind die eingesetzte Arbeitskraft und die verwendeten Fahrzeuge. Bei der Arbeitskraft geht es eigentlich in unserem Fall nur um die Anzahl der Mitarbeiter, denn die erforderliche Qualifikation ist oft dieselbe. Zu den Ausnahmen gehört hier beispielsweise der Wagenführer, der über einen entsprechenden Führerschein verfügen muss. Dagegen können die Sammelwagen sehr unterschiedlich sein.

Grundsätzlich unterscheiden wir eine homogene und heterogene Fahrzeugflotte.

2. ALLGEMEIN

2.1 Unterscheidung nach Müllbereichen¹

„Each area includes municipal solid waste and recycling material, and each is very different from the others.”²

Man kann die Müllabfuhrmethoden in drei große Untergruppen einteilen:

- ❖ Betriebsmüll
- ❖ Haushaltsmüll
- ❖ Roll-on-roll-off-Containerprobleme.

Bei allen drei Sammelmethoden handelt es sich um den Müll aller Arten, sowohl nichtgetrennte als auch separierte Müll. Bei der ersten Untergruppe werden hauptsächlich folgende Kunden und Container bedient. In erster Linie handelt es sich um die Abfallkörbe auf den Straßen in einer Stadt und auf den Promenaden, in den Restaurants, in kleineren Bürogebäuden oder ähnlichen Einrichtungen. In diesem Fall werden die Kunden mehrmals pro Woche oder auch täglich besucht. Die Kunden, wie z.B. die Firmen und die öffentliche Einrichtungen usw., werden meistens unterschiedliche Öffnungszeiten haben. Daher müssen wir bei der Tourenplanung oft mit den sogenannten Zeitfenstern rechnen.

Bei der Haushaltsmüllabfuhr werden vor allem private Häuser und Siedlungen bedient. Dabei sollen gewisse Vorschriften angehalten werden, wie die Hygiene und die wöchentliche Sammelfrequenz. Diese Bedürfnisse können in verschiedenen Gebieten oft sehr unterschiedlich werden. Die Müllabfuhr variiert meistens zwischen einem 14-tägigen Takt bis zu dreimal pro Woche.

Bei der roll-on-roll-off Methode handelt es sich eigentlich um die Bereitstellung und der Abfuhr von großen Containern. Das wichtigste Kriterium ist die Unterscheidung nach

¹ Vgl. Byung-In et al. (2006) S. 3625

² Byung-In et al. (2006) S. 3625

der Größe von Containern. Die meisten Behälter haben das Volumen von 15 bis zu 30 Kubikmetern. Diese Sammelmethode scheint die einfachste zu sein, aber die Tourenplanung kann oft sehr kompliziert sein. Es wird nach dem Lkw-Typ, der Abfallsorte und anderen Merkmalen unterschieden. Nachdem ein Lkw nur einen großen Container bedienen kann, können wir von einem Spezialfall der Pickup and Delivery Methode sprechen. Denn die Tour kann so aussehen, dass der Lkw vom Depot mit leerem Container wegfährt, bei dem Kunden diesen Behälter gegen einen vollen austauscht und weiter zur Sammelstelle oder Mülldeponie fährt. Nach dem Ausleeren fährt er zum nächsten Kunden und wiederholt dieselbe Tätigkeit noch einmal. Am Ende der Schicht fährt er ins Depot. Aber die Probleme treten auf, wenn es sich entweder um verschiedene Containergrößen handelt oder wenn es um verschiedene Abfallarten geht. In solchen Fällen haben wir sehr wenige Möglichkeiten die Problematik zu optimieren oder zu verbessern. Die unterschiedlichen Service-Zeitfenster können die Situation der Tourenplanung noch weiter erschweren³.

Wir werden uns meistens mit der kommerziellen Methode beschäftigen. Die anderen Problemstellungen werden nur marginal erwähnt.

2.2 Sammelmethoden und die Fahrzeugflotte

Die erst angeführte Methode wurde als traditionelle genannt. Sie war in der Vergangenheit üblich und wird in vielen Fällen bis heute angewendet: Ein Sammelwagen mit der drei-Mann Besatzung fährt vom Haus zu Haus. Zwei Männer entleeren die Mülltonnen oder werfen die Abfallsäcke in das Fahrzeug hinein.⁴

Diese Container werden dann mit Hilfe der Anlage am Sammelwagen entleert und wieder von Hand zum Straßenrand oder zum Haus zurückgebracht. Es herrscht weltweit häufig die Gewohnheit, wo nur die Abfallsäcke anstatt den Mülltonnen am Straßenrand an Sammeltagen abgestellt werden. Bei solcher Methode ist leider jene Automatisierung zwecklos und nur manuell möglich. Dieses System benötigt daher die meiste Arbeitskraft, weil jedes Fahrzeug mindestens 3-Mann Besatzung braucht.

³ Vgl. Byung-In et al. (2006) S. 3625

⁴ Angelelli E. and Speranza MG. (2002) S. 944

Das nächste System ist ein „side-loader system, requires citizens to throw their rubbish into big street container and, by means of a semi-automatic system operated by the driver from the cabin, lifts and empties the container into the truck body.“⁵

Der Wagen ist so gebaut, dass man nur einen Fahrzeuglenker braucht. Die Vorteile sind die kleinere Anzahl an Mitarbeiter und die Bequemlichkeit für den Wagenlenker. Als Nachteile können wir die hohen Anschaffungskosten von diesen speziellen halbautomatischen Fahrzeugen nennen und die Bedingung, dass die Container nur auf dem Straßenrand frei zugänglich stehen müssen.

Das dritte erwähnte System ist der sogenannte *side-loader system with demountable body*. Es ist sehr ähnlich der zweiten Methode. Der Wagen ist so konstruiert, dass man die ganzen Container behandeln kann. Diese Behälter werden erst auf der Deponie oder auf der Behandlungsstelle entleert. Diese Methode ist im Vergleich umständlicher und darüber hinaus kostenintensiver, weil die gesamte Ladekapazität noch kleiner ist.

Es ist schwer herauszufinden, welches System gewählt werden soll. Man muss eine große Menge an Entscheidungsvariablen berücksichtigen. Zu den wichtigsten Größen gehören die Investitions- und Operationskosten⁶.

Weiterhin wird nach der Heterogenität des verfügbaren Fuhrparks unterschieden. Die theoretischen Problemformulierungen sprechen oft von den homogenen Wägen. Bei solchen Überlegungen rechnet man damit, dass alle Fahrzeuge identisch sind. In der Praxis müssen die Unternehmer über verschiedene Sammelwägen für unterschiedliche Kundenbedürfnisse verfügen. Meistens wird nach den Kapazitäten, also nach der Nutzlast und dem Volumen, unterschieden. Gleichzeitig werden die Fahrzeuge auch so eingesetzt, damit auch die Betriebs- und Servicekosten minimal bleiben. Das Ziel von jedem derartigen Unternehmen ist eine optimale Fahrzeugflotte zu haben, damit für jede Route das bestmögliche Fahrzeug eingesetzt werden kann⁷.

⁵ Angelelli E. and Speranza MG. (2002) S. 945

⁶ Vgl. Angelelli E. and Speranza MG. (2002) S. 945

⁷ Vgl. Bankhofer et al. (2006), S. 7

2.3 Vehicle Routing Problem

“Sehr viel Mühe bei der Forschung hat sich auf die standardisierte Version des Problems konzentriert, als classical VRP genannt. Selbstverständlich kann man viele diese Algorithmen, meistens Heuristiken, auf viele verschiedene real-life Situationen adaptieren.”⁸

Das Vehicle Routing Problem (VRP) ist das Grundmodell der Tourenplanung in dem Fall der Müllabfuhr. Im Grunde ist das VRP eine Erweiterung von Traveling Salesman Problem (TSP). Bei TSP haben wir einen Handlungsreisenden, der alle Kunden in der kürzesten Zeit oder mit der kürzesten Strecke besuchen soll. Diese Methode ist leider schon aus dem Grund der Kapazitäten, Zeitrestriktionen und vielen anderen Beschränkungen für Zwecke der Tourenplanung der Müllabfuhr schwer anwendbar.

Daher werden wir uns in der weiteren Folge die einzelnen Varianten von VRP's näher ansehen. VRP ist definiert als ein unterrichteter Graph $G = (V, E)$ mit Knotenmenge $V = \{0, 1, \dots, n\}$. Die einzelnen Entfernungen zwischen den jeweiligen Knoten werden als Kantenmenge $E = \{(i, j) \mid i, j \in N, i < j\}$ genannt. Für unsere Zwecke können wir sagen, dass die Knoten die einzelnen Mülltonnen, die Container oder die Sammelplätze sind. Der Knoten 0 wird meistens als das Depot veranschaulicht. In diesem Punkt werden alle Touren starten und sollen auch dort enden, wenn es nicht anders vorgesehen ist. Um die Müllsammelarbeit effektiv durchführen zu können, braucht man eine gewisse Anzahl an Sammelwägen. Die Rede ist hier von homogenen Fahrzeugen. Alle Wägen sind von gleichem Typ bezüglich der Kapazität, dem Volumen und der technischen Ausstattung. Solche Sammelwägen haben die Aufgabe das vorgesehene Gebiet zu besuchen. Das heißt, dass jeder Besuchspunkt angefahren werden muss, um die bereitgestellten Mülltonnen zu entleeren⁹.

Das Hauptziel soll die Minimierung der gesamten Fahrtkosten sein. Als gegebene Restriktionen sind in diesem Fall die Dauer der Tageschicht und die Ladekapazität des Fahrzeuges. Zusätzlich muss fest definiert sein, dass jede Route im Depot beginnt und endet. Außerdem wird jeder Kunde nur von einem bestimmten Wagen besucht und das nur einmal.

⁸ Laporte Gilbert, (2007) S. 811

⁹ Vgl. Bankhofer et al. (2006), S. 4

Zu berücksichtigen ist auch die Anzahl von Fahrzeugen. Entweder ist die Anzahl an verfügbaren Sammelwägen gegeben oder man kann es auch als Entscheidungsvariable definieren¹⁰.

Diese allgemeine Formulierung von VRP wurde als ein Basismodel und ein Grundbaustein vorgestellt. In der Praxis werden Unmengen an Variationen von VRP verwendet, die durch Hinzufügen von diversen Attributen und Restriktionen gegeben sind. In der weiteren Folge werden verschieden Derivate von VRP vorgestellt. Vor allem solche, die in unserem Fall eine Bedeutung in der Müllentsorgung haben.

2.3.1 Periodisches VRP

„In the periodic vehicle routing problem (PVRP) a set of customers have to be visited, one or several times, on a given time horizon.“¹¹

Das Ziel von dieser Problemstellung ist die Minimierung der Gesamtlänge aller Routen von gegebenen Fahrzeugen während einem bestimmten Planungshorizont. Beim Lösen ist es notwendig den Besuchsplan für jeden Kunden unter Einhaltung von Zeitrestriktionen zu bestimmen. Die Periodizität stellt in diesem Fall eine zusätzliche Restriktion zu dem klassischen VPR dar. Sehr umfangreich beschäftigt sich mit PVRP Cordeau et al. (1997) in seinem Artikel.

Bei der Müllabfuhr scheint die Einplanung von einer optimalen Tour in vorgegebenem Gebiet als das wichtigste Problem zu sein. Wir müssen es aber periodisch betrachten, da sich die Sammeltätigkeit ständig wiederholt. Man geht davon aus, dass es in der Regel und auch in den meisten Fällen fünf Arbeitstage pro Woche zur Verfügung gibt. Speziell in unserem Fall der Müllabfuhr sprechen wir von einem längeren Planungshorizont. Meistens werden Halbjahres- oder Jahrespläne verlangt. Solche Fälle werden als PVRP modelliert. Die Periodizität kann sich entweder je nach Abfallart, Sammelgebiet oder auch Jahreszeit unterscheiden. Der separierte Müll wie Altpapier, Glass, Plastik, Biomüll oder Restmüll wird höchstwahrscheinlich nicht die gleiche Sammelfrequenz haben. Der Restmüll wird am häufigsten gesammelt. Je nach Gebiet oder Stadt variiert die Frequenz zwischen einmal, zweimal oder jeden Tag in der Woche, wobei Papier und ähnliche Arten eher einmal im Monat gesammelt werden. Die

¹⁰ Vgl. Bankhofer et al. (2006), S. 5

¹¹ Angelelli, Speranza (2002) S. 233

Unterscheidung nach Jahreszeit kann dort gegeben sein, wo ein starker Tourismusverkehr herrscht. Zum Beispiel an der Meeresküste ist die Sammelfrequenz im Sommer am größten, wobei in den Skigebieten wieder im Winter die Nachfrage an Müllabfuhr steigt.

„It is not easy to solve exactly such a problem of nontrivial size, not least because for a given choice of customer delivery-day combinations the p resulting VRPs are difficult to solve.“¹²

Daher ist es sehr brauchbar eine heuristische Methode zu adaptieren.

Mit der Problematik des PVRP beschäftigen sich sehr viele Autoren. An dieser Stelle muss man die bekanntesten vorstellen. Beltrami and Bodin (1974) haben zwei verschiedene Ansätze vorgestellt: Der erste, wo die Routen zuerst gebildet und erst dann zu den einzelnen Tagen der Woche zugeteilt werden. Die zweite Methode teilt zuerst zufällig die Kunden zu den Tagen und erst danach werden die Routen entwickelt.¹³

Etwas andere Methoden verwenden Russel and Igo (1979). Sie unterscheiden drei Heuristiken für dieses Problem¹⁴.

- ❖ Clusteralgorithmus – modelliert Clusters von Kunden, welche endgültig zu jedem Tag in der Planungsperiode zugeordnet sind
- ❖ Der zweite Algorithmus versucht die Routen von der ersten Methode mit Hilfe von MTOUR-Heuristik zu verbessern
- ❖ Eine Modifikation von Savings algorithm vom Clarke and Wright (1964) ist die dritte Methode

Einen metaheuristischen Ansatz, um ein PVRP zu modellieren, hat Hemmelmayr et al. (2009) vorgestellt. Sie haben zum ersten in diesem Zusammenhang Variable Neighborhood Search (VNS) angewendet. Sie haben diese Methode in einem PVRP erfolgreich implementiert und ebenfalls auf einer realen Problemstellung getestet. Die Resultate zeigen eindeutig, dass der entwickelte Algorithmus genauso leistungsstark wie viele andere Techniken ist und liefert sogar in einigen Fällen die besten Resultate.

¹² Christofides, Beasley (1984) S.237

¹³ Vgl. Christofides, Beasley (1984) S.241

¹⁴ Vgl. Christofides, Beasley (1984) S.241

2.3.2 VRP mit Zeitfenstern

Bei Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) handelt es sich um eine der wichtigsten Methoden in der Tourenplanung. Das System beinhaltet eine Fahrzeugflotte, welche von dem Depot heraus eine Anzahl von Kunden bedient, wobei unterschiedliche geographische Standorte mit verschiedenen Zeitfenstern und Spezifikationen zu berücksichtigen sind.¹⁵

Allgemein formuliert sind für die Zeitfenster gegebene Zeitintervalle und während dessen die Kunden besucht werden müssen oder auch dürfen. Jeder Stopp hat nämlich einen frühestmöglichen und einen spätmöglichen Startzeitpunkt. Dieser Stopp muss ebenfalls bis dem Zeitintervallende auch beendet werden. Das Problem kann so definiert sein, dass unsere Kunden gewisse Öffnungszeiten oder Wunschzeiten haben, in welchen es möglich ist sie zu bedienen. Im Zusammenhang mit diesen Wunschzeiten werden Arten von Zeitfenstern, „weich“ oder „hart“ unterscheiden. Bei den „harten“ Zeitfenstern ist es strikt angegeben, wann der gewünschte Service durchzuführen ist. Bei der Frühankunft muss der Sammelwagen bis zum Anfang von der reservierten Zeit warten, wobei Verspätungen gar nicht akzeptiert werden können. Einige Autoren nennen dieses Modell auch als „just in time“ Müllabfuhr. Dagegen ist die Durchführung bei den „weichen“ Abweichungen von den gewünschten Besuchsintervallen auch bei der Verspätung möglich. Sie ist aber kostenpflichtig. Als das einfachste und logische Zeitfenster kennen wir zusätzlich auch die gegebene Arbeitszeit von Personalbesatzung der Sammelfahrzeuge. Gleichzeitig haben diese Mitarbeiter Anspruch auf eine 30-minutige Mittagspause, die zum Beispiel in dem Zeitintervall von 11 bis 13 Uhr stattfinden kann. Eine weitere Beschränkung kann auch die erlaubte Fahrzeit von unseren Lenkern als eine Art von Zeitfenster sein. Laut Gesetz ist es nicht möglich, dass sie mehr als acht bzw. neun Stunden pro Arbeitsschicht unterwegs sind. Auch die einzelnen Stopps auf einer Tour, sowie das Depot haben eigene Zeitfenster.¹⁶

Das Problem VRPTW wird noch im Kapitel 5.1.1 detailliert beschrieben.

¹⁵ Tan et al. (2001) S.281

¹⁶ Vgl. Bankhofer et al. (2006) S. 6

2.3.3 VRP mit intermediate facilities (VRP-IF)

Die Sammelwägen fangen jeden Arbeitstag einheitlich an. Alle fahren aus dem Depot heraus und führen diverse, bereits eingeplante Touren durch. In der Regel erlaubt die Lkw-Kapazität nicht die ganze Tagedstour auf einmal zu absolvieren. Es werden während der Arbeitsschicht sogenannte multi-stops gemacht. „In the case of a collection problem, the intermediate facilities represent the sites where the vehicles are unloaded.“¹⁷

Danach wird die geplante Tour fortgesetzt. Man nennt die Fahrten zu und von diesen IF als *disposal trips*. Zunächst stellen diese IF die Zwischenlager, die Verbrennungsanlagen, die Recyclingeinrichtungen oder diverse Mülldeponien dar.¹⁸

Um die Touren richtig und durchführbar einzuplanen, wurden diverse Methoden entwickelt. Einer der einfachsten Methode ist die Einplanung ohne die nötigen Zwischenstopps und eine nachträgliche Eintragung von IF. Wir müssen aber gleich am Anfang solche Überlegung ausschließen, denn wenn man eine mögliche Tour ohne IF einplant, sieht es dann meistens nach dem Hinzufügen von diversen IF ganz anders aus. Die einzelnen Touren sind dann nicht mehr in der ursprünglichen Reihenfolge von Stopps zu realisieren. Dasselbe Problem betrifft die Einplanung von Mittagspausen in einzelnen Routen. Je mehr IF einzuplanen sind, desto komplexer wird das gesamte Modell sein. Sehr gut eignet sich für solche Aufgabenstellungen der bekannte Solomon's insertion algorithm¹⁹.

Angelelli and Speranza (2002) beschrieben die Anwendung von Tabu Search algorithm (TS) für die Lösung von PVRP-IF. Gemäß Cordeau et al. (1997) ist gerade der TS eine der besten Methoden für das Lösen von solchen Problemstellungen. Die Grundidee von dem TS-Algorithmus ist die iterative Bewegung von der aktuellen Lösung s zu einer anderen Lösung in der Nachbarschaft $N(s)$.²⁰

¹⁷ Angelelli, Speranza (2002) S 235

¹⁸Vgl. Byung-In et al. (2006) S. 3625

¹⁹Vgl. Byung-In et al. (2006) S. 3626

²⁰Vgl. Angelelli, Speranza (2002) S. 236

2.3.4 VRP mit mehreren Depots

Bei den einfacheren Modellen der Tourenplanung gehen wir davon aus, dass wir nur ein Depot zur Verfügung haben. Alle Fahrzeuge starten die Route jeden Tag im Depot und enden nach der Tageschicht wieder in diesem Depot. Es gibt aber Fälle, wo es aus verschiedenen Gründen vorteilhaft oder auch technisch nötig ist, mehrere Depots zu haben. Solche Situationen nennen wir als *Vehicle Routing Problems with multiple depots* (MDVRP). Erstens sind es solche Fälle, wo das Unternehmen ein sehr großes Tätigkeitsbereich hat. Vor allem kann es in einer großen Stadt vorkommen. Grundsätzlich ist jeder Sammelwagen dem jeweiligen Depot zugeordnet und kehrt wieder nach der Tour zu diesem zurück. Es gibt aber auch Beispiele, in denen es günstiger ist. Wenn die Route z.B. in einem Depot beginnt, in einem anderem aber endet. Es können solche Konstellationen vorkommen, in denen das Ende der optimalen Tour viel näher einem anderen Depot liegt. Oder auch dann, wenn es beispielsweise zeitlich oder technisch nicht mehr möglich ist in das Startdepot zurückzukehren²¹.

