



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Marek Doskočil

**OPTIMALIZACE PROVOZU FLOTILY CHLADÍRENSKÝCH
VOZIDEL**

Diplomová práce

2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K617 Ústav logistiky a managementu dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Marek Doskočil

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – LA – Logistika a řízení dopravních procesů

Název tématu (česky): **Optimalizace provozu flotily chladírenských vozidel**

Název tématu (anglicky): Operation Optimization of a Fleet of Refrigerated Trucks

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Analýza současného stavu, SWOT - analýza provozu chladírenských vozidel
- Matematická formulace problému - Vehicle Routing Problem (VRP) s časovými okny
- Dostupné nástroje
- Vlastní model - vstupy, výstupy, vlastní zpracování
- Experimentální ověření navržené metodiky
- Vyhodnocení efektivity řešení



- Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: GOLDEN, B. L., a ASSAD, A. Vehicle routing: methods and studies. New York, N.Y., U.S.A.: Sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier Science Pub. Co., 1988.
- TOTH, P., VIGO, D. Vehicle routing problems, methods, and applications. Second edition.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Josef Volek, CSc.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2016**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2017**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
doc. Ing. Lukáš Týfa, Ph.D.


vedoucí

Ústavu logistiky a managementu dopravy




.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


.....
Bc. Marek Doskočil
jméno a podpis studenta

V Praze dne 6. června 2017

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji panu doc. Ing. Josefu Volkovi, CSc. za odborné vedení a konzultování diplomové práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostává po celou dobu studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr magisterského studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

„Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).“

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 30. listopadu 2017.

Bc. Marek Doskočil

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

OPTIMALIZACE PROVOZU FLOTILY CHLADÍRENSKÝCH VOZIDEL

diplomová práce
listopad 2017
Bc. Marek Doskočil

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce je minimalizace nákladů provozu flotily chladírenských vozidel dopravní společnosti. V práci je uvedena matematická formulace VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows), aparát a metody Teorie grafů, kterými je možné úlohy dopravní obsluhy území řešit. Ve sledovaném období deseti pracovních dnů byly porovnány trasy sestavené manuálně dispečerem s trasami, které byly vypočteny pomocí metaheuristiky Tabu search a výpočetní techniky. V práci je popsána transformace informací získaných od uživatele do vstupních dat modelu, popis modelu, výsledky výpočtů a jejich interpretace, v neposlední řadě jsou v závěru diplomové práce uvedeny potenciální úspory dopravních nákladů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optimalizace, Teorie grafů, TSP, VRP, VRPTW, problém okružních jízd s časovými okny, exaktní metody, heuristika, metaheuristika, algoritmus, Tabu search.

ABSTRACT

The subject of the master's thesis is the minimization of the costs of operation of the fleet of refrigerated trucks of the transport company. The thesis deals with mathematical formula of the VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows), with the apparatus and methods of Graph theory, which can solve the problems of transport services. In the reference period of ten working days, were compared routes compiled manually by a dispatcher with routes calculated using Tabu search metaheuristics and computing. The thesis describes the transformation of the information obtained from the user into the input data of the model, then there is a model description, the results of the calculation and at the end of the master's thesis there are potential savings in transport costs.

KEYWORDS

Optimization, Graph theory, TSP, VRP, VRPTW, Vehicle Routing Problem with Time Windows, exact methods, heuristics, metaheuristics, algorithm, Tabu search.

OBSAH

1	Úvod	10
2	Analýza současného stavu	11
2.1	Popis společnosti.....	11
2.2	Provoz chladírenských vozidel	11
2.3	Analýza SWOT	12
3	Matematická formulace problému	14
3.1	Základní definice VRPTW.....	16
3.2	Matematický model VRPTW	16
3.3	Zobecnění VRPTW	18
4	Dostupné nástroje pro řešení VRPTW	21
4.1	Exaktní metody	21
4.2	Heuristické algoritmy	22
4.3	Metaheuristiky	27
5	Vlastní model	32
5.1	Popis úlohy.....	32
5.2	Nástroje pro řešení.....	32
5.3	Popis algoritmu	33
6	Experimentální ověření navržené metodiky	39
6.1	Výchozí data	39
6.2	Sestavení tras dispečerem	42
6.3	Tvorba distančních matic.....	43
6.4	Rozmístění zákazníků.....	45
6.5	Časová okna	53
6.6	Vytvoření vstupních dat pro modelové výpočty	54
6.7	Přehled dispečerem sestavených tras.....	54

7	Vyhodnocení efektivnosti řešení.....	61
7.1	Přehled nově navržených tras.....	61
7.2	Porovnání variant.....	68
7.3	Potenciální úspora nákladů.....	74
8	Závěr	75
9	Použité zdroje.....	77
10	Seznam obrázků	78
11	Seznam grafů	79
12	Seznam tabulek.....	80

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

atp.	zkratka výrazu: a tak podobně
MCVRPTW	Multiple Compartment Vehicle Routing Problem with Time Windows
MS Excel	Microsoft Excel – tabulkový procesor od společnosti Microsoft
NP	třída složitosti (zkratka Nedeterministicky Polynomiální)
PR	public relations
SWOT	zkratka slov: Strengths, Weaknesses, Opportunities a Threats – Silné a slabé stránky, příležitosti a hrozby
TSP	Travelling Salesman Problem – Problém obchodního cestujícího
VRP	Vehicle Routing Problem – Problém okružních jízd
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows – Problém okružních jízd s časovými okny

1 ÚVOD

Logistika je definována jako soubor činností, jejichž úkolem je zajistit, aby bylo správné zboží ve správném čase, ve správném množství, ve správné kvalitě na správném místě a se správnými náklady. A právě náklady jsou předmětem zájmu diplomové práce, která vznikala v rámci projektu Optimalizační úlohy na logistickém řetězci.

Cílem diplomové práce je analyzovat stávající provoz flotily chladírenských vozidel, formulovat konkrétní problém, matematicky popsat problém okružních jízd a uvést existující nástroje pro jeho řešení. Dalším cílem této diplomové práce je získat pomocí optimalizační metody Tabu search a její implementace do počítačového programu automatizovaný návrh denních tras vozidel flotily chladírenských vozů a vyčíslit potenciální úspory nákladů, které by díky této optimalizaci vznikly.

Denní trasy vozidel jsou ve firmě BH trans totiž doposud dispečerem sestavovány „ručně“ podle jeho vlastní intuice a zkušeností. To nutně neznamená, že jsou trasy chladírenských vozidel sestavovány špatně, ale existuje prostor, zejména v souvislosti s rozšiřováním aktivit firmy a zvyšování počtu klientů a cílových zákazníků, pro racionalizaci, objektivizaci a automatizaci sestavy tras a plánování denních výkonů flotily chladírenských vozů. V práci budou pomocí sofistikovaných matematických metod a výpočetní techniky navrženy nové trasy a následně bude sledována úspora v porovnání s plánem tras navržených manuálně dispečerem. Koncoví zákazníci, jejich počet a poptávané množství zboží se každý den mění. Proto bylo nutné sledovat provoz delší časové období (byl sledován soubor deseti pracovních dnů), aby výsledky výpočtů a učiněné závěry co nejvíce odpovídaly skutečnosti.

Jednou ze dvou hypotéz, které mají být v práci prokázány, je, že s využitím matematických výpočtů dojde každý den ke snížení celkového počtu ujetých kilometrů a že se průměrná denní úspora bude pohybovat okolo 10 %.

Druhou hypotézou, jejíž platnost má být prokázána, je, že čím větší je počet zákazníků obslužených v jednom dni, nebo čím více kilometrů bylo vozidly celkem ujet, tím větší je počet ušetřených kilometrů díky nově navrženým trasám.

2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

V následující kapitole diplomové práce je stručně popsána společnost BH trans s.r.o. Dále je analyzována oblast jejího podnikání, její služby a využívané technologie. Na závěr kapitoly jsou shrnuty dostupné informace ve formě SWOT analýzy.

2.1 POPIS SPOLEČNOSTI

Společnost BH trans, s.r.o. se sídlem v Telči byla založena dvěma společníky v roce 2012 a v dnešní době zaměstnává již 54 zaměstnanců. Firma se specializuje na přepravu a uskladnění chlazeného či mraženého zboží a přepravu sypkých materiálů pomocí posuvných podlah.

Vozový park se skládá z 50 vozidel různých velikostí a značek. Vozidla jsou vybavena GPS lokátory, digitálními zapisovači teplot a u některých vozidel lze díky speciálním příčkám rozdělit ložnou plochu na dvě části a docílit tak schopnosti převážet zboží, které vyžaduje různé teplotní režimy. Návěsy jsou vybaveny mrazíci agregáty nejvyšší úrovně.

Areál v nedávné době prošel rozsáhlou rekonstrukcí. Zvýšila se kapacita skladovacích prostor s chladicí technologií a na manipulační a parkovací plochy byl položen nový povrch. V areálu je též vlastní čerpací stanice, servis vozidel, pneuservis a myčka vozidel.

V současné chvíli zajišťuje převoz zboží v ČR, na Slovensku, v Rakousku, Německu, Itálii, Francii, Španělsku, Portugalsku a Švédsku.

Hlavními partnery společnosti jsou: Made Group, a.s., MP Krásno, s.r.o., Drůbežářské závody Klatovy, a.s., ČAD Blansko, a.s., Freshlogistik, s.r.o., Váhala a spol., s.r.o., Kronospan CR, s.r.o., Kronospan OSB, s.r.o., Killi, s.r.o., a další.

2.2 PROVOZ CHLADÍRENSKÝCH VOZIDEL

Přeprava chlazeného nebo mraženého zboží od dodavatele k zákazníkovi probíhá tak, že dopravce BH trans dopraví zboží od dodavatele na sídlo firmy do Telče nákladními vozy nebo tahačem s přívěsem. Dále je zboží přes nakládací můstky uloženo do skladu, nebo je rovnou přeloženo do menších vozidel (cross-docking). BH trans nabízí i službu roztřídění a balení na menší jednotky s následnou expedicí. Na základě předem stanovených okružních jízd, kterým jsou přiřazena jednotlivá vozidla, je zboží

roztřídováno a následně expedováno k zákazníkům. Okružní jízdy vytváří dispečer na základě vlastní intuice a nabytých zkušeností.

Vzhledem k neustálému růstu společnosti potažmo obsluze většího množství zákazníků a vzhledem k požadavkům zákazníků na doručení v určitých časových oknech je vhodné použít matematické metody výpočtu lepšího využití vozidel, při zachování časových oken a s minimalizací celkového počtu najetých kilometrů. Bude využito metody známé pod zkratkou VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows).

2.3 ANALÝZA SWOT

K analýze fungování společnosti bude využita metoda SWOT. Jedná se o komplexní metodu kvalitativního vyhodnocení veškerých relevantních stránek fungování společnosti a je nástrojem k tvorbě strategie. V matici se čtyřmi kvadranty jsou definovány silné a slabé stránky společnosti a dále příležitosti a možné hrozby, kterým může společnost čelit. SWOT je zkratka skládající se z počátečních písmen anglických výrazů Strengths, Weaknesses, Opportunities a Threats.

Silné a slabé stránky jsou interními záležitostmi podniku a jsou tedy v přímé kompetenci společnosti. Jedná se například o marketing, financování podniku, dodavatele, personál, vztah se zákazníky atp. Vztah s vnějším prostředím, popisují příležitosti a hrozby.

Společnost BH trans si během posledních 5 let svého fungování zajistila pevnou pozici na trhu, nemá problém s malým počtem zaměstnanců ani s počtem řidičů, má nové chladicí systémy ve skladech, poměrně mladý vozový park a vozidla jsou financována přes operativní leasing. I přesto však zatím nemají vlastní webové stránky, postrádají interní informační systém a nevyužívají nových technologií, obzvláště při tvorbě tras.

SWOT analýza společnosti BH trans, s.r.o. je zapsána v následující tabulce 1.

Tabulka 1: SWOT analýza společnosti BH trans, s.r.o. [autor]

SWOT

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
<p>Pozice na trhu</p> <p>Personální vybavení</p> <p>Technická vybavenost</p> <p>Spolehlivost dodávek</p> <p>Financování</p> <p>Dobré vztahy se zákazníky</p> <p>Obchodní výsledky</p>	<p>Informační systém</p> <p>Technologie</p> <p>Webové stránky, marketing</p>
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
<p>Geografická poloha společnosti</p> <p>Rostoucí počet zákazníků</p> <p>Využití nových technologií</p>	<p>Vztah se zákazníky</p> <p>Ekonomické faktory</p> <p>Konkurence</p> <p>Nedostatek personálu</p> <p>Rostoucí cena pohonných hmot</p>

3 MATEMATICKÁ FORMULACE PROBLÉMU

V následující kapitole je poskytnut souhrn informací o problému okružních jízd s časovými okny (VRPTW), krátce popsáno, z jakých úloh problém vychází, uvedena základní definice ve formě matematického modelu a popsána některá jeho zobecnění. Většina informací je čerpána z odborné literatury, jejímž autorem je Nasser A. El-Sherbeny [1].

Za posledních téměř 30 let se tato problematika stala oblastí výzkumu, která láká řadu vědců. Bylo vydáno veliké množství článků a knih o exaktních, heuristických a metaheuristických metodách řešení VRPTW. S modelem tohoto problému se můžeme setkat v mnoha oborech matematiky, informatiky nebo operačního výzkumu. Metaheuristiky, které v rozumných časových horizontech poskytují vysoce kvalitní řešení úloh v oblastech obchodu, inženýrství, ekonomie či vědy, slouží manažerům jako dobrý nástroj pro podporu jejich rozhodování.