„Obviously, this type of problem is more challenging and sophisticated than the single-depot VRPs. Besides, the MDVRP is NP-hard, which means that an efficient algorithm for solving the problem to optimality is unavailable.“²²

Grundsätzlich ist das Lösen von solchen Problemen als exakte Algorithmen sehr zeitaufwändig. Die Autoren Ho et al. (2008) beschäftigen sich daher in ihrem Beitrag mit der Anwendung von heuristischer Methode, nämlich mit einem hybrid genetic algorithm (GA). Diese stochastische Technik wurde von John Holland in 1960 entwickelt. Die Grundidee ist “to maintain a population of candidate solutions that evolves under selective pressure.”²³

²¹ Vgl. Bankhofer et al. (2006) S. 6

²² Ho et al. (2008) S. 549

²³ Ho et al. (2008) S. 550

2.4 Arc Routing Problem

„Contrary to the well-known vehicle routing problem (VRP), in which client nodes in a network must be visited for pickup or delivery, the capacitated arc routing problem (CARP) consists of processing a subset of arcs.“²⁴

In den vorigen Kapiteln hat man gesehen, dass ein typisches VRP durch einzelne Knoten im Graph angegeben ist. Der Hauptunterschied zu dem VRP besteht darin, dass die Knoten in sogenannte Subsets hinzugefügt werden. Diese werden als Kanten genannt.

Solches Tourenplanungsproblem ist als ein ungerichteter Graph definiert, in welchem jede Kante die Transportkosten aufweist. Genau so wie beim VRP wird eine Fahrzeugflotte zur Verfügung gestellt. Diese Fahrzeuge werden typischerweise durch Kapazitäten definiert und im Depot-Knoten stationiert. Die Zielsetzung von CARP ist die Bildung einer adäquaten Menge an Fahrzeugrouten unter gleichzeitiger Anstrengung um die Gesamtkostenminimierung. Ebenfalls muss gelten, dass jede Tour im Depot startet und auch endet. Die Fahrzeugkapazität darf auch nicht überschritten werden.²⁵

Das Modell kann man als eine exakte Methode *branch-and-bound* von Hirabayashi et al. (1992) modellieren. Es kann leider in den meisten Fällen nicht angewendet werden, vor allem nicht wenn mehr als ca. 20 Entscheidungsvariablen vorkommen. Es handelt sich nämlich, ebenso wie beim VRP, um ein NP-hartes Problem. Daher greift man in der Regel zu einer Heuristik. Die gebräuchlichsten Eröffnungsverfahren in diesem Zusammenhang sind *Path-scanning* von Golden et al. (1983), sowie *augment-merge* von Golden, Wong (1981). Noch bessere Resultate sind dann mit Hilfe von Metaheuristiken zu erhalten. Als Beispiel kann man *variable neighborhood descent method* von Hertz und Mittaz (2001) nennen.

Für die Müllansammlung ist allerdings das klassische CARP mit ungerichtetem Graph und einer Periode nicht ausreichend, denn: „Der ungerichteter Graph kann nur beiderseitige Straßen modellieren, wobei beide Straßenseite parallel oder auch in nur einer Richtung bedient werden können.“²⁶

²⁴ Lacomme et al. (2005) S. 535

²⁵ Vgl. Lacomme et al. (2005) S. 535

²⁶ Lacomme et al. (2005) S. 536

Derartige bilaterale Betrachtung ist bei den schmalen Straßen geläufig. In den tatsächlichen Netzwerken treten die Straßen in beiden Richtungen mehrfach auf und daher ist jede Straßenseite voneinander unabhängig zu betrachten. Diese Fälle erfordern einen gemischten Graph zu konstruieren. Dieses Problem von gemischtem Graph beschreibt am besten Lacomme et al.(2004) in seinem Artikel.

Die zwei Problemstellungen, VRP und ARP, sind eigentlich sehr verwandte Modelle. Man kann das eine Problem relativ einfach in das andere Problem umwandeln. Umgekehrt ist es natürlich ebenfalls möglich. „In theory, any CARP instance with k required edges can be converted into an equivalent VRP with $3k+1$ nodes, as explained by Pearn et al.(1987).“²⁷

ARP findet gewiss auch bei der Müllentsorgung eine Anwendung. Nachdem der Abfall meistens in Containern aller Art und Größe angesammelt wird, ist es nicht mehr notwendig sie täglich zu entleeren. Daher ist es erforderlich die Sammelarbeiten multiperiodisch zu planen, d.h. in der Realität über mehrere Monate oder Jahre.²⁸

Die Müllabfuhr ist dafür lediglich ein Beispiel. Eine andere Anwendung von diesen Problemstellungen findet man auch bei der Routenplanung von Winterdienstfahrzeugen, Straßenaufräumung oder bei Wartung der Straßenbeleuchtung.

²⁷ Lacomme et al. (2005) S. 536

²⁸ Lacomme et al. (2005) S. 537

3. VERWENDETE LÖSUNGSVERFAHREN BEI DER MÜLLABFUHR

Eine gute Tourenplanung ist das wichtigste Element der ganzen Müllabfuhr-Problematik. Die Transportunternehmen, die sich mit Müllentsorgung beschäftigen, müssen wie jedes Unternehmen so gut wie möglich effizient wirtschaften, um erfolgreich zu sein. Es gibt eine Unmenge an Restriktionen, an die man sich halten muss. Vor allem sind es gesetzliche Vorschriften, die von der Regierung oder örtlichen Instanzen festgestellt sind. Andererseits sind es die Standortgegebenheiten, die man normalerweise auch nicht ändern kann. Man spricht von dem gegebenem Straßennetz, Verkehrs- und Hygienevorschriften, sowie von anderen typischen Standorten wie Depots, Umladeplätzen, Verbrennungsanlagen und Mülldeponien. Alle diese Tatsachen müssen wir als gegeben annehmen. Die einzige Möglichkeit, die etwas Spielraum für die Transportunternehmer bietet, ist die eigentliche Tourenplanung.

Dabei sollen die verfügbaren Fahrzeuge den jeweiligen Routen zugeordnet werden. Wie bereits schon oben erwähnt, gibt es sehr viele Varianten von VRPs. Das bringt eine Vielzahl an Restriktionen mit sich, die man bei der Routenplanung beachten muss. Die Verwendung von Lösungsverfahren des Operations Research können sehr viel an Transportkosten einsparen. Die Werte von 20 % Kostenersparnis sind keine Ausnahmen. In heutiger Zeit verfügen wir über moderne leistungsfähige Computer, welche Milliarden an Operationen pro Sekunde schaffen. Trotzdem sind wir nicht in der Lage einige Problemstellungen mit ca. mehr als 100 Standorten und zugehörigen Restriktionen exakt zu lösen. Eine optimale Lösung ist gefunden, wenn sie nicht mehr zu verbessern ist²⁹.

Ein VRP mit diversen Anpassungen ist die Grundlage bei den meisten Routingproblemen. Bei TSP rechnen wir mit $m = 1$, folglich mit einem Handlungsreisenden. Beide Problemstellungen stellen ein Non-deterministic Polynomial-time hard (NP-schweres) Problem dar. Bei den Problemen bezüglich Müllabfuhr kalkulieren wir dagegen meistens mit $m > 1$, wo die Variable „m“ die Anzahl an verfügbaren, homogenen Fahrzeugen darstellt. Alleine diese zusätzliche Variable erschwert die Optimierung so erheblich, dass wir die durchschnittlichen

²⁹ Vgl. Bankhofer et al. (2006) S. 3

Tourenplanungen nicht mehr exakt lösen können. Grundsätzlich werden wir die Lösungstechniken in drei große Untergruppen aufteilen. Die erste Gruppe sind sogenannte exakte Methoden, bei denen wir noch in akzeptabler Zeit eine optimale Lösung bekommen. Die zweite und gleichzeitig die größte Kategorie von Lösungsverfahren sind die Heuristiken. In diesem Bereich wurde zurzeit am meisten geforscht, denn diese Methoden sind die gebräuchlichsten. Grundsätzlich teilen wir die Heuristiken in zwei wichtige Untergruppen, die Eröffnungsverfahren und die Verbesserungsverfahren. Die dritte und modernste Gruppe sind die Metaheuristiken. Sie sind eigentlich noch weiterentwickelte heuristische Verbesserungsverfahren, die erst in den letzten Jahren entwickelt wurden und ständig an Bedeutung bekommen³⁰.

Nachdem es eine große Anzahl an Lösungsmethoden gibt, werden wir uns nur auf jene konzentrieren, die in der weiteren Folge für die Müllentsorgung relevant und brauchbar sind.

3.1 Exakte Methoden³¹

Exakt heißt in diesem Fall optimal. Andererseits bringt diese Optimierung nur eine reduzierte Anwendung mit sich, denn mit solchen Verfahren können wir eher kleinere und einfachere Problemstellungen lösen. Man kann zwar umfangreiche Probleme mit exakten Methoden formulieren, aber dennoch werden wir mit Hilfe der besten Computer sehr viel Zeit für das Lösen benötigen. Viel Zeit bedeutet in diesem Zusammenhang eine Rechenzeit von mehreren Stunden bis zu mehreren Tagen, Wochen oder einigen Jahren. In die erste Untergruppe gehört die vollständige Enumeration. Dieses Verfahren findet in der Praxis aber sehr wenig Anwendung. Die Grundidee besteht darin, alle möglichen Touren zu finden und anschließend die beste auszuwählen. Bei der Müllabfuhr ist solcher Ansatz schon bei sehr kleinen Problemen wegen dem Rechenaufwand nicht zulässig. Daher verwenden wir eher implizite Enumerationen. Bankhofer et al. (2006) teilt dieses Entscheidungsbaumverfahren in diese drei Untergruppen auf.

³⁰ Vgl. Laporte Gilbert, (2007) S 811ff

³¹ Vgl. Bankhofer et al. (2006) S. 13f

- ❖ Direkte Suchbaummethoden
 - Branch & Bound-Verfahren
 - Branch & Cut
- ❖ Ganzzahlige lineare Programmierung
 - Spaltengenerierung
 - Three-index vehicle flow formulation
- ❖ Dynamische Programmierung

3.2 Heuristiken

Diese Verfahren sind heute am häufigsten verwendet. Sie liefern zwar keine optimale Resultate, sind aber in der Regel nicht weit vom Optimum entfernt. Die Entschädigung für diese Ungenauigkeit ist die Möglichkeit sehr umfangreiche Probleme lösen zu können. Im Vergleich zu exakten Methoden sind die Heuristiken so konstruiert, dass man in der Lage ist auch Problemstellungen mit Hunderten oder Tausenden Knoten zu lösen.

„Another reason is the fact that heuristics tend to be considerably more flexible than exact algorithms and can be more readily adapted to deal with the diversity of variants arising in practice.“³²

Hingegen sollen die Rechenzeiten trotzdem akzeptabel bleiben. Grundsätzlich fangen wir mit einem Eröffnungsverfahren an und mit deren Hilfe wir eine zulässige Startlösung finden. Diese gefundene Lösung werden wir dann weiter mit einem Verbesserungsverfahren behandeln.

³² Laporte Gilbert, (2007) S. 812

3.2.1 Eröffnungsverfahren

Grundsätzlich unterscheiden wir einstufige und zweistufige Eröffnungsverfahren. Wir können das Problem nämlich von zwei verschiedenen Richtungen angehen. Entweder ordnen wir die Kunden zu einer Tour oder es wird eine Route für jede Tour errechnet. Daher sprechen wir von einstufigen Startverfahren, wenn beide Teilaufgaben gleichzeitig behandelt werden. Dagegen werden bei zweistufigen Eröffnungsverfahren diese Teilprobleme separat behandelt. Bei der einen Methode wird zuerst eine Gesamtroute mit allen Knoten aufgestellt „Route first“ und anschließend in kleinere zulässige Touren aufgeteilt „Cluster second“. Diese Verfahren werden hauptsächlich bei der kantenorientierten Tourenplanung angewendet. Die andere Möglichkeit ist, die Kunden zuerst zu gruppieren „Cluster first“ und erst dann die Routen von einzelnen Kundengruppen zu bilden „Route second“. Solche Methoden sind vor allem für knotenorientierten Aufgabenstellungen gut geeignet³³.

Folgende Vertreter sind die meist benutzte Heuristiken, die häufig in den Müllabfuhr-Tourenplanungen eingesetzt werden³⁴.

❖ Einstufig

- Savings-Algorithm
- Nearest Neighbor (Bester Nachfolger)
- Insertion-Algorithm

❖ Zweistufig

- Sweep-Algorithm
- Petal-Heuristic
- Fisher und Jaikumar Algorithmus

³³ Vgl. Bankhofer et al. (2006) S. 16

³⁴ Vgl. Laporte Gilbert, (2007) S 814f

3.2.2 Verbesserungsverfahren

Nach der ersten Phase erhalten wir mit einem Eröffnungsverfahren die Startlösung. Nun sollen wir dieses Resultat mit Hilfe von einem gewählten Verbesserungsverfahren noch weiter berechnen, um noch bessere Lösung zu erhalten. Weiterhin kann man zwei Unterscheidungsmerkmale vorstellen. Die Änderungen der Knotenreihenfolge innerhalb einer konkreten Tour nennen wir die Intratour-Verbesserungsmethode. Im Gegensatz dazu wird ein simultanes Austauschen von Knoten innerhalb von mehreren zulässigen Routen als Intertour-Verfahren bezeichnet³⁵.

Zu den gebräuchlichsten Techniken gehören³⁶:

❖ Intra-Tour

- 2-opt-Verfahren
- 3-opt-Verfahren
- r-opt-Verfahren

❖ Inter-Tour

- Crossover
- Customer Exchange
- Customer Relocation

³⁵ Vgl. Laporte Gilbert, (2007) S. 815

³⁶ Vgl. Bankhofer et al. (2006) S. 17

3.3 Metaheuristiken

Bei diesen Techniken handelt es sich um die jüngsten Methoden, die erst in den letzten 15 Jahren entwickelt wurden. Im Vergleich zu den klassischen Heuristiken arbeiten wir hier mit einem anderen Ansatz. Der wichtigste Punkt ist, dass man bei dieser Betrachtung vorübergehend Verschlechterungen erlaubt, damit man in weiterer Folge auf noch bessere Ergebnisse kommt. „A great variety of schemes have been put forward, but these can be broadly classified into three categories: (1) *local search*, (2) *population search*, and (3) *learning mechanisms*.“³⁷

³⁷ Laporte Gilbert, (2007) S. 815

4. REALE TOURENPLANUNGSPROBLEME UND CASE STUDIES

Die Müllentsorgung ist heute ein sehr wichtiges Thema und nimmt ständig an Bedeutung zu. Daher wird auch auf die Tourenplanung ein immer größerer Wert gelegt. Die Kunst besteht darin, nicht nur den bereitgestellten Müll zu sammeln, sondern auch das Geld, die Zeit und die Natur sparen zu können. Daher werden in den folgenden Abschnitten unterschiedliche Methoden und Probleme anhand von realen Beispielen dargestellt. Die verwendete Literatur und Fachartikel basieren alle auf den Alltagsproblemen aus verschiedensten Städten und Ländern der Welt. Das Ziel sollte sein, einen Überblick über die möglichen Sammelmethoden zu geben.

4.1 Haushaltsmüllentsorgung

Die Haushaltsmüllentsorgung wird als das umfangreichste Kapitel in dieser Diplomarbeit behandelt. Es erscheint logisch, dass man dem Haushaltsmüll die größte Aufmerksamkeit widmen muss. Denn mit der ständig wachsenden Lebensqualität steigt leider auch die Müllproduktion in jedem Haushalt. Die wachsende Weltbevölkerung macht das Problem noch bedeutungsvoller. In jedem Staat, Landesteil und Stadt werden immer öfter Möglichkeiten gesucht, wie man zusätzliche Geldmittel beschafft oder die Geldressourcen auch einspart. Und eine effektive Tourenplanung bei der Müllabfuhr kann eine gute Möglichkeit sein. Mit dem heutigen Wissen und Computertechnik sollte es viel einfacher als früher sein.

4.1.1 VRP mit Zeitfenstern

Die Müllabfuhr und die Entsorgung sind leider nicht leicht zu optimieren, da wir uns an sehr viele Restriktionen halten müssen. Ein großes Thema hierbei sind die verschiedenen Zeitrestriktionen, die man in der Fachliteratur unter dem Begriff Zeitfenster häufig findet. In erster Linie sind es verschiedene Vorschriften, welche die Besuchszeiten definieren. Zum Beispiel sind es die möglichen Ankunftszeiten bei den

Haushalten. Die Nachtruhe verbietet z.B. diese Tätigkeit in der Nacht von 21 Uhr bis 7 Uhr in der Früh auszuüben. Es gibt auch Siedlungen, in denen die Sammeltätigkeiten nur in gewissen Zeitfenstern (einige Stunden am Tag) durchzuführen sind. Und nicht zu vergessen eine andere große Gruppe von Müllproduzenten. Dazu zählen zahlreiche Unternehmen und öffentliche Einrichtungen, in welchen man sich hauptsächlich nach den Öffnungs- oder Wunschzeiten orientieren muss.

Auf der anderen Seite definieren einige Autoren die Arbeitspausen von Personal der Entsorgungsfirmen. Wie in jedem Beruf, hat ebenfalls das Bedienungspersonal vom Sammelwagen einen Anspruch auf die Erholungszeit, um sich ein bisschen erfrischen zu können. Es gibt natürlich kein einheitliches Schema wie man die Pausen festlegt. Byung-In et al. (2006) definiert die Mittagspausen für die Mitarbeiter als eine 30-minütige Pause, die im Zeitraum von 11:00 Uhr bis 13:00 Uhr stattfinden muss. Es treten dabei aber andere Einschränkungen auf. Diese Pause muss beispielsweise zwischen einzelnen Routen sein, d.h. die Arbeiter fahren die Route zu Ende und erst auf dem Weg zur Mülldeponie oder Verbrennungsanlage haben sie das Recht auf diese Mittagspause. Nun kann aber der Fall auftreten, dass man sich in dem gegebenen Zeitintervall irgendwo mitten in der Route befindet. In solchen Fällen suchen wir nach einem passenden Verfahren um es zu vermeiden und gleichzeitig nicht die Kosten zu erhöhen. Einige Methoden werden später vorgestellt werden³⁸.

4.1.1.1 Reales Kapazitätsproblem mit Zeitfenstern in Castrovillari in Italien

In Ghiani et al. (2005) wurde folgendes Problem behandelt: Die Gemeindeverwaltung hat sich entschieden, das alte Sammelsystem in dieser historischen Stadt zu ändern. Der Grund dafür ist natürlich die Kosten-einsparungsvision. Die Zielsetzung lautet:

- ❖ Eingeplante Routen sollen dem Optimum möglichst nahe liegen
- ❖ Die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge soll minimiert werden
- ❖ Jetzige Überstunden sollen auf Minimum reduziert werden
- ❖ In der Summe sollen die Gesamtkosten um mindestens 8% reduziert werden

³⁸ Vgl. Byung-In et al. (2006) S 3627ff

Zurzeit sind die einzelnen Routen manuell festgelegt, zu viele Überstunden werden ausbezahlt und das gesamte System läuft eher chaotisch ab³⁹.

Man kann mit neuer Routenplanung nicht sofort anfangen, denn diese Stadt schon im Mittelalter gegründet wurde und viele Straßen sehr eng und schwer zugänglich sind. Im ersten Schritt musste eine Distanzmatrix ermittelt werden. Leider konnte man das weltbekannte Geographic Information System (GIS) nicht anwenden, weil diese Stadt noch nicht erfasst wurde. Daher mussten die Projektmitglieder die erforderlichen Daten deterministisch ermitteln. Aufgrund der bekannten Straßenbreiten sind wir gezwungen diverse Fahrzeuge zu verwenden. Für die engsten Gassen sehr kleine Sammelwägen eingesetzt, welche leider ganz niedrige Kapazität aufweisen. Sonst werden noch zwei andere Fahrzeugtypen verwendet. Folgende Angaben sind bekannt und einzuhalten:

- ❖ ARP mit Kapazitätsrestriktionen, Zeitfenstern und 2 Containerarten
- ❖ 3 verschiedene Fahrzeuge (10, 14 und 21 m³)
- ❖ 2 verschiedene Container (1,1 bzw. 1,7 m³)
- ❖ Zeitlicher Sammelplan lautet täglich, Montag bis Samstag
- ❖ Klassische 3-Mann Fahrzeugbesetzung, 1 Lenker und 2 Hilfsarbeiter
- ❖ Tagesschicht regelmäßig von 5:00 Uhr bis 11:00 Uhr mittags
- ❖ 3 Straßenkategorien mit unterschiedlichen Zeitfenstern für die Müllabfuhr, 1 Straßenklasse ist bis 6:00 Uhr, die zweite bis 7:00 Uhr und die restlichen Gassen bis 11:00 Uhr zu bedienen.

Ghiani et al. (2005) haben eine eigene Heuristik entwickelt, die nach dem cluster-first route-second Ansatz aufgebaut ist. Es wurde in diesem Fall wieder die oben beschriebene Clustering-Methode angewendet. Man kann mehrere Möglichkeiten unterscheiden. Zu einigen Straßen können nur bestimmte Fahrzeuge zugeordnet werden. Dasselbe passiert auch mit den Containern, da nicht alle Container für alle Sammelwägen kompatibel sind⁴⁰.

³⁹ Vgl. Ghiani et al. (2005) S. 135f

⁴⁰ Vgl. Ghiani et al. (2005) S. 139

Im Endergebnis, bezogen auf unsere Sammelwägen, kommt man zu folgenden Zahlen.

- ❖ Die tägliche Kilometeranzahl sinkt im Durchschnitt um 18 km, das sind 10,6% weniger und in Geldeinheiten ausgedrückt sind es € 7.000,- pro Jahr
- ❖ Die reguläre Arbeitszeit ist um 13,5% gesunken
- ❖ Zusätzlich sinken die Überstundenzahlungen im Wert von € 5.000,- jährlich
- ❖ Grundsätzlich hat man bessere Arbeitsverteilung zwischen den Fahrzeugen

In der Summe beträgt die Gesamtkostenersparnis lediglich 7,8% und liegt ein wenig unter den gewünschten 8%. Ghiani et al. (2005) sind überzeugt, dass die Anwendung dieser Konstruktivheuristik einige Millionen Euro nur in Italien ausmachen kann. Des Weiteren behaupten die Verfasser, dass man diese Heuristik noch verbessern könnte, in dem man eine Metaheuristik im Sinne von Hertz et al. (2002) und Lacomme et al. (2001) anwenden würde⁴¹.

Wie man an den vorgestellten Studien erkennen kann, gibt es in vielen Fällen enormen Spielraum, um die Tourenplanung der Müllabfuhr anders zu modellieren und folglich verhältnismäßig viel Geld sparen zu können.

⁴¹ Vgl. Ghiani et al. (2005) S. 143

4.1.1.2 Verbesserung der Fahrzeugauslastung mit fixen Zeitfenstern

Eine weitere Form von Zeitfenstern illustriert der Fall „Garbage Collection in Chicago“ von Eisenstein und Annanth (1997). Aufgrund von Einsparungsmaßnahmen sollte ein *Dynamic Scheduling* Modell entwickelt werden, um die Fahrzeugauslastung zu erhöhen und damit die Kosten der Müllabfuhr zu reduzieren. In der Stadt Chicago sind es 330 Fahrzeuge zur Verfügung. Im laufenden Modell sieht die Tagesschicht so aus, dass jede Wagenbesatzung in der Früh eine 2,5 Stunden lange Sammelfahrt absolviert und dann zur Deponie fährt. Nach dem Auslehren wird eine zweite Fahrt unternommen, die wiederum 2,5 Stunden dauert. Die Deponie wird zum zweiten Mal angefahren und die Fahrzeuge kehren zurück ins Startdepot. Derartige Regelung sollte gewährleisten, dass man die Fahrzeugkapazität nicht übersteigt. In diesem Fall haben wir das Kapazitätslimit zwar effizient und problemlos eingehalten. Dennoch wird hier deutlich sichtbar, dass die Fahrzeugauslastung mangelhaft ist. Um eine Verbesserung des aktuellen Standes zu erzielen, wird im Folgenden ein *dynamic scheduling* Algorithmus vorgestellt⁴².

Die Stadt Chicago ist in 50 einzelne Kleingebiete aufgeteilt. Für unsere Modellierung werden 5 benachbarte Stadtgebiete genommen und dann eine Datensammlung durchgeführt. In erster Linie wird ein Interview mit dem Verkehrsplaner gemacht, um die Informationen über Straßennetze und über die eingesetzten Sammelwagen in einem Zeitraum von sechs Wochen zu erhalten. Die Tourenplanung erschwert noch eine zusätzliche Feststellung, denn das Abfallvolumen variiert gebietsweise ganz erheblich. Der Grund dafür ist eine unregelmäßige Aufteilung der Haushalte. Das führt zu unregelmäßiger Auslastung der Fahrzeuge und folglich müsste man die Touren jeden Tag neu planen. Jedes Fahrzeug hat eine klassische 3-Mann Besatzung, einen Lenker und zwei Mitarbeiter hinter dem Wagen um ganzen Müll von der Straße in den Wagen zu werfen. Die tägliche Einsammlung beginnt um 8:00 Uhr in der Früh und dauert bis 10:30 Uhr. Nach diesem Zeitraum fährt der Wagen zur Deponie um den Inhalt auszuleeren. Diese Fahrt inklusive der Servicezeit in der Mülldeponie dauert ca. eine Stunde. Danach machen die Männer eine Mittagspause und beginnen um 12:00 Uhr mit der zweiten Tour. Diese dauert wieder ungefähr 2,5 Stunden um weitere Straßen

⁴² Vgl. Eisenstein, Annanth (1997) S 922

durchzufahren. Es handelt sich in diesem System auch um eine Art der Zeitfenster. Nachdem es keine Zwischenlagermöglichkeit gibt, muss der Sammelwagen noch einmal die Deponie anfahren, ausleeren und leer ins Depot zurückfahren. Wenn wir es zusammenfassen, verbringt das Fahrzeug zwei von sieben Stunden Arbeitszeit auf der Strecke zur Deponie. Hier werden die Daten über alle Fahrzeuge gesammelt. Man kann beobachten, dass die Ladung im Schnitt etwa die Hälfte der Gesamtkapazität darstellt. Genauer gesagt, sammelt der Wagen pro Tag, also in zwei Touren, etwas mehr als eine Vollladung. Genau betrachtet sind es nur 52 % Kapazitätsauslastung. Es ist in diesem Fall eine sehr gute Herausforderung das verwendete System zu ändern⁴³.

Die gesamte Arbeitswoche schaut dann so aus, dass der Sammelwagen am nächsten Tag wieder dort startet, wo es am vorigen Tag aufgehört hat und wieder zwei identische Routen pro Tag fährt. Es ist in dieser Stadt Chicago etwas einfacher, denn das rechteckige Straßennetz ermöglicht es problemlos. Wenn man aber die ganze Woche analysiert, ist die Kapazitätsauslastung sehr schlecht, denn an jedem Freitag sind die Sammelwagen nicht einmal zur Hälfte ausgelastet. Offensichtlich würde es sinnvoll sein, diese Zeitintervalle etwas anders festzulegen.

Eisenstein und Iyer (1997) haben gemäß Beobachtungen ein Modell entwickelt, welches die Tourenplanung in „1-dump route“ und „2-dump route“ Modelle einteilt. Es handelt sich um ein flexibles Routenmodell. Die Idee besteht darin, dass man Sammelstraßen mit relativ wenig Müllvolumen in solche Touren einplant, die nur einmal und am Schichtende zur Deponie führt. Laut gesammelten Daten gibt es sehr viele solche Straßen, denn die durchschnittliche Auslastung beträgt nur 52 %. Daraus ergeben sich gleichzeitig mehrere Vorteile. Man bekommt eine Stunde zusätzlich für die Sammelarbeit, die folglich eine Zeitausnutzung um 20 % effektiver macht. Weiter spart man langfristig die Personalkosten ein, denn während der ersten Deponiefahrt waren die zwei Hilfsarbeiter sozusagen umsonst bezahlt. Auf der anderen Seite bleiben die Straßen mit mehr Abfall für die „2-dump route“ übrig und zeitgleich steigt damit die gesamte Wagenauslastung⁴⁴.

Zur Modellierung von diesem Problem wurde „*Markov Decision Process*“ verwendet. Es wurde dazu ein *dynamic scheduling* Algorithmus entwickelt, welcher die Zuteilung zu 1-dump oder 2-dump Route durchführt. Dabei wurden noch weitere Restriktionen

⁴³ Vgl. Eisenstein, Annanth (1997) S 923f

⁴⁴ Vgl. Eisenstein, Annanth (1997) S 926f

wie aktueller Wochentag oder die Startposition berücksichtigt, um den Servicegrad zu maximieren. Man hat errechnet, dass es möglich wäre im Vergleich zu altem Modell die Routenanzahl um 12% reduzieren zu können. Daraus resultiert eine Kapazitätseinsparung von 16%. Wir können das Resultat auch in absoluten Zahlen darstellen. Die Fahrzeug- und Personalkosten pro Jahr sind in Chicago auf \$ 40.000,- bzw. \$ 150.000,- pro Wagenmannschaft gesetzt. Für unsere fünf beobachteten Stadtbezirke macht es eine Jahresersparnis von \$ 190.000,-. Demzufolge ergibt sich eine Kostenreduktion von 13%. Umgerechnet auf alle 50 Stadtbezirke in Chicago, bedeutet die Kostenersparnis \$ 9,1 Mio. pro Jahr von den kapazitätsabhängigen Kosten⁴⁵.

⁴⁵ Vgl. Eisenstein, Annanth (1997) S 930f

4.1.1.3 VRPTW bei der Tourenplanung der Müllabfuhr

In dieser Studie beschäftigen sich die Autoren Nuortio et al. (2006) mit der Müllabfuhr-Routenplanung in zwei unabhängigen Gebieten im Osten Finnlands. Dieser reale Fall ist wie folgt beschrieben: „Der Müll ist in Container entlang den Straßen abgestellt. Diese werden dann mit Hilfe von Sammelwägen angesammelt, wobei die Ladekapazität nicht überschritten werden darf.“⁴⁶

Die Studie zielt auf die sowohl dünnen als auch dicht besiedelten Regionen. Es handelt sich in der Summe um rund 30.000 Müllcontainer. In den meisten Fällen wird eine Mülltrennung betrieben. Daher verfügt man auch über verschiedene Mülltonnen, welche natürlich auch separat behandelt werden müssen. Man hat folgende Angaben und Richtlinien, die befolgt werden müssen:

- ❖ Für die Tourenplanung sind nur Arbeitstage zulässig, Samstag und Sonntage sind in der Regel für diese Tätigkeiten verboten
- ❖ Fahrzeuge starten jeden Tag vom Depot und nach der Schicht müssen wieder alle entleert im Depot ankommen
- ❖ Wenn die Ladung weniger als 50% der Kapazität beträgt, müssen die Fahrzeuge nicht zur Deponie fahren sondern können direkt mit dieser Ladung ins Depot zurückkehren und am nächsten Arbeitstag die Sammelarbeit fortsetzen
- ❖ Überstunden werden in der Regel ausbezahlt
- ❖ 8 Stunden Arbeitszeit, geteilt in zwei Hälften für die Mittagspause
- ❖ Zusätzlich sind zweimal 15 min für Kaffeepausen gestattet
- ❖ Zur Verfügung steht bestimmte Anzahl an identischen Sammelwägen, jeweils mit Kapazität von 26 Tonnen
- ❖ Wie üblich ist jede Route nur von einem Wagen zu bedienen

Die Problemstellung ist als ein VRP mit Zeitfenstern definiert, obwohl die Durchführungszeiten von 6:00 Uhr bis 19:00 Uhr kein großes Hindernis darstellen. Die Abfallmengen sind in diesem Fall nicht eindeutig feststellbar, denn es hängt davon ab, wie viele Menschen eine Mülltonne verwenden, vom Lebensstyl der Leute oder auch von der Jahreszeit. Daher werden die Daten stochastisch festgestellt und als Grundlage

⁴⁶ Nuortio et al. (2006) S. 223

dafür wurden die Daten der Vergangenheit angewendet. Wie man solche Informationen behandeln kann, empfehlen die Autoren die Methoden von Nuortio et al. (2004).

„Die Dauer der Entladung von einem Sammelfahrzeug auf der Mülldeponie, sowie die Servicezeit von jeder Mülltonne, wurde mit Hilfe von historischen Daten festgestellt. Diese Daten erlauben die Ermittlung von Zeiten zwischen den einzelnen *collection points*.“⁴⁷

Man kann den oben beschriebenen Fall als Stochastic Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows (SPVRPTW) bezeichnen. Nachdem solche Problemstellungen nicht mehr mit exakten Methoden lösbar sind, wird eine Guided Variable Neighborhood Thresholding (GVNT) Heuristik angewendet. Diese wurde für diesen Fall von Kytöjoki et al. (2004) entwickelt. Die erworbenen Lösungen werden dann mit den aktuellen Methoden verglichen, um wichtige Entscheidungen von Abfallmanagement treffen zu können⁴⁸.

Beim Modellieren gehen wir in bestimmten Schritten fort. Erstens wird mit einem Routingalgorithmus gestartet. In der zweiten Phase beschäftigen sich die Autoren dann mit der Schedulingmethode im Detail. Die Routingformulierung besteht wiederum aus zwei Teilaufgaben. Beginnend mit einer Startlösung, für die eine hybrid insertion heuristic verwendet wird. Es werden die Müllcontainer einer Route zugeordnet. Diese Methode wird so lange wiederholt bis keine Mülltonnen übrig bleiben. Danach folgt ein Verbesserungsverfahren, nämlich die oben erwähnte GVNT. Die Zeitplanmethode fängt mit der Aufteilung der Container in 2 Gruppen je nach dem Serviceintervall an. Manche müssen einmal in der Woche ausgeleert werden, wobei die anderen einmal in zwei Wochen⁴⁹.

Die entwickelten Methoden wurden mit Hilfe von C++ implementiert und gelöst. Unser Untersuchungsgebiet ist durch folgende Daten gekennzeichnet:

- ❖ Die Stadt Kuopio und Umgebung hat 180.000 Einwohner
- ❖ Es sind mehr als 150 Sammelrouten durchzufahren
- ❖ Für bessere Veranschaulichung der Lösungsmethoden wurde die Region in 2 separate Teile aufgeteilt.

⁴⁷ Nuortio et al. (2006) S. 224

⁴⁸ Vgl. Nuortio et al. (2006) S. 224f

⁴⁹ Vgl. Nuortio et al. (2006) S. 228

Erste Gruppe besteht aus 3 Siedlungsgebieten, wo die Einwohnerdichte eher niedrig ist. Die Sammelfrequenz wurde in diesem Fall auf 4 Wochen gesetzt. Der Restmüll wird zu einer Transferstation gebracht. Diese ist auch als ein Depot für die Sammelfahrzeuge definiert. Erst in dieser Station wird die Mülltrennung durchgeführt und erst die separierten Rohstoffe werden zu weiterer Verarbeitung weitergeleitet.

Die zweite Gruppe besteht aus der dicht besiedelten Region von Kuopio. Daher sind die Abfallcontainer sehr viel und schnell aufgefüllt und man muss mit kürzeren Servicezeiten arbeiten. Der gesammelte Abfall wird zur Gänze in 16 km weit entfernte Entsorgung-Stelle abgeführt⁵⁰.

Die Ergebnisse des Modellierens liefern signifikante Ersparnisse. Bei der Routensimulation hat man Ersparnisse in Kilometern zwischen 0 und 70 km pro Sammelfahrt erreicht. Im Durchschnitt ist jede Strecke um 16 km kürzer als die früher manuell erstellten Sammel Touren. Die Gesamtverbesserung im Sinne der Streckenlänge beträgt 12%. Dagegen sind in der Region von Kuopio die Ersparnisse viel markanter und die durchschnittliche Sammelroute ist um 46% gesunken. „The experimental results demonstrate that significant savings compared to the current practice can be obtained in both studied levels of optimization.“⁵¹

⁵⁰ Vgl. Nuortio et al. (2006) S. 230

⁵¹ Nuortio et al. (2006) S. 231

4.1.2 PVRP mit unterschiedlichen Fahrzeugmodellen

Ein gutes Abfallsammelsystem ist überhaupt nicht einfach zu entwickeln. Bevor man mit Tourenplanungsproblemen beginnt, muss man sehr wichtige Entscheidungen treffen. Grundsätzlich werden in jedem Land, Gebiet oder Stadt etwas andere Vorschriften und Gegebenheiten gelten. Folgende Entscheidungen sollen getroffen werden:

- ❖ Mülltrennung oder Nichttrennung
- ❖ Verbrennungsanlage, Mülldeponie, Recyclinganlage, Zwischenlager
- ❖ Sammelfrequenz pro Zeitperiode
- ❖ Wagenkapazität und Ausführung

Es ist daher wichtig diese Fragen am Anfang von jedem Entscheidungsprozess zu klären. Heutige Abfallproduktion ist so enorm, dass man mit der Mülldeponierung nicht mehr auskommen kann. Es werden daher weitere Verbrennungsanlagen gebaut, um das Gesamtvolumen zu reduzieren und gleichzeitig einen Nutzen davon zu haben. Da diese Anlagen sehr teuer sind, müssen wir den Standort optimal auswählen, damit die meisten Kunden davon einen Nutzen haben. Gleichzeitig müssen die Transportkosten zu solchen Einrichtungen möglichst gering sein. Unmittelbar nach der Standortfestlegung folgt eine weitere Entscheidungsphase. Denn eine Verbrennungsanlage liefert eine hohe Leistung, wenn man auch „guten Abfall“ hat. Das bedeutet, dass eine Mülltrennung in diesem Fall die beste Variante ist und wenn der Müll viel von organischen und inerten Stoffen beinhaltet, sinkt damit natürlich die Effektivität der Verbrennung. Daher zahlt sich meistens die Mülltrennung aus. Es wird deutlich, dass die Transportkosten für den separierten Abfall steigen müssen. Des Weiteren hat man einen Zusatznutzen von der Verbrennung und Verkauf von Recyclingstoffen. Je nach gewähltem Sammelsystem unterscheiden sich dann auch die Transportkosten von den Deponiekosten. Daraus folgt auch der Bedarf an Sammelwägen mit verschiedenen Einrichtungen und Kapazitäten. In unserem Modell unterscheiden wir nach 3 Fahrzeugtypen⁵²:

⁵² Vgl. Angelelli E. and Speranza MG. (2002) (a) S 944f

- ❖ Traditionelles Sammelsystem mit 3-Mann-Besatzung, ein Fahrzeuglenker und 2 Hilfsarbeiter, die den Wagen von hinten manuell oder mit Hilfe einer Hydraulik befüllen. Der Müll ist in Säcken oder kleinen Mülltonnen am Straßenrande bereitgestellt.
- ❖ Ein „side-loader-system“, wo die gesamte Tätigkeit von einer Person durchgeführt wird. Die Fahrzeuge verfügen über spezielle Einrichtung am Wagen, um große Müllcontainer am Straßenrand direkt von Fahrerkabine zu bedienen. Man spart damit zwar die Sammelkosten, aber die Anschaffungskosten sind etwas höher und die Container müssen frei zugänglich werden.
- ❖ Fahrzeuge, die vollgeladene Mülltonnen automatisch aufladen und auf dieselbe Stelle leere Container wieder abladen, nennen wir „side-loader-system with demountable body“. Es handelt sich in diesem Fall um die teuersten Sammelwägen, mit vergleichsweise weniger Ladekapazität und mit hohen Betriebskosten.