Úloha okružních jízd s časovými okny je rozšířením známé úlohy okružních jízd – Vehicle Routing Problem (VRP) [3] [4]. Tyto úlohy jsou často jednodušší než problémy z reálného života. Ale i když je vynecháno mnoho skutečných omezení, výzkumné modely obvykle modelují základní vlastnosti, a tím poskytují základní výsledky, které se využívají k analýze a implementaci do systémů řešících problémy reálného života. Jedním z nejznámějších problémů tohoto typu je současně nejjednodušší problém, konkrétně problém obchodního cestujícího (Travelling Salesman Problem – TSP). Obchodní cestující musí navštívit větší množství zákazníků, přičemž se musí vrátit do místa, ve kterém začínal. Trasa musí být zkonstruována takovým způsobem, aby byla minimalizována celková ujetá vzdálenost. VRP je v podstatě m-TSP, přičemž každému místu je přiřazena poptávka a každé vozidlo má určitou kapacitu.

Přidáme-li každému zákazníkovi časové okno, dostaneme VRPTW. Kromě kapacitního omezení musí vozidlo navíc navštívit zákazníka v určitém časovém rámci. Může sice dorazit dříve, než se časové okno otevře, ale zákazník stejně nemůže být do otevření okna obsloužen. Příjezd po uzavření časového okna není povolen.

Jak je znázorněno na následujících obrázcích, VRP, potažmo VRTW a podobné úlohy jsou velice výpočetně náročné. J. K. Lenstra a A. H. G. Rinnooy Kan je ve své práci řadí do třídy výpočetní složitosti NP-hard [5].

TABLE I. Single vehicle routing problems.

Name	Code
Traveling salesman problem	TSP
Directed traveling salesman problem	DTSP
Chinese postman problem	CPP
Directed Chinese postman problem	DCPP
Mixed Chinese postman problem	MCPP
Rural postman problem	RPP
Directed rural postman problem	DRPP
Stacker-Crane problem	SCP

Obrázek 1: Tabulka úloh a jejich značky [5].

TABLE II. Complexity of vehicle routing and scheduling problems.

Problem	Complexity
Routing	
VRP	NP-hard
TSP	NP-hard
DTSP	NP-hard
CPP	$O(v^3)$
mCPP	NP-hard
DCPP	$O(v^3 \log a)$
mDCPP	NP-hard
MCPP	NP-hard
RPP	NP-hard
DRPP	NP-hard
SCP	NP-hard

Obrázek 2: Výpočetní náročnost úloh [5].

Mnoho rozhodovacích problémů v oblasti podnikání a ekonomie, zejména těch, které se týkají výroby, lokace, směrování a plánování, může být formulováno jako optimalizační úlohy. Protože úlohy kombinatorického charakteru mohou mít astronomický počet řešení, je obvykle velice obtížné řešit je v reálném čase, a proto se k jejich výpočtu často využívají heuristické metody. V případech, kdy jednoduché získání přípustného řešení není uspokojující a kde je kvalita řešení zásadní, je důležité prozkoumat další efektivní postupy pro dosažení nejlepšího možného řešení v mezích časových limitů, které jsou ještě považovány za praktické.

Počet zákazníků v kombinaci se složitostí reálných dat často neumožňuje získat optimální řešení problému. V těchto situacích lze aplikovat aproximační algoritmy nebo heuristiky. Obě metody dávají přípustné ale ne nutně optimální řešení. Zatímco aproximační algoritmy dávají řešení s přípustnou odchylkou, heuristické metody s touto odchylkou nepracují, ale dají se nastavit tak, aby poskytovaly přípustné kvalitní řešení, které není příliš vzdálené od optima. V dnešní době jsou při řešení VRPTW pro svoje dobré výsledky velmi využívány metaheuristiky (simulované žíhání, Tabu search či genetické algoritmy). Tyto metody totiž na rozdíl od klasických heuristik dokáží vystupovat z lokálních minim, a přitom umožňují získat přípustné řešení v reálném čase.

3.1 ZÁKLADNÍ DEFINICE VRPTW

Úloha okružních jízd s časovými okny (VRPTW) je důležitým zobecněním úlohy okružních jízd (VRP) a základním problémem distribučního řízení, který může být modelován mnoha reálnými problémy. Úloha spočívá v navržení množiny okružních jízd s minimálními náklady pro flotilu vozidel, která obsluhuje množinu zákazníků se známými požadavky, přičemž jejich jednotlivé jízdy začínají a končí v centrálním depu. Zákazníci musí být přiřazeni tak, aby nebyla překročena kapacita vozidla, a vozidla musí být u zákazníka v přesně definovaném časovém okně, tedy nejdříve a nejpozději v okamžiku, kdy to zákazník povolí.

Některá uplatnění VRPTW řeší bankovní dodávky, poštovní zásilky, sběr průmyslových odpadů, dodávky do franšízových restaurací, směřování školních autobusů nebo bezpečnostních hlídek.

3.2 MATEMATICKÝ MODEL VRPTW

Vehicle Routing Problem with Time Windows je dán flotilou homogenních vozidel V , množinou zákazníků C a orientovaným grafem $G = (V, C)$. Tento graf se skládá z $|C| + 2$ vrcholů, kde zákazníci jsou označeni $1, 2, \dots, n$, počáteční depo 0 a koncové $n + 1$.

VRPTW má několik cílů, z nichž nejdůležitější je nejen minimalizace počtu požadovaných vozidel, ale také minimalizace celkové doby jízdy, čekací doby a celkového počtu ujetých kilometrů celé flotily vozidel. Množina hran označená písmenem A představuje spojení mezi depem a zákazníky a navzájem mezi zákazníky. Žádná hrana nekončí ve vrcholu 0 a žádná nevychází z vrcholu $n + 1$. Každé hraně (i, j) , kde $i \neq j$, přiřazujeme náklady c_{ij} a čas t_{ij} , který může obsahovat i dobu obsluhy u zákazníka i .

Každé vozidlo má kapacitu q a každý zákazník i má poptávku d_i . Každý zákazník i má dále časové okno $[a_i, b_i]$. Vozidlo musí k zákazníkovi dorazit před časem b_i . Může však dorazit i před časem a_i , ale zákazník nebude do té doby obslužen. Také depo má svoje časové okno $[a_0, b_0]$. Vozidlo by nemělo opustit toto depo před časem a_0 a mělo by být zpět před nebo v čase b_0 .

Platí, že q, a_i, b_i, d_i, c_{ij} jsou nezáporná celá čísla, zatímco t_{ij} jsou kladná celá čísla. Předpokládá se, že trojúhelníková nerovnost je splněna jak pro c_{ij} tak pro t_{ij} . Model

obsahuje dvě množiny strukturních proměnných x_{ijk} a s_{ik} . Pro každou hranu (i, j) , kde $i \neq j, i \neq n + 1, j \neq 0$ a každé vozidlo k definujeme:

$x_{ijk} = 1$, pokud dojde k přiřazení vozidla na hranu (i, j) ,

$x_{ijk} = 0$, pokud nedojde k přiřazení vozidla na hranu (i, j) .