In Folgenden wird ein einheitliches Modell für alle 3 Sammelsysteme vorgestellt. Grundsätzlich handelt es sich um ein periodisches VRP, denn die Kunden (Container in diesem Fall) werden meistens 2-mal pro Woche bedient, und die Tourenplanung erfolgt für einen längeren Zeithorizont. Für die Planung geht man davon aus, dass es eine fixe Anzahl an bestimmten Fahrzeugen gibt, die wir verwenden können.

Das Grundmodell⁵³

Weiter ist es nötig einen zeitlichen Sammelplan (*collection schedule*) zu definieren. Hier wird der Bedarf, an welchen Tagen die Abfuhr durchzuführen ist, angegeben. Wenn wir eine klassische 5-Tage Woche betrachten und unser Sammelplan {15, 0, 8, 0, 12} lautet. Dann heißt es, dass die Sammelarbeit am Montag, Mittwoch und Freitag mit jeweils 15, 8, und 12 Mengeneinheiten an Bedarf durchzuführen ist. Die Route wird als eine Rundreise auf dem Graph angegeben, die in dem Depot startet, alle von dieser Route befindliche Knoten durchläuft und wieder in dem Depot nach der Schicht oder nach voll geleisteter Arbeit endet. Im Endergebnis sollen alle errechneten Routen zu den

⁵³ Vgl. Angelelli E. and Speranza MG. (2002)(a) S 946

verfügbaren Fahrzeugen zugewiesen werden. Auch alle Knoten müssen laut dem genau definierten Sammelplan bedient werden. Das Resultat ist zumutbar, wenn keine Restriktion verletzt wird, wie zum Beispiel die erlaubte Routendauer oder die Kapazität von eingesetzten Sammelwägen.

Change-over point (COP)

Jetzt möchte ich noch näher darauf eingehen, welche Rolle die COPs in PVRP mit Zwischenlager laut Angelelli and Speranza (2002)(a) spielen. Bis jetzt hat man das Problem aus der Sicht der Müllabfuhr von ungetrenntem Abfall betrachtet. Wenn aber jetzt der separierte Müll zusammengeführt werden soll, müssen weitere Korrekturen in unserem Modell vorgenommen werden. In unseren Sammelplänen wird im weiteren Verlauf nach den Müllsorten unterschieden. Die COPs werden jetzt nicht wie früher für alle Müllsorten identisch sein. Daher ist es nötig, diese COPs mit zusätzlichen Attributen näher zu definieren. Eine Sammel- oder Verarbeitungsstelle für das Altpapier wird zum Beispiel kein Altglas annehmen können. Deswegen muss man auch die Kanten so definieren, damit nur gleiche Knotentypen verbunden werden können. Mit gleichen Knotentypen sind gleichartige Container gemeint, also Altpapiercontainer werden nur zu solcher Route zugeteilt, wo nur Altpapier gesammelt wird. Eine richtige Gruppierung der Straßencontainer kann man auf zwei Arten erreichen. Entweder löschen wir alle solche Kanten die miteinander nichts zu tun haben. Kanten zwischen Altpapiertonne und Altglastonne existieren dann nicht mehr. Oder man erhöht die Attribute von diesen Kanten auf unendlich. Das heißt, die Reisezeiten oder die Distanzen werden so groß, dass es keine unerlaubte Lösung entstehen kann. Auch die Fahrzeugkapazitäten sollen in den Kalkulationen entsprechend berücksichtigt werden. Für gewisse Müllsorten können nämlich dieselben Wägen verwendet werden, dabei muss man aber die Ladekapazitäten beachten. Es ist ganz ersichtlich, wenn man Altpapier sammelt, ist die Ladekapazität eher vom Volumen limitiert, wobei bei Altglas ziemlich sicher zuerst das zulässige Gewicht überschritten wird⁵⁴.

⁵⁴ Vgl. Angelelli E. and Speranza MG. (2002)(a) S 946

Clustering

Bei der Applikation von unserem Modell wurden von Angelelli und Speranza (2002)(a) sogenannte macro-points definiert. Der Grund für diese Überlegung war hauptsächlich der Bedarf an Daten, welche in der Wirklichkeit nicht vorliegen. Man ist nicht in der Lage, alle Verbindungsmöglichkeiten zwischen allen bekannten Knoten, in unserem Fall Container, deterministisch zu bestimmen. Daher greift man in diesem Zusammenhang zu dem Konzept von macro-points. Es werden also solche Punkte zusammenverbunden, die gleiche oder fast gleiche Attribute aufweisen und sehr nahe zueinander angesiedelt sind. Es handelt sich um Container mit gleicher Auffüllrate, gleichem Abfalltyp und vor allem von gleichem Sammelplan. Zu besserer Veranschaulichung in unserem Graph werden macro-points als Cluster mit diesen gleichartigen Knoten bezeichnet. Nachher werden die einzelnen Cluster zusammen verbunden. Wir kennen also die Distanzen und die Reisezeiten innen in Clustern und auch innerhalb von Clustern. Daher ist es dann möglich, alle möglichen Verbindungen zwischen allen bekannten Punkten festzustellen⁵⁵.

*4.1.2.1 The Val Trompia case*⁵⁶

Bei dem Val-Trompia-case handelt es sich um eine Gegend in Italien. Eine private Firma beschäftigt sich mit der Müllzusammenfuhr und möchte auf ein neues Sammelsystem wechseln, um die Kosten zu reduzieren. Folgende Kriterien sind angegeben:

- ❖ Tourenplanung erfolgt auf wöchentlicher Basis
- ❖ Sammeln von nicht getrenntem Müll
- ❖ Im Durchschnitt sind 117 Tonnen Abfall pro Woche abzuführen
- ❖ 343 Straßencontainer sind zu bedienen
- ❖ Verstreut über 10 Siedlungen
- ❖ Sammelfrequenz ist 2-mal pro Woche außer Sonntage

⁵⁵ Vgl. Angelelli E. and Speranza MG. (2002)(a) S 947

⁵⁶ Angelelli E. and Speranza MG. (2002)(a) S 948

Es wurde erwogen die zwei der vorgestellten Sammelmethode zu modellieren. Momentan disponiert das Unternehmen über 2 Fahrzeuge mit „side-loader system“ und Ladekapazität von 13 Tonnen. Dieses Sammelmodell wird nun mit einem anderen Modell verglichen, welches die modernsten „side-loader vehicles with demountable body“ verwenden würde. Zur Verfügung stehen natürlich noch weitere Daten wie die Entfernungsmatrix, die Servicezeiten oder die durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten. Der gesammelte Müll wird zu einer Verbrennungsanlage transportiert, welche in der Nähe von Firmendepot liegt⁵⁷.

Die Anschaffungskosten für diese zwei Wagenmodelle sind zwar etwas unterschiedlich, aber nachdem die Nutzungsdauer sehr lang ist, werden wir diese Methoden nach den Betriebskosten evaluieren. Bei der Modellierung wurden unterschiedliche Varianten simuliert:

- ❖ kein, ein oder zwei COPs werden zusätzlich eingerichtet und
- ❖ die Tagesschicht dauert entweder 6 oder 9 Stunden.

Um solche PVRP mit Zwischeneinrichtungen zu lösen, scheint nach Angelelli and Speranza (2002)(a) der TS-Algorithmus einer der besten zu sein.

Tabu search (TS) Algorithmus

Um einen TS laufen zu können, brauchen wir immer am Anfang eine Startlösung. In unserem Fall wird der Anfahrtsplan zufällig gewählt. Alle Container sind dann genau einem Anfahrtsplan zugewiesen und die Sets von besuchten Containern an jedem Tag sind fix. Eine solche Lösung ist dann zulässig, wenn alle Zeit- und Kapazitätsrestriktionen eingehalten sind. Nach einer erfolgreichen Generierung der Startlösung beginnt man diese in weiteren Iterationsschritten zu verbessern. Diese Änderungen der aktuellen Lösungen nennen Angelelli und Speranza (2002)(a) als „moves“. Unser Algorithmus unterscheidet vier Typen von „moves“. Im ersten Fall entnehmen wir einen Container und fügen ihn zu einem anderen Anfahrtsplan. Im zweiten Fall wird von einer Sammelroute ein Knoten entnommen und einer anderen Route am selben Tag wieder hinzugefügt. Die dritte Methode bricht zwei Sammelrouten ab und es werden 2 ganz neue Routen generiert, um niedrigere Kosten zu erreichen.

⁵⁷ Vgl. Angelelli E. and Speranza MG. (2002)(a) S 948

Zuletzt versuchen wir die Container von 2 Routen umzuverteilen. Danach kommt die Phase, wo ein Set von modifizierten Resultaten generiert werden soll. Aus diesem Ergebnis sollte eine Entscheidung getroffen werden, welche am besten zu verwenden ist. Laut Definition von PVRP, soll die beste Lösung für unsere Aufgabe solche sein, die am meisten die Kostenfunktion minimiert. Gleichzeitig soll diese Lösung nicht auf der Liste der verbotenen Lösungen (tabu list) stehen. Diese Zielsetzung muss allerdings nicht so streng eingehalten werden. Man soll sich nicht nur an der besten Lösung orientieren, denn es können auch gute Resultate mit ganz niedrigem Zielfunktionswert und nicht so großen Verletzungen von Restriktionen erzielt werden. Manchmal erreicht man damit sogar auch bessere Ergebnisse. Sehr wichtig ist es, die Tabuliste in jeder Iteration zu aktualisieren, um Zyklen beim Generieren zu verhindern⁵⁸.

Nach der Simulation verschiedensten Varianten hat man festgestellt, dass es für das Unternehmen ein Umstieg von aktuell benutztem System auf ein anderes ein Kostenersparnis bringt. Zurzeit wurden zwei „side-loader“ Fahrzeuge im Einsatz und haben den Müll ohne irgendwelche Zwischenstopps zur Verbrennungsanlage geführt. Als Bestergebnis unserer Modellierung kommt folgende Variante heraus:

- ❖ ein „side-loader with demountable Body“,
- ❖ ein „truck-trailer“ und
- ❖ die Einrichtung von zwei COPs.

Das neugewählte System funktioniert so, dass das erstgenannte Fahrzeug die Sammelarbeit durchführt, wobei in der Zwischenzeit das zweite Fahrzeug auf den Wechselständen (COPs) übernommenen Container zum Ausleeren führt. Man braucht keinen zweiten, kostenaufwendigen Sammelwagen anzuschaffen, es reicht dafür die 8-Stunden-Schicht aus.

4.1.2.2 *The Antwerp case*⁵⁹

Die Rede ist von einem kleinen Gebiet der Provinz Antwerpen in Belgien. Zurzeit betreibt dort eine kompetente Firma eine separierte Müllsammlung mit Hilfe von „side-

⁵⁸ Vgl. Angelelli E. and Speranza MG. (2002)(a) S 947

⁵⁹ Vgl. Angelelli E. and Speranza MG. (2002)(a) S 949

loader vehicle with demountable body“. Grundsätzlich beschäftigt sich diese Studie mit der Altpapiersammlung und organischem Abfall (abgekürzt als GFT, Holländische Bezeichnung für Biomüll). Folgende Daten sind uns zurzeit bekannt:

- ❖ Tourenplanung erfolgt auf wöchentlicher Basis
- ❖ Sammeln von zwei Müllsorten (Altpapier, GFT)
- ❖ Im Schnitt sind 14,5 und 16,5 Tonnen Altpapier und GFT pro Woche abzuführen
- ❖ 107 Altpapier- und 72 GFT-Container sind zu bedienen
- ❖ Container sind in 42 respektive 26 sogenannten „macro-points“ gruppiert
- ❖ Sammelfrequenz:
 - Montag, Dienstag GFT
 - Montag bis Freitag außer Mittwoch Altpapier
- ❖ 2 Sammelfahrzeuge je 6 Stundenschicht

Wenn die Autoren jetzt wieder verschiedene Szenarien modellieren, kommen sie zu folgendem Ergebnis. In dieser kleinen Probegruppe zahlt sich dieses System nicht aus, da die Fahrzeuge unter dem gegebenen Sammelzeitplan sehr wenig ausgelastet sind. Verhältnismäßig zur Anschaffungskosten wäre solches System zu teuer. Man kann zwar kein exaktes Ergebnis äußern, aber gewisse Verbesserungsideen sind klar zu erkennen. Wenn das Sammelgebiet um mehrere Container in beiden Gruppen erweitert wird, damit die „macro-points“ etwas anders strukturiert sind, kann man auf relativ ansehnliche Zahlen kommen. Als Vergleichskriterium rechnet man in Kilometer pro Tonne. Das oben beschriebene Portfolio liefert in Summe 13 km/Tonne. Wenn nun mit

- ❖ 168 Altpapiercontainern
- ❖ 124 GFT-Containern

gerechnet wird, sind nur ca. 6 gefahrene Kilometer pro gesammelte Tonne notwendig. Größtes Ersparnis hat man allerdings dadurch erreicht, dass sich die Fahrten zur Recyclingstelle und Kompostierungsdeponie reduziert haben. Der Grund ist denkbar einfach. Bei früherem Modell waren die Wagen weniger als zur Hälfte geladen und sind nach jeder Schicht 20km bzw. 30km zum Ausleeren gefahren. Heutzutage sind diese Strecken ebenfalls zu absolvieren, allerdings sind die Fahrzeuge viel effektiver

ausgelastet und umgerechnet auf die entsorgte Menge wird damit das Kilometergeld erheblich reduziert⁶⁰.

4.1.3 VSP mit mehreren Recyclinganlagen in Porto Alegre

Li et al. (2006) beschreiben die Müllentsorgung in der Stadt Porto Alegre in Brasilien, die funktioniert ein wenig anders als üblich funktioniert. Es wird der nicht getrennte Abfall gesammelt, zu mehreren Recyclingeinrichtungen abgeführt und erst dort sortiert. Man muss gleich vorweg sagen, dass dieses System schon länger läuft und die Recyclingstellen, allein in dieser Stadt, rund 450 Arbeitsplätze darstellen. Obwohl das System unter gewissen Umständen funktioniert, hat sich die Gemeindevertretung entschieden die momentane Situation zu verbessern um finanzielle Mittel einzusparen. In dieser Stadt werden jährlich 4 Mio. Dollar für die Müllabfuhr ausgegeben. Die Zielsetzung für diese Studie lautet: „to suggest a methodology for allocating trucks to the existing collection sites in Porto Alegre, with the purpose of minimizing the operating and fixed truck costs.“⁶¹ Es handelt sich um ein einfaches Sammelsystem mit

- ❖ einem Depot,
- ❖ mehreren gleichwertigen Fahrzeugen mit Ladekapazität von 1400 kg,
- ❖ 1-3 Stunden Sammelfrequenz,
- ❖ täglich von Montag bis Freitag und
- ❖ 8 Recyclingeinrichtungen.

Obwohl nur relativ kleine Fahrzeuge zur Verfügung stehen, brauchen wir uns keine Sorgen über Kapazitätsrestriktion für die Fahrzeuge zu machen, weil man laut Angaben sehr oft zu Entladestellen fahren muss. Die Stadt ist nämlich in kleine Sammelblöcke aufgeteilt. Jedes Fahrzeug weist die normale 3-Mann Besatzung auf und startet täglich um 8 Uhr in der Früh um die vordefinierte Route durchzufahren. Diese Fahrt dauert zwischen 1 bis 3 Stunden oder gegebenenfalls auch kürzer, wenn das Abfallvolumen die 1000 kg erreicht. Es kann daher passieren, dass man vormittags auch manchmal 2 Touren erledigen kann, wenn es zeitlich aufgeht. Bis 12 Uhr mittags müssen alle Fahrzeuge im Depot ankommen um eine Mittagspause zu machen. Nach derselben

⁶⁰ Vgl. Angelelli E. and Speranza MG. (2002)(a) S 951f

⁶¹ Li et al. (2006) S. 1133f

Routine läuft auch der Nachmittag ab, nämlich 14:00 Uhr bis 18:00 Uhr. Die Tagesschicht endet wieder im Depot und alle Sammelwägen sollten leer sein. Obwohl die Müllabfuhr effektiv abläuft, sind die Kosten extrem hoch⁶².

Ein paar Worte müssen noch zu der sozialen Situation in dieser Stadt gesagt werden. Die Gemeinde will das eingeführte System nicht ändern, sondern nur die Sammelfahrzeuge anders und günstiger zu gegebenen Routen zuordnen. Der Grund dafür ist die Mühe die Arbeitsplätze in eigenen Recyclingbetrieben zu erhalten und möglichst viel von wiederverwertbaren Stoffen aussortieren. Der Verkauf von diesen wertvollen Rohstoffen ist nämlich eine wichtige Einnahmequelle. Das Gebiet beherrschen unabhängige Firmen, die aus den Mülltonnen die wertvolle Rohstoffe herausnehmen und diese an private Recyclingunternehmen verkaufen. Dadurch sinken einerseits die Einnahmen vom Verkauf von Rohstoffen für die Gemeinde, andererseits wird auf den Straßen Unordnung und Schmutz hintergelassen. Auch die Stadtbevölkerung kämpft schon gegen dieses Phänomen, damit sie den Abfall direkt an die städtische Sammelfahrzeuge abgeben⁶³.

Li et al. (2006) modellieren das Problem als ein single-depot vehicle scheduling problem (VSP). Sie versuchen einfach die Fahrzeuge effektiver zu vordefinierten Routen, Start- und Endzeiten zuzuordnen. Gleichzeitig sollen folgende Bedingungen einhalten:

- ❖ Jede Route wird genau von einem Fahrzeug bedient
- ❖ Jedes Fahrzeug muss eine erlaubte Sequenz einhalten
- ❖ Es existiert nur ein Depot und am Schichtende kehren alle Sammelwägen entleert wieder zurück

Um zu erwünschten Resultaten zu kommen, modellieren sie einige Szenarios. „We show that this special case of vehicle scheduling problem (VSP) can be modeled as a minimum-cost flow problem, which is polynomial solvable.“⁶⁴

In unserem Beispiel konzentriert man sich auf einen heuristischen Ansatz, welcher auf dem auction algorithm vom Freling et al. (2006) aufbaut. Mit dieser Heuristik errechnete Resultate liefern eine wesentliche Kostensenkung. In der folgenden Tabelle

⁶² Vgl. Li et al. (2006) S.1135

⁶³ Vgl. Li et al. (2006) S.1136

⁶⁴ Li et al. (2006) S.1134

sieht man die Unterschiede von der ursprünglichen manuellen Planung und der neu entwickelten Heuristik.

Abbildung 1: Vergleichstabelle (früher vs. neues Modell)

	Manuelle Planung	Neue Heuristik	Verbesserung in %
Reduktion der durchschnittlichen Anzahl der Fahrzeuge	20,6	15,4	25,24
Gefahrene Kilometer im Schnitt pro Tag	483,64	352,02	27,21
Durchschnittliche Transportkosten pro Tag	\$ 349,82	\$ 260,23	25,61

Quelle: Li et al. (2008) S.1148

Diese Ergebnisse zeigen, dass unser Modellansatz die Gesamtkosten effektiv reduziert und gleichzeitig verbessert den sozialen Aspekt des Abfallmanagements.⁶⁵

Die oben präsentierten Resultate machen im Jahr eine Ersparnis der Transportkosten von \$ 23.358,-. Man hat aber in dieser Kalkulation nicht die Personalkosten berücksichtigt. Im Vergleich zu den Transportkosten kann man hier viel höhere Ersparnis erreichen, denn mit Hilfe unserer Heuristik sind 20 Wagenmannschaften zu viel. Umgerechnet sind es weitere \$ 135.200,- jährlich. Man kann daher sagen, dass die Gemeinde 5,2% des Budgets für die Müllentsorgung spart⁶⁶.

⁶⁵ Vgl. Li et al. (2006) S.1148

⁶⁶ Vgl. Li et al. (2006) S.1147

4.1.5 3-stufiges Sammelsystem in Hanoi

Es gibt verschiedene Sammelmethode für die Müllentsorgung und jede Stadt oder Gemeinde wählt eine andere, die sich am besten für den bestimmten Raum eignet. Auf der anderen Seite wird man in dieser Studie einen Fall kennen lernen, welcher in hoch entwickelten Staaten nicht mehr zu finden ist. Dieses Sammelsystem spiegelt wahrscheinlich die ökonomische und soziale Situation in Hanoi in Vietnam wider.

Es handelt sich um einen Sonderfall, in dem die Sammeltätigkeiten in 3 Stufen erfolgen. Das Unternehmen, welches die Müllabfuhr durchführt, besitzt zwei motorisierte Fahrzeugflotten und fünf Divisionen von handgeschleppten Karren. Den einzelnen Divisionen sind dann bestimmte Stadtteile zugeordnet, die regelmäßig zu bedienen sind. Das Abfallsammelsystem besteht aus drei Sammelstufen: „gathering manually, picking by vehicles and transporting-dumping at the landfill“⁶⁷

In der ersten Stufe wird der Müll manuell mit Hilfe von Handkarren bei den Haushalten abgeholt und zu einer vordefinierten Sammelstelle gebracht. In der Stadt sind es ca. 100 solche Stellen. Es sind bis zu sechs Zeitpunkte, die immer am Ende des Zeitfensters festgesetzt sind und an denen die Handkarren anwesend sein müssen. Dort werden die Handkarren von speziell ausgerüsteten Kraftwagen bedient und entleert. Diese Fahrzeuge beginnen die Tagestour im Depot und besuchen diese Sammelstellen in vordefinierten Zeitintervallen. Sobald sie voll sind, fahren sie zu Mülldeponie, um den Abfall zu entsorgen. „Nach dem Entladen kehrt der Wagen zurück zu der Sammelroute, um eine nächste Strecke in derselben Sequenz wie die frühere zu fahren.“⁶⁸

Im Durchschnitt sind die einzelnen Fahrten zwei- bis dreimal am Tag zu absolvieren. Folgende Zeitfenster und Schichtenaufteilungen sind gegeben:

- ❖ Erste Schicht zwischen 9:00 Uhr und 16:00 Uhr
- ❖ Nachtschicht zwischen 18:00 Uhr und 1:00 Uhr in der Nacht
- ❖ Die Tagesschicht braucht nur 4 Sammelfahrzeuge
- ❖ Wobei die Nachtschicht mit 18 Wagen unterwegs ist.

⁶⁷ Tung, Pinnoi (2000) S. 449

⁶⁸ Tung, Pinnoi (2000) S. 450

Nachdem die Stadt und die Fahrzeugflotte sehr groß sind, wurde die Studie nur für eine ausgewählte Flotte modelliert. Auf das Forschungsergebnis hat es überhaupt kein Einfluss, denn man kann das Modell ohne Probleme später auch auf die anderen anwenden. Zurzeit sind die Besuchsintervalle auf den Umladestellen fix vorgegeben. „In contrast to the current practice, we also propose a policy of flexible routing that allows the vehicle to visit sites in any sequence.“⁶⁹

Um das Problem zu lösen gibt es wie immer verschiedene Möglichkeiten, wie man zu einem guten Ergebnis kommt. Für kleinere Probleme dieser Art würde es sogar möglich sein ein exaktes Verfahren anwenden zu können. Dazu schlagen Tung, Pinnoi (2000) ein *mixed-integer program* vor, welches als Zielsetzung die Minimierung der Betriebskosten hat. Für unsere Zwecke ist dieser Ansatz schwer anwendbar, weil der Umfang der Aufgabe keine Lösung in zulässiger Zeit erlaubt. Daher muss man das Problem mit Hilfe einer Heuristik formulieren und lösen. Man kann von vielen sehr bekannten Ansetzen wählen und solche adaptieren. *The route construction approach* verwendet normalerweise eine *greedy technique* um eine gute Startlösung in kurzer Rechenzeit zu bekommen. Von dieser Anfangslösung versucht ein Verbesserungsverfahren bessere Resultate zu erhalten, wobei ein oder mehrere *exchange* Algorithmen angewendet werden.⁷⁰

Mit bestimmten Anpassungen wurde als Eröffnungsverfahren bei Modellierung die weltbekannte Solomon's Heuristik verwendet. In der zweiten Phase der Routenverbesserung wurde die Startlösung weiter bearbeitet. Im Sinne der Minimalisierung von der Fahrzeugmenge und der Reisezeit hat man 2 Verbesserungsmethoden angewendet, konkret Or-opt und 2-opt Austauschmethoden⁷¹.

Erhaltene Lösungen

Mit Hilfe von C++ wird die entwickelte Methode implementiert. Bevor man mit der eigentlichen Implementierung beginnt, sollte man ausprobieren, wie gut unser Modell arbeitet. Um unsere Heuristik zu testen, wählt man ein kleines Problem mit 6-9 Knoten und 1-2 Fahrzeugen. Die Resultate werden dann mit einem exakten Ergebnis verglichen. Dieses Endergebnis wird mit Hilfe von Optimierungsprogramm LINDO

⁶⁹ Tung, Pinnoi (2000) S. 250

⁷⁰ Tung, Pinnoi (2000) S. 251

⁷¹ Vgl. Tung, Pinnoi (2000) S. 253f

ermittelt. Wie man am Anfang befürchtet hat, sind die exakten Resultate schon bei diesen Dimensionen schwer zu bekommen. Die Rechenzeiten steigen exponentiell und ab gewisser Menge an Variablen sind sie in der realen Zeit nicht mehr zu erwarten. Zur Veranschaulichung geben wir folgende Übersicht über die Rechenzeiten:

❖ 2 Fahrzeuge, 6 Sammelstellen	Rechenzeit: 20 Sekunden
❖ 2 Fahrzeuge, 7 Sammelstellen	Rechenzeit: 9 Minuten
❖ 2 Fahrzeuge, 8 Sammelstellen	Rechenzeit: 49 Minuten
❖ 2 Fahrzeuge, 9 Sammelstellen	Rechenzeit: 25 Stunden

Alle vier Modelle waren inklusive Depot und Mülldeponie. Wie man oben sieht, ist es ohne einem heuristischen Verfahren nicht mehr möglich ein reales Problem zu lösen. Wenn man die gleiche Dimension mit Hilfe unserer Heuristik in C++ rechnet, kommt man in allen Fällen mit weniger als einer Sekunde aus⁷².

Das Modell wurde in einzelnen Schritten implementiert. Die Tagesschicht wurde noch in 2 Teile zerlegt, in die Vormittags- und die Nachmittagsschicht. Am Vormittag handelt es sich vergleichsweise um ein kleineres Problem, denn nur 149 Handkarren unterwegs sind. Diese werden von 4 Fahrzeugen bedient. Im Ergebnis kommt man auf 8,8% Verbesserung der gesamten Reisezeit. Die Kapazitätsauslastung von Sammelwägen von 79,3% wurde ebenfalls erreicht. Vormittags sind 3 verschiedene Zeitfenster zu beachten, wobei am Nachmittag nur ein Zeitfenster einzuhalten ist. Die Anzahl der Fahrzeuge bleibt unverändert, nur die Handkarrenzahl sinkt auf 94. Die Reisezeitverbesserung beträgt in diesem Fall 18.7 %. Hinsichtlich der Sammelfahrzeuge kommt man darauf, dass es möglich wäre nur 3 statt 4 Fahrzeuge anzusetzen. Trotzdem geht es mit der Kapazität völlig auf. Damit sparen wir für dieses Fahrzeug die Betriebs- sowie Personalkosten⁷³.

Bei der Müllabfuhr in der Nacht muss man mit viel umfangreichem Problem rechnen. Insgesamt sind 1341 Handkarren und 18 Sammelfahrzeuge unterwegs. Wiederum ist die Nachtschicht in 3 Zeitfenster aufgeteilt, d.h. jedes Fahrzeug macht die vorgegebene Route 3-mal. Schon bei dem Eröffnungsverfahren kommt man darauf, dass man bezüglich der Kapazität mit nur 16 statt 18 Fahrzeugen auskommt. Bei der Verbesserungsphase werden weitere 2 Sammelwägen erspart und trotzdem die

⁷² Vgl. Tung, Pinnoi (2000) S. 258

⁷³ Vgl. Tung, Pinnoi (2000) S. 258

Gesamtzeit um 8,7% verbessert. Zusammenfassend kann man sagen, dass 4 + 14 Fahrzeuge nötig sein würden. Im Vergleich zu momentaner Praxis sparen wir in der Summe 4 Sammelfahrzeuge und die Gesamtersparnis pro Tag beträgt damit 4,6%. Prozentuell ist die gesamte Kostensenkung geringer als die Fahrzeugreduktion. Dies hat aber einen einfachen Grund. Die Fixkostensumme der ersparten Wägen ist im Vergleich zu den Betriebskosten unbedeutend, denn mit der neuen Modellierung steigt die Effektivität und die Kapazität ist demzufolge besser ausgenutzt⁷⁴.

Zum Schluss kann man die Ergebnisse auf zwei Arten interpretieren. Entweder ist die gesamte Fahrzeugflotte um 20,45% zu reduzieren oder man kann die Produktivität mit dem bestehenden Fuhrpark um 20% erhöhen. Nachdem das Abfallvolumen in Hanoi eine ständig wachsende Tendenz hat, empfiehlt man öfters eine Aktualisierung durchzuführen, damit die Optimalität garantiert wird. Andererseits kann man diese Methode der Tourenplanung auch auf andere Stadtteile anwenden, um die Betriebskosten für das Entsorgungsunternehmen zu sparen. „Compared with the current practice, our proposed heuristic shows a good performance in terms of the solution quality and computational time.“⁷⁵

⁷⁴ Vgl. Tung, Pinnoi (2000) S. 260

⁷⁵ Tung, Pinnoi (2000) S. 261

4.1.6 Mobile Depots

Die Mülldeponien und ihrer Kapazitäten sind für die heutige Müllproduktion nicht ausreichend. Auf der anderen Seite ist auch eine Eröffnung von weiteren Mülldeponien nicht möglich. Konkret ist die Rede von den Landesteilen im Norden Italiens. In dieser Studie wird die Abfallwirtschaft in Due Carrare näher untersucht. Die Situation in der Abfallwirtschaft will man hier nicht durch den Ausbau weiteren Deponien lösen, sondern der Lösungsweg sollte in die Richtung der Kostenreduktion der Müllabfuhr und der Optimierung der existierenden Mittel gehen. Zusätzlich ist die Verbesserung der Mülltrennung und der Recyclingtätigkeit ein wichtiger Zusatzaspekt⁷⁶.

In dieser kleinen Stadt sind ca. 26 km² mit 8500 Einwohner zu bedienen. Man unterscheidet drei Müllarten. Der Sondermüll, den kompostierter Abfall und zum Recycling geeignete Materialien wie Altpapier, Plastik und Metall (PPM). Die zurzeit verwendete Sammelmethode wird als eine „door-to-door“ Methode bezeichnet. Man kann diese Systeme als kantenorientierte Routenprobleme modellieren. Meistens verwenden wir ein Modell für *capacitated arc routing problem* (CARP), in diesem Kontext siehe Golden und Wong (1981).

Die PPM sind heterogene Materialien und sind in Due Carrare gemeinsam in einem Container zu sammeln. Es wurde hier ein Sortierautomat installiert, der diese Sachen voneinander mit hoher Effektivität trennen kann. Für die Sammeltätigkeiten von PPM haben wir zwei kleine Sammelfahrzeuge mit der Kapazität von 5 m³ und große Wagen mit der Kapazität von 22 m³. Die Kleinen, als „satellites“ genannt, sind für die engsten Gassen der Stadt bestimmt, wobei die großen „compactors“ für den Rest der Stadt und für die Fahrten zum Depot zugewiesen sind. Nachdem die *satellites* relativ bald voll sind und das Depot sehr weit außerhalb der Stadt liegt, werden die vollgeladenen *satellites* von den großen *compactors* entleert. Daher wird diese Problemstellung als CARP with Mobile Depots (CARP-MD) genannt. Um solche Probleme lösen zu können, wird in weiterer Folge eine heuristische Methode näher vorgestellt. Mit Hilfe von dem Algorithmus will man die Routendauer reduzieren und damit die Kosten im Vergleich zur alten Methode senken⁷⁷.

⁷⁶ Vgl. Del Pia, Filippi (2006) S. 125

⁷⁷ Vgl. Del Pia, Filippi (2006) S. 126

Beim Modellieren des Problems kann man alle Straßen als nichtgerichtete Kanten im Graf angeben. Man rechnet nur mit einem Depot, wo gleichzeitig der Sortierautomat installiert ist. Für unser Problem eignet sich am besten der Algorithmus von Hertz und Mittaz (2001). Diese Heuristik wird dann mit relativ wenig Aufwand für unsere Zwecke adaptiert.

Vier verschiedene Versionen von Formulierungen werden dann erstellt und simuliert. Diese werden in C++ implementiert und mit Hilfe von einem durchschnittlichen Computer gelöst. Alle erhaltenen Lösungen wurden dann mit dem alten Modell verglichen und die neuentwickelten Systeme bewertet⁷⁸.

Die Gesamtzeit der alten Methode ist 107.569 s, wobei die beste Lösung der neu entwickelten Systeme mit 84.265 s auskommt. Man hat damit 31,92% der Reisezeit gespart. Zusätzlich wurde die gesamte Tourenlänge von 96,5 km auf ca. 70 km reduziert, das wiederum eine Verbesserung von 7,5% gebracht hat. Mit der steigenden Effektivität des neuen Modells haben sich auch die Depotstopps von durchschnittlichen 6 auf 4 reduziert, was ebenfalls mehr als 30% Ersparnis der Wartezeiten darstellt.

Bei der Betrachtung der Kapazitätsauslastung von den kleinen satellites stellt man fest, dass diese sehr oft am Limit liegen. Daher hat man das Modell noch einmal mit vergrößerten Kapazitäten von 50% simuliert. Die Ergebnisse waren überraschend, da die benötigte Reisezeit um weitere 45% gesunken ist. Dies bewirkt bei den Gesamtkosten weitere 12,75% Ersparnis.⁷⁹

Zum Schluss dieser Studie wollte man die betreffenden Personen auf die Tatsache aufmerksam machen, dass man mit größeren satellites recht viel an finanziellen Mitteln einsparen könnte. Die Frage ist, ob es technisch durchführbar wäre.

⁷⁸ Vgl. Del Pia, Filippi (2006) S. 133

⁷⁹ Vgl. Del Pia, Filippi (2006) S. 140

4.1.7 Methodenvergleich der Müllabfuhr von separiertem Müll

„Methods in which several types of waste are collected simultaneously increased the efficiency of waste collection. High participation rates and separation efficiencies reduced the costs of waste collection.“⁸⁰

In dieser Untersuchung wurden verschiedene Sammelmethoden von separiertem Abfall modelliert und mit dem bestehenden System verglichen. Die Leistung des Modells wird anhand von Systemkosten, Spritverbrauch, Arbeitszeit und Abfallmengen gemessen. Der Schwerpunkt liegt wiederum bei der Mülltrennung, wobei eine steigende Sortierrate zu erreichen ist. Das Ziel dieser Studie ist die Feststellung des Einflusses der Mülltrennung auf die Effektivität der Abfallsammlung. Die alte Methode von gemischtem Müll und Containern von 120 bis 600 Liter wurde mit 3 alternativen Sammelmethoden ergänzt:

- ❖ Getrennte Ansammlung mit 1,3-5,0 m³ Containern
- ❖ Kombiniertes Sammelsystem mit 120-600 l Mülltonnen und Multi-Abteilungsfahrzeugen
- ❖ Commingled collection mit 120-600 l (hier werden verschiedene Farben von Plastiksäcken verwendet, die alle auf einmal von Sammelfahrzeugen abgeführt werden und erst mit Hilfe von optischer Sortieranlage wieder nach Farben getrennt werden)

Das beobachtete Gebiet hat die Größe von 764 km² und ca. 920.000 Einwohner. Die Gesamtmenge der „on-site collection“ Methode betrug laut Vergangenheitsdaten 250.000 Tonnen im Jahr. Insgesamt hat man sechs verschiedene Trenn- und Sammelmethoden modelliert:

- ❖ S1: keine Mülltrennung
- ❖ S2: zurzeit verwendetes System wurde zu Vergleichszwecken modelliert und ausgewertet
- ❖ S3: gleich wie S2 mit zusätzlicher Ansammlung von „energy waste“ von Häusern mit mehr als 10 Haushalten
- ❖ S4: gleich wie S3 inklusive kleineren Haushalten

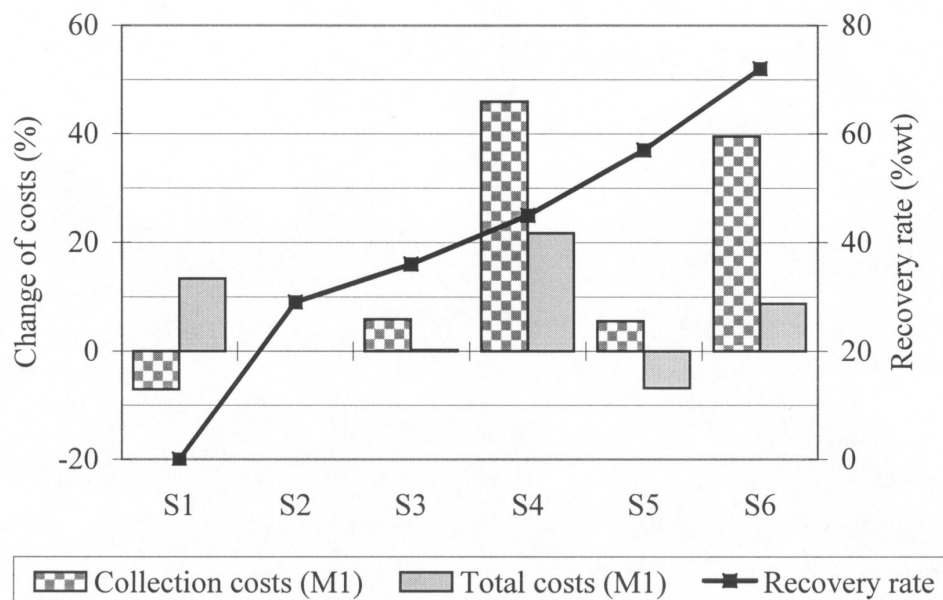
⁸⁰ Tanskanen, Kaila (2001) S. 486

- ❖ S5: gleich wie S3 mit erweiterter Mülltrennung, zusätzlich noch Altpapier und Bioabfall
- ❖ S6: Attribute von S4 und S5, wobei das Ziel die maximale Mülltrennung von allen Haushalten betrieben werden soll⁸¹

Nach dem Simulieren hat man interessante Tatsachen festgestellt. Grundsätzlich sind die Kosten bei allen Szenarien S3-S6 gestiegen, je nach Sammelmethode um 4 bis 46%. Am wenigsten ökonomisch effektiv war die Großcontainermethode mit der Kostenerhöhung von 37-86% für S3-S6.