Strukturní proměnná s_{ik} je definována pro každý vrchol i a každé vozidlo k a označuje čas, kdy vozidlo k začíná svou obsluhu zákazníka i . Platí, že $a_0 = 0$, tudíž $s_{0k} = 0$ pro všechna k . Chceme sestavit množinu okružních jízd s minimálními náklady a tak, aby každý zákazník byl navštíven právě jednou, každá jízda začínala ve vrcholu 0 a končila ve vrcholu $n + 1$ a aby bylo počítáno s časovými okny a s kapacitním omezením vozidel.

Matematická model VRPTW je vyjádřen následovně [1] [6]:

Účelová funkce:

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ijk}$$

Za podmínek:

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \text{pro } \forall i \in C \quad (1)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq q \quad \text{pro } \forall k \in V \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1 \quad \text{pro } \forall k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \quad \text{pro } \forall h \in C, \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \text{pro } \forall k \in V \quad (5)$$

$$s_{ik} + t_{ij} - K(1 - x_{ijk}) \leq s_{jk} \quad \text{pro } \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (6)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i \quad \text{pro } \forall i \in N, \forall k \in V \quad (7)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \text{pro } \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (8)$$

Podmínka (1) uvádí, že každý zákazník je navštíven právě jednou jedním vozidlem a podmínka (2) znamená, že žádné vozidlo není naloženo více než kolik dovoluje jeho kapacita. Další tři rovnice (3), (4) a (5) zajišťují, že každé vozidlo opustí depo 0, po příjezdu k zákazníkovi vozidlo znovu odjede, až nakonec dorazí do depa $n + 1$. Nerovnice (6) uvádí, že vozidlo k nemůže dorazit k j před časem $s_{ik} + t_{ij}$, pokud cestuje z i do j . Podmínka (7) zajišťuje, že jsou sledována časová okna a (8) jsou podmínky celočíselnosti.

3.3 ZOBECNĚNÍ VRPTW

Řada dalších omezujících podmínek a vlastností složitějších problémů okružních jízd lze modelovat s využitím výše popsané struktury rovnic a nerovnic. V následujících odstavcích bude stručně popsáno, jak započítat heterogenní vozidla (anglicky *non-identical vehicles*), jak pracovat s více než jedním depem, s vozidly, která umožňují převážet více druhů zboží (anglicky *multi-compartment vehicles*), s vícenásobnými časovými okny nebo měkkými časovými okny (anglicky *soft time windows*) a úlohou svozu a rozvozu současně (anglicky *pick-up and delivery*).

3.3.1 HETEROGENNÍ FLOTILA VOZIDEL (NON-IDENTICAL VEHICLES)

Vozidla mohou být heterogenní z mnoha úhlů pohledu. Typickým je heterogenní flotila vozidel charakterizovaná různou kapacitou, ale vozidla se mohou lišit i různými náklady na hranu, vozidla mohou být různého typu (s krytou a nekrytou ložnou plochou), mohou mít různé cestovní doby, různá časová okna v depu nebo různé další vlastnosti a charakteristiky.

3.3.2 VÍCENÁSOBNÁ DEPA (MULTIPLE DEPOTS)

V běžně řešených úlohách se často setkáváme s více než jedním depem. K modelování situací, kdy existuje více dep, lze použít právě VRPTW. Zákazníci jsou obsluhováni několika depy, přičemž každé má svou vlastní flotilu vozidel. Obvykle se předpokládá, že se vozidla musí vrátit do depa, ze kterého vyjela. V některých případech však pouze požadujeme, aby se počet přijíždějících vozidel rovnal počtu vozidel, která toto depo opustila. Jsou ovšem i méně časté případy, kdy neexistují žádná omezení, na základě kterých by se měla vozidla vracet.

3.3.3 VÍCENÁSOBNÁ ČASOVÁ OKNA (MULTIPLE TIME WINDOWS)

V klasickém modelu VRPTW má každý zákazník jedno časové okno, ve kterém musí být obslužen. V případě, že povolíme mít více časových oken, nebo že mohou být nesouvislá, musí vozidlo, které dorazí mezi dvě časová okna, vyčkat na započetí dalšího okna.

3.3.4 VÍCEKOMODITNÍ DOPRAVA (MULTIPLE COMPARTMENTS)

Pokud mají vozidla dvě nebo více oddělených prostor, je problém známý pod pojmem Multiple Compartment VRPTW (MCVRPTW). Použití je podstatné, když vozidlo přepravuje několik komodit, které musí být během přepravy odděleny. Příkladem může být distribuce ropných produktů do čerpacích stanic. Cisterny bývají rozděleny přepážkami na několik dílčích prostor, ve kterých lze převážet například různé typy pohonných hmot.

Stejným způsobem můžeme rozšířit model VRPTW o podmínku multidimenzionální kapacity. Ve VRPTW je kapacita brána jako jednorozměrná. Touto dimenzí může být hmotnost, objem, hodnota či množství kusů. Nicméně kapacita může být vícerozměrná, například hmotnost a objem, aby bylo možné zvládnout případy, kdy velké množství lehkých krabic sice nepřekračuje hmotnostní limit, ale jejich objem je příliš velký nebo naopak.

3.3.5 MĚKKÁ ČASOVÁ OKNA (SOFT TIME WINDOWS)

Někde se můžeme setkat s náklady $p(s_i)$, které jsou závislé na době obsluhy s_i zákazníka i a zavádí se kvůli penalizaci příjezdů. Obsluha zákazníka sice může být provedena po uzavření časového okna, ale to je nežádoucí, a proto je vzniklá penalizace připočtena k celkovým nákladům trasy. Časové okno je považováno za měkké, pokud náklady neklesají s časem, tj. $s_i^1 \leq s_i^2 \Rightarrow p(s_i^1) \leq p(s_i^2)$. Kritérium dominantnosti zůstává platné a měkká časová okna mohou být začleněna do našeho VRPTW. Příklad, kdy je penalizace $p()$ obecnou funkcí, není efektivně řešitelný.

3.3.6 SVOZ A ROZVOZ (PICK-UP AND DELIVERY)

V VRPTW buď svážíme zboží od zákazníků, nebo zboží zákazníkům rozvážíme. V tomto případě však můžeme dělat obě činnosti najednou. V jednoduché backhulinové verzi (VRPBTW) tohoto problému musí být vozidla před zahájením fáze sběru zcela prázdná.

V tomto jednoduchém případě mohou být zákazníci rozděleni do dvou tříd: množina zákazníků, kterým rozvážíme a množina zákazníků, od kterých svážíme. Odstraněním všech hran orientovaných od svozových zákazníků k rozvozovým zajistíme, že bude nemožné obsloužit rozvozového zákazníka po zákazníkovi, od kterého svážíme.

4 DOSTUPNÉ NÁSTROJE PRO ŘEŠENÍ VRPTW

Následující kapitola se zabývá některými exaktními metodami pro řešení úlohy okružních jízd s časovými okny. Dále je uvedeno několik heuristických metod a v poslední části jsou popsány metaheuristické metody, jako jsou simulované žíhání, Tabu search a genetické programování. Většinu informací opět čerpám z odborného článku, jejímž autorem je Nasser A. El-Sherbeny [1].

4.1 EXAKTNÍ METODY

Exaktní metody pro úlohu okružních jízd s časovými okny lze rozdělit do tří kategorií:

1. Lagrangeova relaxační metoda,
2. generování sloupců,
3. dynamické programování.

Exaktní metody často selhávají u velkých úloh. Prochází totiž všechna řešení, a proto se stává, že nalezení dobrého řešení, respektive optima bývá časově náročné. Časová náročnost i u poměrně malých problémů bývá v řádech dnů či desítek hodin.

LAGRANGEOVA RELAXAČNÍ METODA

Časová náročnost výpočtu exaktními metodami je závislá na počtu omezujících podmínek [2]. Lagrangeova relaxační metoda je jednou z možností, jak časovou náročnost zlepšit. Omezující podmínky lze díky ní redukovat, tudíž v našem případě podmínka, která zajišťuje, že každý zákazník je obslužen právě jednou, tedy:

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1, \quad \text{pro } \forall i \in C$$

je ignorována (relaxována) a účelová funkce s přidaným penalizačním členem vypadá následovně:

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (c_{ij} - \lambda_j) x_{ijk} + \sum_{j \in V} \lambda_j,$$

kde λ_j je Lagrangeův multiplikátor související s podmínkou, která zajišťuje, že zákazník j je obslužen.

GENEROVÁNÍ SLOUPCŮ

Častým problémem je veliké množství namodelovaných proměnných a nadefinovaných omezujících podmínek. Metoda generování sloupců funguje tak, že řešící algoritmus dostane nejprve menší množství proměnných. Poté se ostatní proměnné postupně přidávají a sleduje se, jestli se řešení zlepšilo. V rámci lineárního programování to znamená, že se přidává sloupec do simplexové tabulky a sleduje se hodnota účelové funkce.

Opět se tedy jedná o relaxovaný problém, protože některé proměnné jsou na začátku vynechány, nebo obsahují pouze jednu proměnnou a některé omezující podmínky na začátku nejsou ani součástí řešícího algoritmu [2].

DYNAMICKÉ PROGRAMOVÁNÍ

Další možností, jak řešit výpočetní náročnost úlohy s danými omezujícími podmínkami, je použití metody dynamického programování. Tento přístup je obzvláště vhodný v situacích, kdy lze řešení problému sestavit z řešení menších podproblémů. V případě rekurzivního přístupu by se totiž některé podproblémy vypočítávaly opakovaně. Dynamické programování zaznamenává již spočtené dílčí výsledky, a tak zabraňuje opakovaným výpočtům.

4.2 HEURISTICKÉ ALGORITMY

Heuristické algoritmy pro řešení VRPTW jsou stále účinným nástrojem a umožňují nalézt rozumné řešení v rozumném čase. Řešení, které poskytují, sice nebývá optimální, ale suboptimální, ovšem výpočet je možné získat v reálném čase. V oblasti aproximačních algoritmů a heuristik se algoritmy klasifikují buď jako sekvenční, nebo paralelní. V sekvenčním algoritmu je najednou vytvářena jedna trasa, zatímco paralelní algoritmus může vytvářet více tras najednou. Díky tomuto rozporu se proto raději vyhneme použití této klasifikace.

Heuristické algoritmy, při nichž je množina tras vytvářena od začátku, nazýváme konstrukční heuristiky (route-building heuristics), zatímco algoritmy, které se pokouší vytvořit vylepšené řešení na základě již dostupného řešení, označujeme jako heuristiky zlepšovací (route-improving heuristics).

Heuristika je definována jako technika, která nalézá dobrá řešení (blízká optimu) při využití rozumných výpočetních nákladů, aniž by však bylo možné zaručit nalezení optimálního řešení nebo uvést, jak blízko optimálnímu řešení partikulární přípustné řešení je, nebo (v některých případech) jestli dokonce zaručuje proveditelnost. Často jsou heuristiky pro řešení problémů specifické, takže metoda, která dobře pracuje s jednou úlohou, nemusí být dobrá pro řešení jiné úlohy.

4.2.1 KONSTRUKČNÍ HEURISTIKY

Prvním dokumentem o konstrukční heuristice pro úlohu VRPTW je práce E. Bakera a J. Schaffera z roku 1989 [7][6]. Jejich algoritmus je rozšířením heuristiky pro VRP, kterou vyvinuli G. Clarke a W. Wright. Algoritmus začíná sestavením všech cest k jednomu zákazníkovi a zpět (depo – zákazník i – depo). V každé iteraci počítáme, které dvě cesty mohou být spojeny na základě maximální úspory, kde úspora mezi zákazníkem i a j je dána:

$$s_{ij} = t_{i0} + t_{0j} - Gt_{ij}, \quad i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, n$$

kde G je někdy označováno jako faktor druhu trasy. Algoritmus nejbližších sousedů (nearest-neighbourhood) s časovým zaměřením je rozvíjen definováním úspor jakožto kombinace vzdálenosti, času a času možné proveditelnosti.

Podobný algoritmus založený na úspoře byl vyvinut M. Solomonem, avšak zde časový aspekt není součástí funkce úspory. Namísto toho hrany, které mohou být použity, jsou limitovány velikostí čekacích dob. Z důvodu existence časových oken musíme brát v úvahu i orientaci trasy. Navíc po spojení dvou cest musíme zkontrolovat, zda nedošlo k porušení podmínek časových oken.

Další heuristiku založenou na úspoře představil H. Van Landeghem. Jeho dvoukriteriální heuristika využívá časová okna v předcházející rovnici úspor za účelem měření, jak dobré je spojení zákazníků z pohledu časování.

M. Solomon popsal i další časově orientovanou heuristiku nejbližších sousedů. Každá cesta začíná nalezením nezařazeného zákazníka, který je nejbližší depu. Vztah blízkosti zohledňuje jak geografickou, tak i časovou vzdálenost. Při každé následující iteraci je zákazník, který je nejbližší k poslednímu zákazníkovi, zařazen na poslední místo aktuálně

generované cesty. Když prohledávání nenalezá dalšího vhodného zákazníka pro aktuálně generovanou cestu, začíná nová cesta z depa.

Zmíněné heuristiky vrací řešení velmi rychle. Jejich řešení však obecně postrádá kvalitu. Lepší výsledky vykazují heuristiky, které vytvářejí více cest najednou.