Gemessen nach dem Spritverbrauch waren am günstigsten die Szenarien S4 und S6 unter der Verwendung von „*commingled*“ Sammelmethode. Dasselbe Ergebnis liefert auch die Bewertung nach der Arbeitszeit, wo ebenfalls diese Sammelmethode die geringste prozentuelle Steigerung aufweist. Für die Gesamtkostenbewertung kann man die Daten von der folgenden Grafik ablesen. „Total costs were affected in addition to the costs of waste collection by reduced costs of final disposal and increased revenues from the recovery of paper.“⁸²

Abbildung 2: Effekt der Mülltrennung auf die Gesamtkosten



Quelle: Tanskanen, Kaila (2001) S.493

⁸¹ Vgl. Tanskanen, Kaila (2001) S. 490f

⁸² Tanskanen, Kaila (2001) S. 493

4.2 Betriebsmüllentsorgung

In diesem Abschnitt werden wir uns hauptsächlich mit dem Gewerbemüll beschäftigen. Neben den Haushalten gibt es natürlich eine Unmenge an Unternehmen, Erzeugungs- sowie Dienstleistungsunternehmen. Alle diese Institutionen produzieren Abfälle, die ebenfalls zu entsorgen sind. Im Unterschied zu Hausmüllabfuhr gibt es in diesem Fall etwas andere Regelungen und Vorschriften. Die Unternehmen unterliegen generell anderen Richtlinien bei der Mülltrennung und meistens werden diese Vorgaben auch strenger geregelt und kontrolliert. Ein anderer Aspekt sind auch die Abfuhr- und Entsorgungsgebühren, die in der Regel viel höher als bei dem Haushaltsmüll liegen. Die Abfallmengen sind in jeder Einrichtung grundsätzlich höher, daher werden auch andere Müllcontainer verwendet. Im Zusammenhang mit diesen Differenzen müssen auch andere Sammelfahrzeuge eingesetzt werden. Schon alleine wegen diesen Unterschieden muss die Müllabfuhr von kommerziellen Einrichtungen separat behandelt werden. Auf der anderen Seite haben wir aber sehr ähnliche Transportprobleme wie bei dem Haushaltsmüll zu lösen. Es gibt in diesem Fall eine strengere Einhaltung von verschiedenen Zeitfenstern, weil diese Betriebe meistens fixe Öffnungszeiten haben. Außerdem spielt manchmal auch die Sammelfrequenz eine entscheidende Rolle. „*Commercial collection problems can be classified as variations of vehicle-routing problems with time windows (VRPTW) but with additional constraints.*“⁸³

⁸³ Sahoo et al. (2005) S. 26

4.2.1 Einsammlung und Abfuhr von medizinischem Abfall in Istanbul

Health-care waste ist einer der einzigartigsten und gefährlichsten Art des Mülls und stellt zusätzlich ein großes Risiko für die öffentliche Gesundheit dar.⁸⁴

In jedem Staat gelten diverse Vorschriften wie man mit dem gefährlichen Abfall umgehen soll. Solche Regeln gelten natürlich auch in der Türkei. Sie werden dort aber in den meisten Fällen nicht eingehalten und stellen für die Gesellschaft ein großes Risiko dar. Die Türkei gehört heutzutage leider immer noch zu den ökonomischen Entwicklungsländern, was die Situation der Müllentsorgung verschlechtert. Man will auf dieser Stelle die politische Situation in diesem Land nicht bewerten, sondern für das vorhandene Sammelsystem in Istanbul neue Modelle entwickeln und ferner zeigen, dass es ohne viel Aufwand auch anders ginge.

Medizinischer Abfall besteht primär aus pathologischem, infektiösem, chemischem und noch anderem Sondermüll. Daher muss man noch einmal andeuten, dass es sich um sehr gefährlichen Müll handeln kann und man muss aus hygienischen Sicherheitsgründen strengere Vorschriften einhalten. In Istanbul ist es in meisten Fällen leider das Gegenteil. Es wurde deterministisch festgestellt, dass es fast keine Mülltrennung in den medizinischen Einrichtungen gibt. Der Grund dafür ist der permanente Mangel an finanziellen Mitteln und daraus resultierende Probleme wie die ungenügende Kontrolle der Einhaltung von Vorschriften, auf der anderen Seite die mangelnde Schulung von Spitalpersonal. Die laufende Praxis, wie bewusstes Einmischen von infektiösem Müll in den „normalen“ Abfall ist keine Ausnahme, sondern die Regel. Damit werden die höheren Entsorgungsgebühren umgegangen. Eine ständig wachsende Population und Lebensstandard führt dazu, dass auch neue Krankenhäuser und medizinische Einrichtungen entstehen. Damit steigt ebenfalls die Menge von produziertem Müll und demzufolge wird die Situation langsam kritisch⁸⁵.

Zurzeit wird dieser Sondermüll in einer einzigen Verbrennungsanlage entsorgt. Diese Anlage befindet sich auf der europäischen Seite von Istanbul. Nachdem sich das laufende System sehr wenig mit dem optimalen VRP ähnelt, wollte man ein besseres

⁸⁴ Vgl. Alagöz, Kocasoy (2008) S. 1461

⁸⁵ Vgl. Alagöz, Kocasoy (2008) S. 1462

Modell für diesen Zweck entwickeln und modellieren. Folgende Angaben sind aktuell bekannt:

- ❖ Laut Aufzeichnungen von vergangenen Jahren wurden pro Tag 25-30 Tonnen von gefährlichem Müll produziert
- ❖ Es gibt im Raum Istanbul 401 Kliniken und 197 Krankenhäuser
- ❖ Diese Einrichtungen befinden sich auf der Fläche von rund 5196 km²
- ❖ 8 Sammelfahrzeuge mit der Kapazität von 2500 kg und weitere 6 Fahrzeuge mit der Kapazität von 1500 kg stehen zur Verfügung
- ❖ Jede Sanitäreinrichtung soll in der Regel täglich besucht werden

Es gibt, bezüglich der Sammelfrequenz eine Sonderregelung die besagt, dass sich die Sammelperiode auf eine Woche erhöhen darf, wenn der Müll in speziellen Räumlichkeiten mit der Temperatur unter 5 °C gelagert wird. Die Häuser verfügen kaum über solche Lagerräume und wegen den hohen Kühlkosten wird diese Regelung fast ungenutzt. Daher rechnen wir weiter mit der täglichen Sammelfrequenz. Ein weiterer Impuls für die Verbesserung des Systems als Ganzes ist die Tatsache, dass die einzige funktionierende und zuständige Verbrennungsanlage mit der Kapazität nicht mehr auskommt. Durchschnittlich ist die Anlage im Stande eine Tonne von diesem Sondermüll pro Stunde zu entsorgen. Pro Tag sind es dann 24 Tonnen. Die immer steigende Müllproduktion liegt aber leicht darüber. Daher sollte man in erster Linie mehr Aufmerksamkeit der Mülltrennung widmen, um das Volumen zu reduzieren. Andererseits könnte man durch richtiges Recycling einen zusätzlichen Nutzen erreichen⁸⁶.

Um eine Optimierung zu starten, müsste man noch weitere Daten ansammeln. Es wurde eine intensive Forschung der Situation durchgeführt. Die Daten wurden über die einzelnen Müllproduzenten, das Volumen, den Typ und den Standort gesammelt und anschließend in einer speziell entwickelten Datenbank zusammengefasst. Zum Optimieren des Routingproblems wurden diverse Softwareprogramme verwendet. Erstens wurde ein Straßenplan erfasst, um die Lokalitäten von einzelnen Sammelorten definieren zu können. Man hat die Stadt Istanbul virtuell in zwei Teile zerlegt, 132 Spitale und 241 Kliniken wurden der europäischen Seite zugewiesen, die restlichen 65

⁸⁶ Vgl. Alagöz, Kocasoy (2008) S. 1464

bzw. 160 Einrichtungen wurden der asiatischen Seite zugeordnet. Für diese separat behandelten Probleme hat man dann einige Verbesserungsmodelle entwickelt⁸⁷.

Im Ganzen wurden mehrere Szenarien modelliert. Wobei nur vier Szenarien, die auch hier vorgestellt werden, waren von dem ökonomischen und ökologischen Aspekt zulässig und interessant. Ein anderes Problem war die Arbeitszeitbestimmung, denn die Sammelarbeiten sind an jedem Tag einschließlich Wochenende durchzuführen. Es wurden die gesammelten Daten analysiert und man hat die Arbeitszeit generell auf 8 Stunden festgelegt. Davon sind 6 Stunden reine Sammeltätigkeit, die restlichen 2 Stunden wurden für die Mittagspause und die Reisezeit zur Deponie reserviert. Jede Fahrzeugmannschaft besteht aus einem Fahrer und einem Hilfsarbeiter. In den Kalkulationen wurden 2 verschiedene Kostenarten berücksichtigt. Ersten sind es die Personalkosten pro Fahrzeugmannschaft und zweitens die Betriebskosten der Fahrzeuge. Die Lohnkosten wurden auf US\$ 25 pro Tag und Mann festgestellt. Bei den Fahrzeugen wurden folgende Daten erfasst. Zur Konkretisierung hat man beim Simulieren 3 Fahrzeugmodelle unterschieden, mit der Kapazität von 2500, 1200 und 500 kg. Entsprechend diesen Ausführungen wurden vom Hersteller die jährlichen fixen und variablen Kosten abgefragt. Unsere Zielsetzung für die neuen Tourenplanungen war die Kostenminimierung für die Durchführung der Sammelarbeiten unter Einhaltung von festgestellten Restriktionen. Wie bereits oben erwähnt wurden in dieser Studie 4 verschiedene Szenarien entwickelt um diverse Situationen simulieren zu können. Eine wichtige Erkenntnis von bestehendem System wurde entdeckt. Und zwar aufgrund von Mangel an Sammelwägen, wurde der Müll in manchen Stadtteilen gemeinsam mit dem Haushaltsmüll angesammelt und auf einer normalen Deponie ohne zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen entsorgt⁸⁸.

Scenario I.

Man hat die bestehende Situation für die europäische Seite analysiert. Man rechnet mit der einzig existierenden Verbrennungsanlage, die zugleich das Start- und das Enddepot repräsentiert. Zuerst betrachtet man die großen Spitale und eher kleinere Kliniken als 2 separate Routen. Im Ergebnis ist es aber finanziell günstiger diese zwei

⁸⁷ Vgl. Alagöz, Kocasoy (2008) S. 1465

⁸⁸ Vgl. Alagöz, Kocasoy (2008) S. 1466

Einrichtungstypen nicht zu unterscheiden. Die erreichte Kapazitätsauslastung beträgt in diesem Modell 65%.

Scenario II.

Zu der bestehenden Verbrennungsanlage hat man beim Modellieren noch eine zusätzliche Anlage auf der asiatischen Seite angenommen. Der Standort wurde gemäß der bereits bestehenden Studie des Ministeriums von Istanbul ausgewählt. Es wurde nämlich schon früher eine zweite Verbrennungsanlage geplant, weil die Kapazität von der bestehenden Anlage offensichtlich nicht ausreichend ist. Mit der neuen Fabrik mit der Kapazität von 500kg/h wurde es unproblematisch auf beiden Seiten. Zusätzlich wurde damit ein zweites Depot auf der asiatischen Seite errichtet, das wiederum zur Tourenverkürzungen führt. Wenn man nun die Kosten vom ersten Szenario mit dem zweiten vergleicht, ist die zweite Situation offenkundig viel besser. Es ist gleich wie im ersten Fall, d.h. keinerlei Unterscheidung zwischen Kliniken und Krankenhäusern wirkt sich finanziell günstiger aus und insgesamt erreicht man eine Kostensenkung von 25,3%⁸⁹.

Scenario III.

In diesem Modell rechnen Alagöz, Kocasoy (2008) mit einer Sterilisationsanlage, die in der Nähe von bereits bestehender Kommunaldeponie liegt. Hier wird der gesammelte medizinische Müll sterilisiert und anschließend mit dem normalen Kommunalabfall auf der Deponie gelagert. Die europäische Seite bleibt bei dem alten System des Verbrennens. Wenn wir die Kosten mit den vorigen Szenario vergleichen, kommen wir auf sehr interessante Zahlen. Die Kosten für die Behandlung vom Müll im 2. Modell betragen € 0,1 - € 0,3 pro kg, wobei die Sterilisationskosten inklusive Sammeltätigkeit und der Deponie im Schnitt nur € 0,07 betragen. Man muss zwar noch die Investitionskosten für die Sterilisationseinrichtung in der Höhe von € 900.000,- berücksichtigen. Diese Kosten beeinflussen indirekt die Betriebskosten und in einem längerem Zeithorizont gesehen sind sie eher niedrig. Andererseits wird die Überbelastung der Verbrennungsanlage auf der europäischen Seite gelöst. Nach den Auswertungen von allen Alternativen für die asiatische Seite wurde festgestellt, dass der

⁸⁹ Vgl. Alagöz, Kocasoy (2008) S. 1468

Ausbau von einer Sterilisationseinrichtung die effektivste und sinnvollste Lösung wird.⁹⁰

Scenario IV.

In diesem letzten Modell wurde der Abfall nur von den Kliniken und kleinen medizinischen Einrichtungen berücksichtigt. Große Spitale lassen wir diesmal außer Acht. Als die Endstationen werden wiederum die zwei Brenner verwendet, sowie für die europäische als auch für die asiatische Seite. Diese Simulation ist sehr ähnlich der von Scenario II, alles in allem ist es um einiges teurer. Die Kosten betragen für beide Seiten im Schnitt € 0,290 pro kg.

Ferner muss man diese vier verschiedene Modelle evaluieren und das beste Szenario auswählen. Verglichen wurden sowohl die Kosten, als auch die gewählte Standorte der neuen Anlagen und der Sammelsysteme als solche. In allen Fällen hat man gesehen, dass betreffend den Kosten eine gemeinsame Betrachtung von Kliniken und großen Krankenhäusern günstiger ist. Gleichzeitig sinkt auch die Anzahl der Fahrzeuge bei der gemeinsamen Einsammlung. Hinsichtlich der Start- und der Endlokalität ist die beste Alternative bei gemeinsamer Abfallentsorgung die separate Betrachtung der europäischen und asiatischen Seite. Aus den vorgestellten Modellen wurde die Methode mit bestehender Verbrennungsanlage westlich und einer Sterilisationseinrichtung im Osten gewählt. Zusätzlicher Vorteil für den Ausbau von dieser Sterilisationsfabrik ist die Möglichkeit der langfristigen Nutzung des bestehenden Brenners im Westen. Damit erreicht man für diese Anlage enorme Restkapazität. Zusammenfassend wird mit der Realisation von diesem Modell eine markante Kostensenkung erreicht. „The benefit that may be achieved by reducing the collection and transportation costs is of interest to health-care institutions and municipalities at the micro level, and to the country at the macro level.“⁹¹

Schließlich sei darauf hingewiesen, dass die entsprechenden Organe diese Variante behandelt haben und anschließend in die Praxis implementiert haben.

⁹⁰ Vgl. Alagöz, Kocasoy (2008) S. 1469

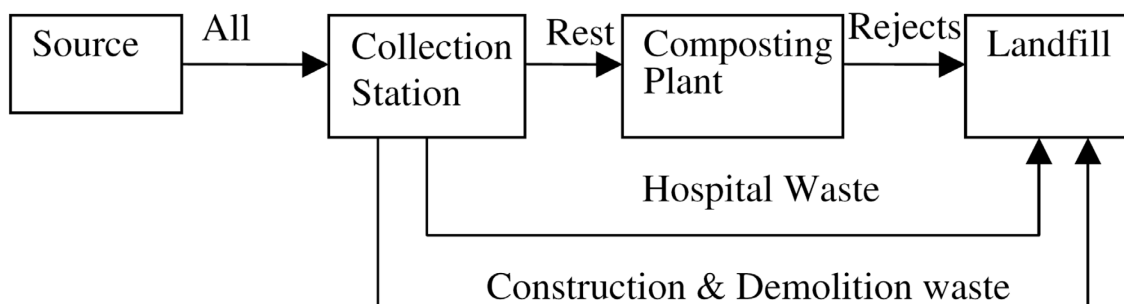
⁹¹ Alagöz, Kocasoy (2008) S. 1470

4.2.2 Optimierung der Abfallwirtschaft in Ägypten

In Ägypten wurde jährlich 10 Mio. Tonnen Abfall produziert. Der Industrieabfall beträgt ca. 40% von dieser Menge. Diese Studie beschäftigt sich mit der Abfallwirtschaft in dem Gebiet Port Said. Die betrachtete Fläche für die Müllsammlung ist 1351 km², mit der Tagesproduktion von 422 Tonnen. 56% ist der Haushaltsabfall und der Rest ist der Betriebsabfall von Industriegesellschaften wie Nahrungsmittel-, Chemie- und Zigarettenproduktion. Das Ziel dieser Studie soll die Entwicklung eines Modells für die Abfallwirtschaft in Port Said sein. Dieses System verwendet sogenannte Sammelstationen. Daher handelt es sich um ein Sonderfall, da dieses System sehr wenig bekannt und verbreitet ist. „The proposed model will be optimized by minimizing the municipal solid waste management system cost using mixed integer programming.“⁹²

Die Standortplanung für diese Sammelstationen wird so gewählt, damit die Systemkosten in der Zukunft minimal werden. Für die Wahl von diesem Sammelsystem hat man sich entschieden, weil in den meisten ägyptischen Städten keine Mülltrennung betrieben wird. Es werden daher alle Abfallsorten wie Industrieabfall, Bauabfall und auch das Abbruchmaterial zu der nächsten Sammelstation gebracht. In der folgenden Abbildung kann man sehen, wie die einzelnen Prozesse in diesem System ablaufen.

Abbildung 3: Three-dimensional model



Quelle: Badran, El-Haggar (2006) S. 537

Der Haushalt-, der Industrie- und der Kommunalabfall werden von den einzelnen Müllproduzenten angesammelt und zu den Sammelstationen gebracht. Von diesen

⁹² Badran, El-Haggar (2006) S. 535

Anlagen wird anschließend der ausgesonderte Abfall weiter behandelt. Es handelt sich um kein besonders entwickeltes System. Der Bioabfall und ähnliche Stoffe landen in einer Kompostierungsanlage, der andere Rest- und Gefahrmüll wird auf einer Deponie abgelegt. Wiederverwertbare Stoffe werden in diesem Fall leider nicht gesondert behandelt.

Die Sammeltätigkeiten erledigen kleine „pick-up“ Fahrzeuge mit der Kapazität von einer Tonne. Dieselben Fahrzeuge sind ebenfalls für den Transport von dem Bauabfall, dem Abbruchmaterial und dem gefährlichen Müll von Sammelstationen zur Mülldeponien zuständig. Es gibt noch andere „flat-bed“ Umzugsfahrzeuge mit der Kapazität von 5 Tonnen, die den Transport von großen Containern zwischen den Sammelstationen, der Kompostanlage und der Mülldeponie durchführen.

Die Sammelstationen sind selbständige Anlagen, die verschiedene Container beinhalten. Es handelt sich um ein für diesen Zweck erbauten Raum, der über einen Kran verfügt. Dieser zweiachsige Kran ist auf der Oberdecke installiert und ist für drei bestimmte Zwecke vorgesehen. Erstens schiebt man die vollgeladenen Container heraus und gibt die leeren auf deren Ort. Zweitens dient diese Anlage zum Auslehren von Containern von Sammelwägen, und diese werden dann auf Knopfdruck in den entsprechenden Container ausgeleert werden. Im zweiten Schritt werden diese wieder auf die Fahrzeuge zurückgebracht. Die letzte Tätigkeit ist die Aufladung von den großen Containern auf die Containerfahrzeuge, und des Weiteren werden diese gefüllten Behälter zur Mülldeponie oder zur Kompostierungsanlage gefahren. In der Sammelstation befinden sich folgende Containervariationen und Größen, die man es als 3-dimensionales Modell nennt:

- ❖ 4 gleiche 5-Tonnen Metallcontainer stehen ganz vorne
- ❖ 3 kleine 1-Tonne Container für den Bau- und Abrissabfall stehen hinter den großen Behältern
- ❖ 3 Polyethylen-Mülltonnen auf Rädern für den gefährlichen Abfall⁹³

Das Ziel ist es eine optimale Anzahl und Standortwahl von diesen Sammelstationen zu finden, um im Endeffekt die Gesamtkosten zu minimieren. Diese Kosten bestehen aus zwei wichtigen Komponenten. Erstens unterscheiden wir die anlageabhängigen Kosten,

⁹³Vgl. Badran, El-Haggag (2006) S. 537

auf der anderen Seite müssen noch die Betriebs- oder Operationskosten berücksichtigt werden. Zu den erstgenannten Kosten zählen die Transportkosten, sowie die betriebsfixe und –variable Kosten. Die anderen sind eher die Administration, die Personalbekleidung, aber auch die Anschaffung von allen Containern.

„The cost that is dependent on facilities is minimized by the mixed integer model, while the other cost is added to the minimized cost to obtain the minimized total system cost.“⁹⁴

Um dieses Problem lösen zu können hat man ein Mixed integer programming model entwickelt. Es handelt sich um eine Variante, mit einigen Variablen als reale Zahlen. Bei den anderen Variablen muss zumindest eine ganzzahlig sein. Sehr oft wird in solchen Modellen eine binäre Variable verwendet, die Werte von 0 oder 1 einnehmen kann. Dies richtet sich danach ob die entsprechende Tätigkeit aktiv ist oder nicht. Es sind folgende Annahmen für die Programmierung gegeben:

- ❖ Die Sammeleffektivität muss 100% sein
- ❖ Die Fixkosten von Sammelstationen, Mülldeponie, Kompostierungsanlage sind bekannt
- ❖ Ebenfalls die variablen Kosten von diesen Anlagen sind gegeben
- ❖ Personal- und Fahrzeugkosten sind proportional zur Reisezeit und Lademenge
- ❖ Einzelne Entfernungen für die Distanzmatrix sind nach der euklidischen Methode gerechnet
- ❖ Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist 25 km/h für die Sammelfahrzeuge, resp. 35 km/h für die Transportwägen⁹⁵

Die Transportkosten für jede Route sind aus zwei Hauptkomponenten zusammengesetzt. Erstens sind es distanzabhängige Kosten, wobei die anderen nach der Fahrtdauer gerechnet werden. Die Kostenfunktion hat daher diese Form:

⁹⁴ Badran, El-Haggar (2006) S. 537

⁹⁵ Vgl. Badran, El-Haggar (2006) S. 538

$$\begin{aligned}
& \text{Transportkosten pro Tonne} = \text{Transportkosten/Tonne/Stunde} \\
& \quad \times \text{Routendauer in Stunden} \\
& \quad + \text{Transportkosten/Tonne/km} \\
& \quad \times \text{Distanz in km.}^{96}
\end{aligned}$$

Zum Lösen wurde die Software „Modeling Programming Language (MPL)“ verwendet. Dieses Programm setzt für die gemischte ganzzahlige Programmierung hauptsächlich die Methode „branch and bound“ ein. Zum Implementieren des Codes hat man 353 Entscheidungsvariablen und 538 Nebenbedingungen, wobei 44 davon ganzzahlig sind. Die Modellformulierung beansprucht dementsprechend viel Zeit um ein funktionierendes Modell zu erstellen, auf der anderen Seite bekommt man die Lösung auf einem durchschnittlichen Computer in 0,21 Sekunden⁹⁷.

Man hat beim Simulieren von verschiedenen Szenarien diese drei Fragestellungen in den Vordergrund gestellt.

1. Soll der Bauabfall, das Abbruchmaterial und der gefährlicher Müll über Kompostierungsanlage oder direkt zur Mülldeponie transportiert werden?
2. Ist die optimale Kapazität der einzelnen Sammelstellen 10 oder 15 Tonnen?
3. Sollen die einzelnen Abfallsorten nur hauptsächlich über Sammelstationen angesammelt werden?

Man hat zu diesem Problem insgesamt 12 Szenarien mit verschiedensten Kombinationen simuliert. Das beste Modell aus der Sicht der Kostenminimierung hat folgende Parameter:

⁹⁶ Vgl. Badran, El-Haggar (2006) S. 541

⁹⁷ Vgl. Badran, El-Haggar (2006) S. 543

- ❖ 27 Sammelstationen mit der Tageskapazität von 15 Tonnen
- ❖ 2 Sammelstationen, die mit 10 Tonnen pro Tag auskommen
- ❖ 93 Tonnen wurden täglich von Kompostanlage zur Deponie transportiert

Zum Schluss kann man sagen, dass die Gesamtkosten weiter sinken würden, wenn man die Kapazitäten über 15 Tonnen erweitern könnte. Damit würden die Kosten und gleichzeitig die Anzahl der Sammelstationen sinken.

Man findet solche Sammelstationen auch in einigen anderen Ländern, vor allem in China. Tendenziell wird dieses System nicht gerne angewendet, denn diese Anlagen meistens Umweltprobleme mit sich bringen. Gemeint sind typische Ereignisse wie der Gestank, viele Insekten und andere Schädlinge⁹⁸.

⁹⁸ Vgl. Badran, El-Haggar (2006) S. 544

4.3 Containermüllsammlung

4.3.1 *Dynamic routing bei Containermüllentsorgung*

Mit dem wachsenden Stadtverkehr kämpfen fast alle größeren Städte der Welt. In Malmö in Schweden ist es nicht anders. Die Stadt hat sich als Ziel gesetzt, das Jahreswachstum von 5% zu stoppen, oder zumindest so viel wie möglich zu reduzieren. Man hat festgestellt, dass die gesamte Müllentsorgung und damit verbundener Transport 10-15% des Stadtverkehrs darstellen. Die niedrige Geschwindigkeit, zahlreiche Stopps und der Lärm verschärfen die Umweltbedingungen um einiges. Selbst die Politiker sind der Meinung dass sich die Lage alleine durch Anwendung von modernsten Technologien nicht viel verbessert. Es ist vor allem das Verhalten der Bewohner zu ändern.⁹⁹

Es wurde in dieser Stadt ein Experiment durchgeführt, der die elektronische Überwachung der Müllcontainer verwendet. In unserem Probegebiet wurden 3300 Container für das Recyclingmaterial mit dieser Technologie ausgestattet. Im Containerkörper sind 5 Infrarotsensoren eingebaut. Einmal pro Stunde ist das Abfallvolumen kontrolliert und die Messdaten an die Zentrale drahtlos via GSM-Netz abgeschickt. Die Überwachung funktioniert stufenweise, d.h. wenn drei von vier Strahlern gebrochen werden, wird das erste Warnsignal gesendet. In diesem Moment sind ca. $\frac{3}{4}$ des Volumens gefüllt. Das zweite Warnsignal gibt dann an, dass der Container fast voll ist. Ab diesem Zeitpunkt laufen dann zwei verschiedene Fristen, um bestimmte Qualität des Services gewährleisten zu können. Anders ausgedrückt, unter der Woche sollen diese Container innerhalb von 24 Stunden vom zweiten Warnsignal entleert werden. Am Wochenende ist die Frist dagegen 48 Stunden. Ansonsten sind vereinbarte Verzugskosten zu zahlen. Das Ziel dieser Studie ist der Vergleich von verschiedenen routing und scheduling Methoden. Folgende Aspekte sind dabei maßgebend:

⁹⁹ Johansson (2006) S. 875

- ❖ Routing als Organisation von physischem Transfer zwischen verschiedenen geografischen Punkten
- ❖ Scheduling ist die Bestimmung des Zeitplanes für die einzelnen Routen
- ❖ Dynamicity: ist das wichtigste Aspekt in dieser Problemstellung, denn die konstanten Änderungen von gesammelten Daten erfordern ständige, dynamische Betrachtung von den oben genannten Scheduling und Routing¹⁰⁰

In diesem Kontext wird VRP sowie VSP angewendet, welches eigentlich die Erweiterung von VRP darstellt. Es sind zusätzlich Zeitrestriktionen und Zeitspannen angegeben. In Zusammensetzung mit den modernsten Technologien, wie geografisches Informationssystem GIS und GPS für die Positionsangabe, vereinfachen erheblich die erwähnten Methoden die dynamische Betrachtung des Problems. *Dynamic data* sind charakterisiert als ständig ändernde Werte und beinhalten z.B. reale Verkehrsdaten, Kundennachfrage, sowie die Lenker- und Fahrzeugdaten.¹⁰¹

Beim Simulieren von verschiedenen Modellen betrachten wir hauptsächlich die Container, die Sammelfahrzeuge und die Recyclinganlagen. Die mit Sensoren ausgestatteten Container sind meistens in sogenannten Recyclingstationen positioniert, um diverse Materialien wie Altpapier, Glas, Metall oder Plastik separat ansammeln zu können. Man hat folgende Angaben zur Verfügung:

- ❖ Recyclingcontainer mit Kapazität von 2500 kg
- ❖ Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrzeugen von 20 km/h
- ❖ Servicezeit bei einem Container beträgt 2,5 min, in Recyclinganlagen 10 min
- ❖ Fahrtkosten werden mit 0,6 € pro gefahrenen Kilometer bewertet
- ❖ Stundenkosten pro gesamte Fahrzeugflotte beträgt € 39,-

Für die Bewertungen und die Evaluierung wurden vier verschiedene Modelle erstellt.

¹⁰⁰ Vgl. Johannson (2006) S. 876

¹⁰¹ Vgl. Johannson (2006) S. 876

1. *Static scheduling and static routing*

Hier wurde einfach das verwendete Modell praktiziert. Man rechnet mit fix angegebenen Sammeltagen und Routen. Ein heuristisches Verfahren für das statische Problem wurde angewendet. Damit wird anfangsweise eine optimale Sammelfrequenz kalkuliert, gefolgt von der Gruppierung der Sammeltagen und der Containern. Das Ziel ist die Minimierung der Gesamtkosten pro Zeitperiode¹⁰².

2. *Dynamic scheduling and dynamic routing to full containers*

Um überfüllte Container und damit verbundene Straffzahlungen vermeiden zu können, sind die Routen dynamisch geregelt. Während der Woche ist es nötig, innerhalb von 24 Stunden die vollen Container zu entleeren. Dagegen gilt am Wochenende eine verlängerte Frist auf 48 Stunden. Aus diesem Grund wird an Freitagen etwas anderes System angewendet und schon bei $\frac{3}{4}$ Ladungen ausgeleert. Um dieses System problemlos anwenden zu können, nehmen wir an, dass wir genügend Arbeitskraft und Fahrzeuge für die Spitzenzeiten haben.

3. *Dynamic scheduling and dynamic routing to „almost“ full containers*

Es ist sehr ähnlich dem zweiten Modell. Die Fahrzeuge werden nicht ausschließlich zu den vollen Containern geschickt. Es wird so eine Tour gebildet, damit auch Container mit einer vorher bestimmten Volumengrenze erfasst werden. Diese Grenze wird stetig mittels der gesammelten Daten festgelegt. Das Ziel von diesem Verfahren ist eine noch effektivere Ausnutzung der Sammelwägen als die zweite Methode.

4. *Static scheduling and dynamic routing to “almost” full containers*

Diese letzte Vorgehensweise baut auf dem Model Nr. 1 unter Verwendung der gleichen Logik wie die 3. Methode. Wenn das Fahrzeug schon unterwegs ist, und die Zentrale eine Warnmeldung bekommt, dann wird keine Umgestaltung der Route gemacht. Man

¹⁰² Vgl. Johannson (2006) S. 879

will die Vorteile der statischen Planung ausnutzen, aber für die zukünftige Planung die real-time Daten verwenden, um Verbesserungen zu erreichen¹⁰³.

Nach der Simulation von diesen Szenarien kommt man auf viele wichtigen Tatsachen. Die dynamische Methode Nr. 2 verfügt über die größte Containerausnutzung, obwohl bei kleineren Systemen die Tourenfrequenz und gefahrene Distanzen steigen. Damit sinkt natürlich die Fahrzeugauslastung. Dagegen kann man größere Systeme mit der zweiten Methode optimal modellieren. Kleinere Systeme sind am besten mit den Modellen Nr. 1 und 2 zu lösen, wobei Modell 1 besser als das andere ist. In absoluten Zahlen ist dagegen das dritte System am effektivsten, denn die Sammel- und Transportkosten um 17%, die Anzahl des Stopps bei Containern um 14% und die Operationskosten um 15% niedriger sind. Die wichtigste Erkenntnis dieser Studie ist: „it can be concluded that dynamic scheduling and routing policies exist that have lower operating costs, shorter collection and hauling distances, and which collect fewer containers compared to the static policy employed by many waste collection operators, for all system sizes and realistic levels of variation.“¹⁰⁴

Grundsätzlich kann man sagen, dass *dynamic scheduling and routing* die beste Methode für die Kostenreduktion bei unregelmäßiger Nachfrage.

¹⁰³ Vgl. Johannson (2006) S. 880

¹⁰⁴ Johannson (2006) S. 884

4.3.2 *Vehicle routing in the 1-skip collection problem*

Eine weitere Containermethode wurde in dieser Studie vorgestellt. Das Gebiet Brescia in Norditalien wurde näher untersucht, die zurzeit verwendete Sammelmethode analysiert und einige Verbesserungsvorschläge entwickelt. Der Müll ist bei bestimmten Orten und Kunden in großen Containern, sogenannten „skips“ gesammelt und muss zu verschiedenen Entsorgungsstellen je nach Abfallart transportiert werden. Es ist eine Mülltrennung vorgeschrieben, daher müssen die einzelnen Container nur eine Abfallart enthalten. Grundsätzlich unterscheiden Archetti, Speranza (2004) in diesem Kontext zwei verschiedene Kundengruppen. Die Kunden mit einer fixen Sammelfrequenz, wobei die anderen nur dann bedient werden, wenn die Container voll werden. Gleichzeitig ist eine wichtige Bedingung zu berücksichtigen, denn bei Verspätungen der Müllabfuhr die Strafkosten zu bezahlen sind. Eine andere wichtige Restriktion sind die Zeitfenster bei den Kunden und Betrieben, welche ebenfalls streng einzuhalten sind. Das Ziel ist die Gesamtkosten zu minimieren. Diese sind durch die Summe der Fixkosten, sowohl als auch der Strafkosten gegeben.¹⁰⁵

Das Problem in diesem Zusammenhang ist als 1-skip collection problem (1-SCP) genannt. Diese Applikation ist eigentlich als klassisches VRP zu sehen, wobei gewisse Ähnlichkeit mit dem Rollon-Rolloff vehicle routing problem (RRVRP) von Ball et al.¹⁰⁶ vorhanden ist.

Um dieses Problem lösen zu können wurde ein SMART-COLL Algorithmus angewendet. Es handelt sich um ein heuristisches Verfahren, das in mehreren Phasen arbeitet. Erstens wird eine zulässige Startlösung gesucht und wenn diese gefunden wird, setzen wir mit einem Verbesserungsverfahren fort. Die Grundstruktur des Algorithmus sieht folgendermaßen aus:

- ❖ Subset von Containern mit hoher Priorität wird gesucht
- ❖ Eine zulässige Startlösung anhand von Subset von Containern der ersten Phase wird konstruiert
- ❖ Diese gefundene Lösung wird verbessert

In der ersten Phase suchen wir nach Subsets mit der höchsten Priorität, um die Strafkosten damit zu reduzieren. Man verwendet für die Routenbildung eine cheapest

¹⁰⁵ Vgl. Archetti, Speranza (2004) S. 717

¹⁰⁶ Ball et al. (2000)

insertion Methode. Die erste Phase und damit eine Startlösung ist gefunden, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist.

- ❖ Alle Container mit der Nachfrage für den bestimmten Tag sind befriedigt
- ❖ Oder man hat keine Fahrer mehr zur Verfügung für diesen Zeitraum
- ❖ Es gibt keine anderen Container mit unbefriedigter Nachfrage vorhanden

Im letzten Schritt werden dann diese Lösungen im Verbesserungsverfahren weiter behandelt. Anfangs versuchen wir die Anzahl der Fahrzeuge zu reduzieren, indem man Routen mit Restkapazitäten zusammenfügt. Anschließend werden die nicht eingeordnete Container zu den Routen mit noch offener Kapazität zugeteilt. Als letzter Schritt wird dann die Arbeitszeit auf ein Minimum reduziert¹⁰⁷.

Für unseren Fall in Brescia sind folgende Daten zur Verfügung:

- ❖ Die Anzahl der Fahrer variiert tagaus und man kennt nur die Fixkosten von € 72,-
- ❖ Die Fahrzeugkapazitäten sind denkbar einfach: 1 skip pro Fahrzeug
- ❖ Verschiedene Abfallsorten sind zu behandeln
- ❖ Die Schichtzeiten betragen 6 Stunden mit maximal 2 Überstunden, wobei 2 Schichten pro Tag vorgesehen sind
- ❖ Zwei verschiedene skips sind vorhanden, mit 10 m³ bzw. 20 m³
- ❖ Man muss mit verschiedenen Zeitfenstern arbeiten, diese sind je nach Kunde und Betrieb verschieden
- ❖ Kunden mit variablen Nachfrage sind innerhalb von 2 Tagen nach Erhalt der Meldung zu befriedigen
- ❖ Im Durchschnitt rechnen wir mit einer Servicezeit von 15 Minuten für das Auf- und das Entladen der Container
- ❖ Variable Kosten betragen € 12,- pro Stunde, bzw. €15,6 für eine Überstunde.

Man hat unsere Methode für einen Zeitraum von 14 Arbeitstagen getestet. Wenn wir nun die Daten von der Simulation und der alten Methode vergleichen, bekommen wir folgende Unterschiede. Die Kosten sinken ca. um 3%, wobei gleichzeitig 32 Container mehr bedient werden. Das entspricht einer Kostensenkung von 11,27% gegenüber der

¹⁰⁷ Vgl. Archetti, Speranza (2004) S. 721

alten Methode. Der neue Algorithmus zeigt, dass die neue Lösung die Kosten reduziert und gleichzeitig den Servicegrad wesentlich verbessert¹⁰⁸.

¹⁰⁸ Vgl. Archetti, Speranza (2004) S. 727

4.3.3 Locating landfills – Optimization vs. Reality

Es wurde eine Studie durchgeführt, die sich mit der Frage der Standortbestimmung von neuen Mülldeponien beschäftigt. Man hat ein reales Problem in New Brunswick in Kanada in dieser Arbeit angewendet. In diesem Gebiet leben ca. 750.000 Einwohner auf der Fläche von 72.500 km². Noch vor ungefähr 20 Jahren hat man in dieser Region Hunderte von verschiedenen Deponien genutzt. Immer strengere Vorschriften und Gesetze zwingen die Gemeinden und Entsorgungsunternehmen zum Aufbau von sehr großen Deponien, denn bei den Kleinen ist es ökonomisch nicht mehr relevant. Dies führt aber zu dem Ausbau von Mega-deponien, was auf der anderen Seite die Transportdistanzen vergrößert. Damit steigt dann auch der Bedarf an Transferstationen, wo der Müll von kleineren Sammelfahrzeugen auf große Containerwägen umgeladen wird.¹⁰⁹

Deswegen steigt heute die Bedeutung von richtiger Standortplanung, damit in der Zukunft die nötigen Routenlängen möglichst gering bleiben. Um eine reale Straßen-Entfernungs-Matrix zu bekommen, wurde wiederum das GIS-System angewendet. Man hat das System als ARP formuliert und als gemischtes ganzzahliges Problem gelöst. Im Modell wurden 813 Tausend Variablen, 186 binäre Variablen und 17.393 Restriktionen enthalten. In der Summe hat man 22 verschiedene Szenarien gerechnet¹¹⁰.

Nach der Simulation konnte man feststellen, dass die meisten Szenarien eine Kostensenkung im Vergleich zu laufendem Modell von 10% bis zu 40% aufweisen. Man kann ein Beispiel nennen, wo nur sechs Mülldeponien und neun Transferstationen im ganzen Gebiet im Betrieb wären¹¹¹.