4.2.2 ZLEPŠOVACÍ HEURISTIKY

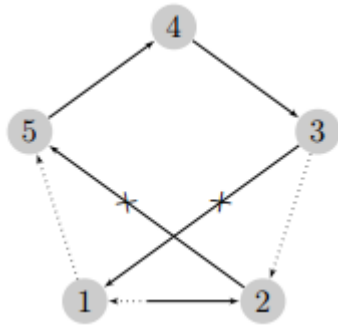
Zlepšovací heuristiky iterativně zlepšují výchozí přípustné řešení. Při jejich řešení se postupně aplikuje řada modifikací, přičemž se zachovává přípustnost řešení. V případě, že již nelze tímto způsobem vylepšit řešení, proces se zastaví [8].

Základem téměř každé této heuristiky je pojem *neighbourhood* (sousedství = okolí řešení). Okolí sestávající z S řešení je množinou $N(S)$, která může být vytvářena různými modifikacemi S .

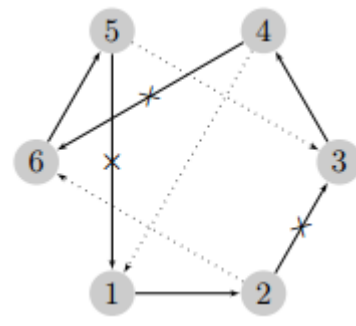
Prozkoumáním některých, nebo všech řešení v aktuálním sousedství může být nalezeno řešení, které je z pohledu účelové funkce lepší. Ve chvíli, kdy již není možné nalézt lepší řešení, bylo nalezeno minimum. Zpravidla se jedná o lokální minimum, ale může se zároveň jednat i o globální minimum, tedy optimální řešení. Tento algoritmus se v odborné literatuře nazývá jako Local search (lokální vyhledávání).

4.2.3 METODA PROHLEDÁVÁNÍ OKOLÍ PRO ŘEŠENÍ VRPTW

Jednou z nejpoužívanějších heuristik pro směřování a plánování je $r - Opt$ heuristika, kde je r hran odstraněno a nahrazeno r počtem jiných hran. Řešení získané užitím této metody, které nemůže být dále zlepšeno, se nazývá r -optimální. Obvykle je počet kroků r maximálně 3. Krok 2 – Opt odebere z řešení dvě hrany, které nemají společný vrchol, a nahradí je dvěma jinými hranami. Takto postupuje na definované množině sousedů až do chvíle, kdy už žádný krok typu 2 – Opt nezlepší řešení. Obdobně to platí pro algoritmus 3 – Opt , ten na místo 2 hran odstraňuje hrany 3. Kroky 2 – Opt a 3 – Opt jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

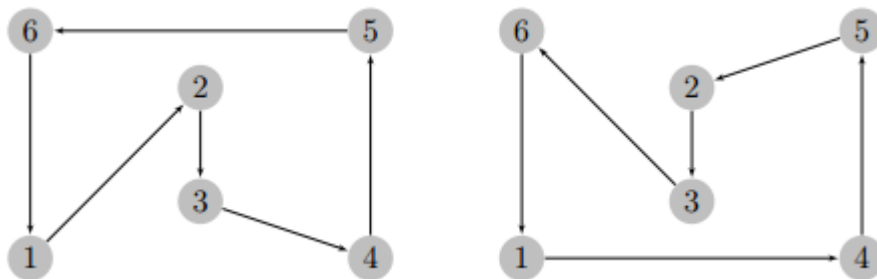


Obrázek 3: Krok 2 – Opt [8].



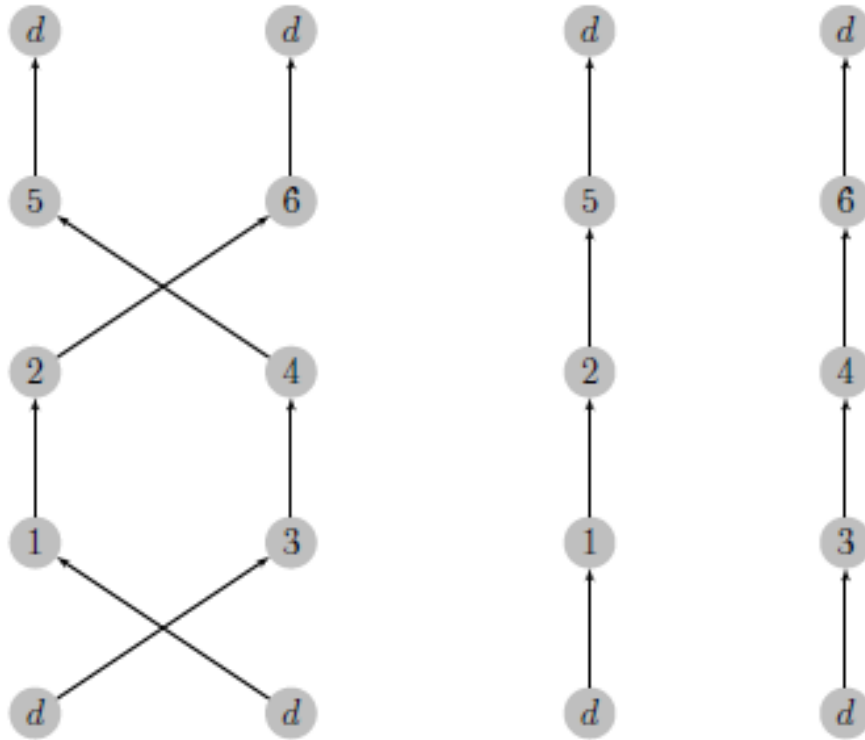
Obrázek 4: Krok 3 – Opt [8].

Často se ještě definují tzv. *Or – Opt* kroky, které přesouvají postupně tři, dva a jeden vrchol v rámci jedné trasy. Heuristika *Or – Opt* tedy začíná přesouváním trojic vrcholů a ve chvíli, kdy je dosaženo lokálního minima, je počet přesouvanych hran snižen na dvě až nakonec na jednu. Na následujícím obrázku je znázorněna ukázka *Or – Opt* kroku, který přesouvá dva vrcholy. Všimněme si, že *Or – Opt* se zrovna shoduje s jedním propojením typu 3 – Opt, ve kterém jsou nahrazeny tři hrany.



Obrázek 5: Or – Opt krok přesouvající 2 vrcholy [8].

Algoritmus 2 – Opt* dokáže na rozdíl od předchozích propojit dvě odlišné cesty a to tak, že vezme dvě cesty R_p a R_q , z každé odebere jednu hranu a propojí počátek cesty R_p s koncem cesty R_q a obráceně [8]. Toto propojení je označováno jako křížení (anglicky cross nebo crossover). Křížení je znázorněno na následujícím obrázku 6.



Obrázek 6: Crossover [8].