¹⁰⁹ Eiselt (2007) S. 1040

¹¹⁰ Vgl. Eiselt (2007) S1045

¹¹¹ Vgl. Eiselt (2007) S1048

4.3.4 Abfallmanagement in Pakistan – ein Sonderfall

Es gibt auf der Welt immer noch einige Orte, an denen man bei der Müllentsorgung ganz triviale Probleme lösen muss. Ein solcher Fall ist die Stadt Lahore in Pakistan. Die Studie beschreibt detailliert die schlechte Umweltsituation in diesem Gebiet und erwähnt ganz konkret die Problematik der Müllabfuhr, welche sehr großes Verbesserungspotenzial aufweist. Die zurzeit verwendete Großcontainer-Methode ist der einzige Einsammlungsweg, wobei die Effektivität rund um 60% liegt. Man kämpft in dieser Region mit der Moral der Einwohner und der Schwarzdeponien. Es ist nämlich kein Ausnahmefall, dass die Bewohner den Müll einfach rund herum um die Container werfen, obwohl es gar nicht voll ist. 40% des Mülls liegt einfach auf den Straßen. Man will in dieser Studie das Verhalten der Menschen beobachten und analysieren und im nächsten Schritt ein nicht allzu aufwändiges Verbesserungsmodell entwickeln bzw. adaptieren. Man wird sich weiter nur mit der Müllabfuhr beschäftigen¹¹².

Im laufenden Modell werden hauptsächlich zwei Arten von Containern verwendet:

129 Stück von 5 m³

120 Stück von 10 m³

Diese werden mit Hilfe von Containerfahrzeugen innerhalb einer Woche abgeholt, entleert und wieder auf dieselbe Stelle zurückgebracht. Gleich vorweg müssen wir andeuten, dass man die Verwendung von großen Containern in der Zukunft vermeiden will, denn diese zu hoch sind. Die Praxisforschung zeigt nämlich, dass sehr oft die Kinder den Abfall herausbringen und wegen der Höhe von 1.8 m werfen sie den Müll einfach rundherum.

Es gibt drei Sammelsysteme derzeit in Lahore:

- ❖ Private Sammler holen den Abfall bei Häusern und Geschäften mit Handkarren ab und bringen es zu Großcontainern
- ❖ Die Haushalte und die Geschäfte bringen den Abfall selbst zu den Containern
- ❖ Private Firma fährt von Haus zu Haus und sammelt den ganzen Müll, der dort herumliegt

¹¹² Vgl. Batool, Nawaz (2009) S. 1971

Bei der ersten Methode handelt es sich um kein organisiertes System, denn diese Leute sind im Laufe des Jahres unentgeltlich tätig und verdienen hauptsächlich nur vom Verkauf von Recyclingware. Sie bekommen meistens von den Haushalten und Geschäften nur kleine Geldgeschenke zu den Weihnachtszeiten.

Die zweite Methode ist ein reiner Containertransport, wobei kein bindender Zeitplan existiert. Die einzige befolgte Regel ist, dass die Sonntage als Ruhetage bleiben. Im Großen und Ganzen stehen 94 Fahrzeuge zur Verfügung, welche diese 2 Containerarten bedienen können. Im Durchschnitt werden 6 Fahrten pro Tag und Fahrzeug gemacht. Für die Datensammlung für unsere Modellierung hat man leider keine Anzahl der gefahrenen Kilometer feststellen können, denn bei den meisten Fahrzeugen funktionieren die Tachografe nicht. Man kann sich nur nach dem verbrauchten Kraftstoff orientieren. Dies ist wiederum keine objektive Methode, denn die Fahrer entladen häufig die Container irgendwo in der Nähe von den Schwarzdeponien oder stehlen auch den Sprit¹¹³.

Um jetziges und neu entwickeltes System zu vergleichen, hat man nur die Fahrtkosten pro gesammelten Müll feststellen können. Andererseits versuchen Batool, Nawaz (2009) die Sammelrate möglichst viel zu erhöhen. Um es zu erreichen, rechnen sie in diesem neuen Modell nur mit den kleineren Containern von 5 m³. Auf der anderen Seite ist die Handhabung etwas einfacher und die verwendeten Fahrzeuge sind ebenfalls sparsamer. In dem neu entwickelten Modell wurde mit 548 Containern mit 5-Tonnen Kapazität gerechnet. Man hat eine eigene Verteilungsmatrix mit Hilfe von GIS zusammengestellt. Die Sammelfahrzeuge fahren in genau vorgeschriebenem Routenplan die Straßen durch. Im Schnitt rechnet man mit einer Fahrtfrequenz von 7,7 pro Tag und Fahrzeug.

Es handelt sich um keinen reinen Optimierungsprozess. Man hat einfach nur die Situation beobachtet und das offensichtlich schlechte System etwas rational umgestaltet. Die Ergebnisse liefern ganz eindeutige Verbesserung. Die Kosten pro gesammelte Tonne sind von \$10,27 auf \$8,30 gesunken. Das Modell könnte man mit Hilfe von einer Heuristik natürlich besser anwenden. Dazu bräuchte man aber noch mehr Daten, die nicht vorhanden sind. Jedoch bewegt sich diese Modellierung nur auf der Theorieebene, da die politische und die ökonomische Situation, und zusätzlich das Verhalten und die

¹¹³ Vgl. Batool, Nawaz (2009) S. 1977

Mentalität der Einwohner, zurzeit nicht in der Lage sind, es zu unterstützen. Generell kann man aber sagen, dass es in solchen Ländern viel größere Verbesserungsmöglichkeiten gibt¹¹⁴.

„People in general do not cooperate with the sanitary workers and staff, and are not fully aware of the health and social problems associated with solid waste management.“¹¹⁵

¹¹⁴ Vgl. Batool, Nawaz (2009) S. 1979f

¹¹⁵ Vgl. Batool, Nawaz (2009) S. 1980

5. SCHLUSSWORT

Man hat aus dieser Diplomarbeit erfahren, dass die Problematik der Müllabfuhr und damit verbundenen Tätigkeiten der gesamten Abfallwirtschaft ein sehr umfangreiches Themengebiet ist. Global gesehen handelt es sich weltweit um Milliarden Tonnen an Müll, es kostet Milliarden Euro den Abfall anzusammeln, verarbeiten und entsorgen. Und weltweit sind es Millionen Menschen, die an diesen Tätigkeiten beteiligt sind. Daher sollen wir entsprechend dieser Dimension ausreichend Aufmerksamkeit dem Problem widmen.

In erster Linie sind es die Finanzierungsmittel, die in der heutigen Zeit so wichtig und sehr knapp werden. Auf der anderen Seite sind es dann natürlich die Umweltbedingungen, Hygienemaßnahmen und damit verbundener Lebensstandard. Die Aufgabe in meisten Fällen ist, alle definierten Vorschriften und Maßnahmen einzuhalten und gleichzeitig die damit verbundenen Kosten so viel wie möglich zu minimieren.

Es ist nicht einfach ein Kompromiss zu finden. Man hat heute aber sehr viele Instrumente zur Verfügung, um sehr gute Modelle entwickeln zu können. Man kann zwei verschiedene Wege wählen. Entweder entwickelt man gleich am Anfang ein gutes Model, oder man ist in den meisten Fällen gezwungen, die laufenden Modelle zu ändern und zu verbessern. In dieser Arbeit hat man unterschiedliche, bereits eingeführte Modelle analysiert und einige Verbesserungsmodelle entwickelt, welche die alten ersetzen könnten, um Kosten einzusparen oder um die Effektivität zu erhöhen. Man wurde mit den unterschiedlichsten Problemstellungen konfrontiert. In einigen Fällen ist es einfacher und in anderen dagegen fast unmöglich zu einem besseren Modell unter gegebenen Bedingungen zu kommen.

Man hat verschiedene Lösungsverfahren angewendet. Grundsätzlich handelt es sich in allen Fällen um die Transportproblematik und damit verbundenen Routingprobleme. Man hat gesehen, dass man mit exakten Methoden in diesen Fällen nicht weit kommt, denn die Formulierungen und anschließend die Rechenzeiten für unsere Zwecke einfach nicht in akzeptabler Zeit zu lösen sind. Daher greift man hier zu heuristischen Methoden, welche die größte Anwendung für solche Problemstellungen haben. Gewiss sollte man auch die Metaheuristiken erwähnen. Sie sind aber etwas umständlicher und

finden bis heute sehr wenig Anwendung, weil es sich um sehr junge Verfahren handelt. Man muss allerdings sagen, dass die Zukunft eine breite Anwendung sicherstellt.

In unseren Modellen hat man sich auf die Verbesserung und Effektivität der Müllabfuhr konzentriert. Die Zielsetzung war in meisten Fällen die Kostenminimierung, denn dieses Kriterium scheint als das Wichtigste zu sein. Natürlich sind andere wichtige Restriktionen simultan einzuhalten. Man kann auf vielen Beispielen sehen, dass verwendete Systeme in manchen Fällen sehr schlecht funktionieren und sehr großes Verbesserungspotenzial aufweisen. Man muss allerdings gleich vorweg sagen, dass es sich in vielen Fällen um sehr alte Modelle handelt, die eigentlich manuell oder mit Hilfe von einfachen Optimierungstechniken modelliert wurden. Heute verfügt man über leistungsfähige Informationstechnologien, welche sehr umfangreiche Problemstellungen in kurzer Zeit lösen können. Genauer gesagt handelt es sich um Implementierung von schon entwickelten Modellen. Der Vorteil besteht darin, dass man in der Lage ist mit Hilfe von Computern diese, manuell unlösbare Aufgaben, zu lösen.

Zum Schluss kann man sagen, dass diese Arbeit einen Überblick von derzeit bekannten und angewendeten Systemen darstellt. Man hat gesehen, dass es in vielen Fällen noch viel zu verbessern ist. Es gibt vor allem sehr viele Entwicklungsländer, die sich zurzeit mit der Abfallpolitik sehr wenig oder gar nicht beschäftigen. Daher gerade in solchen Fällen wird es noch sehr viel Anstrengung kosten, funktionierende Modelle zu entwickeln und in die Praxis zu implementieren.

In vielen Fällen können die schon bekannten Modelle als eine sehr gute Grundlage für weitere Forschungstätigkeiten in der Zukunft dienen.

Literaturverzeichnis

Alagöz A. Z., Kocasoy G., Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in Istanbul, *Waste Management* 28 (2008) 1461-1471.

Angelelli E. and Speranza MG(a), The application of a vehicle routing model to a waste-collection problem: two case studies, *Journal of the Operational Research Society* 53 (2002), 944-952.

Angelelli E. and Speranza MG(b), The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities, *Journal of the Operational Research* 137 (2002), 233-247.

Archetti C., Speranza M.G., Vehicle Routing in the 1-Skip Collection Problem, *The Journal of the Operational Research Society* 55 (2004), 717-727.

Badran M.F., El-Haggar S.M., Optimization of municipal solid waste management in Port Said – Egypt, *Waste Management* 26 (2006), 534-545.

Ball M., Bodin L., Baldacci R. and Mingozzi A., The rollon-rolloff vehicle routing problem, *Trans Sci* 34 (2000), 271-288.

Bankhofer U., Wilhelm M., Willinger G., Modelle und Methoden der Tourenplanung, *Arbeitsbericht Nr. 2006-05* (2006).

Batool S. A., Nawaz Ch M., Municipal solid waste management in Lahore City District, Pakistan, *Waste Management* 29 (2009), 1971-1981.

Byung-In Kim, Seongbae Kim, Surya Sahoo, Waste collection vehicle routing problem with time windows, *Computers & Operations Research* 33 (2006), 3624-3642.

Christofides N. and Beasley J. E., The Period Routing Problem, *Department of Mangement Science, Networks* 14 (1984), 237-256.

Clarke G. and Wright J. W., Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Res.* 12 (1964), 568-581.

- Cordeau J.F., Gendreau M., Laporte G., A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks* 30 (1997), 105–119.
- Del Pia A., Filippi C., A variable neighborhood descent algorithm for a real waste collection problem with mobile depots, *International Transactions in Operational Research* 13 (2006), 125-141.
- Eiselt H.A., Locating landfills – Optimization vs. reality, *European Journal of Operational Research* 179 (2007), 1040-1049.
- Freling R., Wagelmans A., Paixão J. M., Models and algorithms for single-depot vehicle scheduling, *Transportation Science* 35 (2001), 165-180.
- Ghiani G., Guerriero F., Improta G., Musmanno R., Waste collection in Southern Italy: solution of a real-life arc routing problem, *International Transactions in Operational Research* 12 (2005), 135-144.
- Golden B.L., Dearmon J.S., Baker E.K., Computational experiments with algorithms for a class of routing problems, *Computers and Operations Research* 10 (1) (1983), 47–59.
- Golden B.L., Wong R.T., Capacitated arc routing problems, *Networks* 11 (1981), 305–315.
- Golden B.L., Wong R.T., Capacitated arc routing problems, *Networks* 11 (1981) 305-315.
- Hemmelmayr V.C., Doerner K.F., Hartl R.F., A variable neighborhood search heuristic for periodic routing problems, *European Journal of Operational Research* 195 (2009), 791–802.
- Hertz A., Laporte G., Mittaz M., A tabu search heuristic for the capacitated arc routing problem, *Operations Research* 48 (2002), 129-135.
- Hertz A., Mittaz M., A variable neighbourhood descent algorithm for the undirected capacitated arc routing problem, *Transportation Science* 35 (2001), 425–434.
- Hirabayashi R., Saruwatari Y., Nishida N., Tour construction algorithm for the capacitated arc routing problem, *Asia-Pacific Journal of Operational Research* 9 (1992), 155–175.

Ho W., Ho G., Ji P., Lau H., A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem, *Applications of Artificial Intelligence* 21 (2008), 548-557.

Johansson O. M., The effect of dynamic scheduling and routing in a solid waste management system, *Waste Management* 26 (2006), 875-885.

Kytöjoki J., Nuortio T., Bräysy O., Two Efficient Metaheuristics for Huge Scale Vehicle Routing Problems, Working paper, Department of Environmental Sciences, University of Kuopio (2004), Finland.

Lacomme P., Prins C., Ramdane-Cherif W., Competitive Genetic Algorithms for the Capacitated Arc Routing Problem and its Extensions, *EURO-GP* (2001).

Lacomme P., Prins C., Ramdane-Cherif W., Competitive memetic algorithms for arc routing problems, *Annals of Operations Research* 131 (2004), 159–185.

Lacomme P., Prins C., Ramdane-Cherif W., Evolutionary algorithms for periodic arc routing problems, *European Journal of Operational Research* 165 (2005), 535-553.

Laporte Gilbert, What You Should Know about the Vehicle Routing Problem, Wiley Periodicals, Inc. *Naval Research Logistics* 54 (2007), 811-819.

Li Jing-Quan, Borenstein D., Mirchandani P. B., Truck scheduling for solid waste collection in the City of Porto Alegre, Brazil, *Omega-International Journal of Management Science* 36 (2006), 1133-1149.

Nuortio T., Kytöjoki J., Niska H., Bräysy O., Improved route planning and scheduling of waste collection and transport, *Expert Systems with Applications* 30 (2006), 223-232

Nuortio T., Niska H., Hiltunen T., Kolehmainen M., Using operational data and neural networks to predict waste formation and collection travel times, Working paper, Environmental Informatics, University of Kuopio (2004), Finland.

Pearn W.L., Assad A., Golden B.L., Transforming arc routing into node routing problems, *Computers and Operations Research* 14 (1987), 285–288.

Russell A. and Igo W., An assignment routing problem. *Networks* 9 (1979), 1-17.

Surya Sahoo, Seongbae Kim, Byung-In Kim, Routing Optimization for Waste Management, Institute of Information Technology, Interfaces 35 (2005), 24-36.

Tan K. C., Lee L. H., Zhu Q. L., Ou K., Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows, Artificial Intelligence in Engineering 15 (2001), 281-295.

Tanskanen J., H., Kaila J., Comparison of methods used in the collection of source-separated household waste, Waste Management Research 19 (2001), 486-497.

Tung D., Pinnoi A., Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi, European Journal of Operational Research 125 (2000), 449-468.

Anhang A: Abstract

Der stetig wachsende Lebensstandard hat in der heutigen Zeit viele negative Nebenerscheinungen zur Folge. Einer dieser Effekte ist die steigende Müllproduktion. Die ganzheitliche Müllbehandlung, vor allem in den hochentwickelten Ländern, verursacht enorme Kosten. Das Ziel dieser Arbeit ist nicht die produzierten Mengen von Müll zu reduzieren, sondern einen möglichst breiten Überblick über die bisher entwickelten Methoden der Müllabfuhr und der Müllbehandlung darzustellen. Es wurden die verschiedensten Transportmodelle entwickelt, die gezielt an die Müllabfuhr angepasst sind. Der Grundbaustein von diesen Methoden ist das Vehicle Routing Problem und das Arc Routing Problem. Es gibt bereits eine Vielzahl an Variationen von Methoden, um die unterschiedlichsten Problemstellungen zu erfassen. Je nach konkretem Bedarf können die bereits bekannten und entwickelten Methoden meistens relativ einfach angewendet werden. Die Zielsetzung bei jeder Anwendung ist zweifellos ein gut funktionierendes System zu bilden, damit die gesamten Müllbehandlungskosten möglichst viel reduziert werden. Die Grundidee der Transportplanung ist einen effektiven Routenplan zu entwickeln, wobei das schnellste oder kostengünstigste Transportmodell anzustreben ist. Es gibt verschiedene Verfahren. Die Anwendung von einem bestimmten Lösungsverfahren legt vor allem die Komplexität von jedem konkreten Fall fest. Grundsätzlich werden drei große Untergruppen an Lösungsmethoden unterschieden. Exakte Verfahren ermöglichen bei eher kleineren und einfacheren Problemstellungen eine optimale Lösung zu finden. Bei komplizierteren Aufgaben mit mehreren Variablen und Restriktionen kann man derartige Probleme nur mit der Anwendung von heuristischen Ansätzen modellieren. Nur dann ist es möglich in akzeptabler Rechenzeit gute und nicht zu weit vom Optimum entfernte Resultate zu generieren. Ferner werden die oben beschriebenen Verfahren durch die modernsten Ansätze ergänzt, den sogenannten Metaheuristiken. Anschließend werden zahlreiche reale Tourenplanungsprobleme und Case Studies vorgestellt, um von diversen Gebieten je ein praktisches Beispiel der Methodenanwendung aufzuzeigen. Dadurch wird darlegt, dass es möglich ist für jede Problemstellung ein geeignetes Modell zu entwickeln, welches im Endeffekt die finanzielle Mittel oder den Zeitfaktor einsparen kann.

Anhang B: Lebenslauf

Name: Martin Štěpán
Geburtsdatum: 17. November 1979
Geburtsort: Třebíč, Tschechische Republik
Nationalität: Tschechisch

-Ausbildung-

2001/09 bis 2010/06 Internationale Betriebswirtschaft, Universität Wien
Spezialisierung: Transportation Logistics, Production Management
2001/06/08 Abitur, Bundeshandelsakademie in Retz: Bilinguale Klasse
1999/04 Englischsprachkurs, University of Cambridge
1995 - 1996 Aufbaujahr in deutscher Sprache, Gymnasium Znojmo, Tschechien
1994-1995 Managerakademie in Jihlava, Tschechien

-Berufserfahrung/Praktika-

Seit 2001 Dolmetscher und Vermittler: Kontaktperson für die Firma
Obalfrukt GmbH, Tschechien, für die Geschäftsbeziehungen
mit dem Ausland, hauptsächlich Österreich
Seit 2010/01 Kreditorenbuchhaltung (Vollzeit)
Service Center, Mann+Hummel GmbH, Deutschland

-Besondere Kenntnisse-

Sprachkenntnisse: Tschechisch (Muttersprache)
Deutsch (fließend in Wort und Schrift)
Englisch (fließend)
Russisch (fortgeschritten)
EDV-Kenntnisse: MS Office (Excel, Word, Powerpoint, Outlook)
SAP Finanzwesen (Schwerpunkt Kreditorenbuchhaltung)
Express IVE (fortgeschritten)
C++ (Basiswissen)