Další metoda K – *node interchange* je upravena několika autory tak, aby brala v úvahu časová okna. Postupně se uvažuje každý zákazník i , přičemž jsou určeny množiny M_1 a M_2 . Množina M_1 obsahuje zákazníka i a jeho následovníka j a množina M_2 sestává ze dvou zákazníků, kteří jsou nejbližší zákazníkům i a j , přičemž nejsou na stejné trase, jako i a j . Okolí sousedů je poté dáno odstraněním prvků z M_1 a M_2 a jejich následným vložením zpět v jiném uspořádání. Vzhledem k tomu, že toto okolí sousedů je poměrně veliké, je kontrolováno pouze k nejslibnějších kandidátů.

Další metodou okolních sousedů je tzv. λ – *interchange*. Tato metoda pro každou dvojici tras R_p a R_q z množiny tras R a pro každé jejich podmnožiny $S_p \subset R_p, S_q \subset R_q$ takové, že $|S_p| \leq \lambda$ a $|S_q| \leq \lambda$, vytvoří nové trasy, které se skládají z $R_p \setminus S_p \cup S_q$ a $R_q \setminus S_q \cup S_p$ [8]. Obvykle je také zadána velikost λ , která určuje velikost podmnožiny zákazníků, kteří jsou přesunováni z jedné trasy na druhou. Například pomocí 2 – *interchange* kroku bychom se nejprve pokusili přesunout jeden prvek z jedné trasy do druhé a podobně s dalším prvkem. Pak bychom zkusili opačnou situaci. A po ní bychom zkusili vyměnit jeden prvek z jedné trasy za jeden prvek z druhé trasy. Můžeme to zapsat následovně: $(1, 0), (0, 1), (1, 1), (0, 2), (2, 0), (2, 1), (1, 2)$ a $(2, 2)$ [1].

PŘEHLED OPERÁTORŮ

- Operátor *relocate*: přesun zákazníka z jedné trasy do druhé,
- operátor *exchange*: vzájemná výměna dvou zákazníků mezi dvěma trasami,
- operátor $2 - Opt^*$: výměna jednoho segmentu trasy s jiným segmentem z jiné trasy,
- operátor *Or - Opt*: v definované množině zákazníků je postupně měněno pořadí zákazníků na trase,
- operátor *K - node interchange*: postupně se uvažuje každý zákazník i . Zákazník i a jeho následovník j a dva zákazníci, kteří jsou nejbližší zákazníkům i a j , přičemž tito nejsou na stejné trase, jsou odstraněni. Okolí sousedů je pak dáno zkoušením zařadit tyto čtyři vrcholy do jiných možných cest. Kontrolováno je pouze k nejslibnějších kandidátů.
- operátor $\lambda - interchange$: podmnožina zákazníků o velikosti $\leq \lambda$ z jedné trasy je vzájemně vyměněna s podmnožinou zákazníků o velikosti $\leq \lambda$ z další trasy.

4.3 METAHEURISTIKY

Metaheuristiky jsou výkonné techniky, které se obecně aplikují na výpočet náročných úloh. Metaheuristiky se týkají iterativní strategie, která řídí a upravuje dílčí operace podřízených heuristik pomocí kombinace rozumně odlišných koncepcí pro zkoumání a využívání prohledávaného prostoru [1]. Je tedy pouze konceptem řešení. Metaheuristika dokáže na rozdíl od běžných heuristik vystupovat z lokálních minim, protože v každé iteraci může manipulovat s úplným či neúplným řešením nebo s množinou řešení. Základními heuristikami jsou simulované žíhání, Tabu search (Tabu vyhledávání) a genetické algoritmy. Úspěch těchto metod vychází z jejich schopnosti rozumně řešit v praxi některé kombinatoricky náročné úlohy.

4.3.1 SIMULOVANÉ ŽÍHÁNÍ

Název simulované žíhání vychází ze skutečnosti, že je koncepčně podobný fyzikálnímu procesu známému jako žíhání. Při tomto procesu je materiál zahříván až do kapalného stavu a poté je ochlazen zpět do pevného, přičemž se mění jeho krystalická mřížka. Simulované žíhání bylo jednou z prvních vyvinutých heuristik. Tato metoda je založena na jiném principu než výše uvedené heuristiky. Přejít do nového řešení z okolí je

založen na výsledku náhodného pokusu. Pokud je řešení lepší, je následně považováno za nové nejlepší řešení, pokud je však horší než současné, je přijímáno pouze s určitou pravděpodobností. Pravděpodobnost přijetí je určena teplotou, která se postupně snižuje. Snižováním teploty se výběr stává stále více selektivním v přijímání nových řešení. Myšlenka simulovaného žíhání vychází z termodynamiky a metalurgie: když je roztavený kov ochlazován dostatečně pomalu, má tendenci ztuhnout ve struktuře s vynaložením minimální energie.

Následující obecný popis algoritmu simulovaného žíhání pro řešení úlohy VRPTW platí pro všechna sousední přípustná řešení $N(S)$ [9]:

Krok 1: Získání počátečního přípustného řešení S pro úlohu VRPTW s využitím heuristiky paralelní konstrukce.

Krok 2: Stanovení parametrů ochlazování včetně počáteční teploty T , poměru chlazení r a dobu délky Len .

Krok 3: 3.1 Pro $1 \leq i \leq Len$

3.1.1 se vybere náhodný soused $S' \in N(S)$,

3.1.2 nechť $\Delta = \text{náklady na } S' - \text{náklady na } S$,

3.1.3 pokud $\Delta \leq 0$, potom $S = S'$,

3.1.4 pokud $\Delta > 0$, potom $S = S'$ s pravděpodobností $e^{-\Delta/T}$.

3.2 Nastavení $T = rT$.

Krok 4: Vrácení S .

V odborné práci Wen-Chyuan Chianga a Roberta A. Russella, která se zabývá simulovaným žíháním pro VRPTW [9], jsou popsány tři různé metody: první využívá modifikovanou variantu mechanismu $K - \text{node interchange}$, druhá využívá mechanismu $\lambda - \text{interchange}$ přičemž $\lambda = 1$ a třetí využívá myšlenku tabu listu z metaheuristiky Tabu search. Poslední dvě metody rychleji konvergují. Cestovní vzdálenosti získané těmito třemi metaheuristikami simulovaného žíhání byly pouze o 7,3%, 11,5% a 11,1% delší než v případě optimálního řešení. Všechny tři metaheuristiky tedy dosáhly téměř optimálního řešení úlohy, pro kterou optimální řešení bylo známo z exaktní metody.

4.3.2 TABU SEARCH

Tabu search je jednou ze starých metaheuristik. Navrhnul ji Fred W. Glover již koncem osmdesátých let minulého století. Od té doby byly algoritmy na principu Tabu search použity k řešení mnoha kombinatorických úloh včetně TSP, VRP či VRPTW. Tabu search patří mezi algoritmy lokálního prohledávání. Při každé iteraci jsou prohledána okolní řešení aktuálního řešení, přičemž nejlepší nalezené řešení nahradí to původní. Aby byl algoritmus schopen vystupovat z lokálních minim, je aktuální řešení nastaveno jako nejlepší i přesto, že nemá nižší hodnotu účelové funkce. Aby bylo zamezeno opakovanému nacházení nedávno vybraných řešení (zacyklení), jsou řešení zapisována do tabu listu, což je nejdůležitější myšlenkou celé metaheuristiky Tabu search. Tabu list často neobsahuje nepřípustná řešení, ale pouze zakázané pohyby. Povolení pohybu má smysl pouze v okamžiku, kdy jeho pokračování vede ke zlepšení současného celkového nejlepšího řešení. Kritéria, podle kterých je možné povolit zakázaný pohyb v tabu listu, se nazývají aspirační. Důležitá je délka tabu listu, příliš krátká délka totiž může vést k zacyklení, a naopak dlouhá délka tabu listu může okolí natolik modifikovat, že mohou být přeskočena řešení, která by nakonec vedla k nejlepšímu řešení. Důležitými součástmi konce algoritmu jsou diverzifikace a zintenzivnění. Diverzifikace se snaží algoritmus navést k odlišným, zatím neprozkoumaným řešením, a zintenzivnění důkladněji prohledává okolí nejlepších řešení. Nejčastěji používanými kritérii pro zastavení algoritmu Tabu search jsou konstantní počet iterací, při kterých se již nezlepšuje celkové řešení, nebo celkový počet iterací.

Základní minimalizační Tabu search algoritmus na datech vypadá následovně [8]:

```
DATA: Instance problému VRPTW
RESULT: Seznam přípustných cest pokrývající všechny zákazníky
S=počáteční_řešení;
S* = S;
WHILE není překročen předepsaný počet iterací DO
    najdi nejlepší přípustné řešení  $S' \in N(S)$ , které není zakázané nebo
    splňuje aspirační kritérium;
    IF  $f(S') < f(S^*)$  THEN
         $S^* = S'$ ;
    END
    S = S';
    aktualizuj tabu list;
END
vypiš S*;
```

Kde $N(S)$ označuje množinu okolních přípustných řešení a $f(S)$ účelovou funkci přípustného řešení S .

Tabu search je aproximační metoda navržená pro kombinatorickou optimalizaci náročných úloh. Její aplikace ukazují, že je velmi flexibilní a efektivní a že poskytuje výsledky, které jsou podobné nebo lepší než výsledky, které poskytují nejlepší heuristiky.

V následujícím odstavci jsou vypsány některé podobnosti a rozdíly mezi simulovaným žíháním a Tabu search:

Obě metody začínají s počátečním přípustným řešením, ze kterého iterativně generují další řešení. Obě mohou exaktně nebo aproximačně vyhodnocovat možná řešení, obě zaznamenávají nejlepší dosažená řešení a obě musí mít mechanismus zabezpečující ukončení algoritmu. Nicméně jsou mezi nimi i dva rozdíly. Zaprvé Tabu search umožňuje vystupovat z lokálního optima pomocí deterministického mechanismu, kdežto simulované žíhání pomocí pravděpodobnostního. A zadruhé Tabu search dočasně umožňuje přecházet k horším řešením pouze v blízkosti lokálních optim, kdežto simulované žíhání může přecházet k jakýmkoliv jiným řešením.

4.3.3 GENETICKÉ ALGORITMY

Genetické algoritmy jsou pravděpodobnostní vyhledávací metody, které vycházejí z genetického vývoje druhů. Hlavním cílem je reprodukovat přirozený vývoj organismů, generaci po generaci, při respektování dědičnosti a zákonů o přežití, jak uvádí Charles Darwin.

První použití genetických algoritmů bylo již v roce 1950, kdy biologové simulovali vývoj organismů. Až mnohem později byly přizpůsobeny k řešení kombinatorických optimalizačních problémů, jako například v: J. H. Holland – *Adaption in Natural and Artificial Systems* (1975) nebo D. E. Goldberg - *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* (1989).

Genetické algoritmy pracují oproti simulovanému žíhání nebo Tabu search ne pouze s jedním řešením, ale s populací řešení. Populace řešení, z nichž každé může být možným řešením, představuje prostor řešení problému. Nová řešení jsou generována aplikací genetických operátorů (výběr, křížení a mutace) na potenciálních předchůdcích (rodičích) vybraných uvnitř populace. Genetické algoritmy jsou založeny na takovém principu, že nejlepší rodiče mají nejlepší potomky. To znamená, že nejsilnější členové populace mají velkou pravděpodobnost, že budou vybráni jako rodiče. Tito rodiče jsou pak kříženi a dávají prostor svým dětem, které nahrazují slabší jedince populace nebo rodiče samotné. Při přechodu do nové generace je pro každého člena spočtena fitness funkce, která vyjadřuje kvalitu řešení reprezentovaného tímto jedincem. Postup je opakován až do chvíle, kdy je dosaženo populace, ve které jsou všichni členové velmi silní. Výsledné řešení odpovídá optimu nebo téměř optimu – suboptimu.

5 VLASTNÍ MODEL

V následující části diplomové práce bude popsána konkrétní úloha a nástroje, pomocí kterých byla úloha řešena. Další část kapitoly je zaměřena na konkrétní části algoritmu a v poslední části kapitoly budou popsány vstupy a výstupy.

5.1 POPIS ÚLOHY

Zboží je rozváženo z jediného místa, tedy ze střediska dopravní společnosti, které je na okraji obce Telče ve směru k Radkovu. Společnost má pro rozvoz vyhrazenou flotilu čtrnácti chladírenských vozidel značek Renault Master a Volkswagen Transporter o kapacitě tisíc kilogramů. Zákazníci, kterým je zboží rozváženo, mají různou poptávku. Některí zákazníci požadují malé množství (několik kg), někteří naopak větší množství (>100 kg). Některí zákazníci požadují, aby bylo zboží doručeno do 6:00 hod, někteří požadují, aby bylo zboží doručeno až po 10:00 hod, ale většině postačuje, když dodávka přijede v průběhu provozní doby. Časová okna jsou vždy dopředu známá a v průběhu dne se nemění. Doba vykládky obvykle bývá mezi pěti a deseti minutami. Pro potřeby výpočtu byla tato hodnota nastavena na konstantní hodnotu 7 minut.

Úloha je tedy definována následujícími parametry:

- 1 depo,
- z hlediska hmotnosti homogenní vozový park (14 vozů o kapacitě 1000 kg),
- zákazníci mají různou poptávku,
- časová okna se v průběhu dne nemění,
- konstantní doba vykládky (7 min.).

5.2 NÁSTROJE PRO ŘEŠENÍ

Vzhledem k parametrům úlohy byla pro určení počátečního řešení zvolena konstrukční heuristika od M. Solomona (viz kapitola 4.2.1). Pro zlepšení řešení byly zvoleny prvky křížení v okolí sousedních řešení (viz kapitola 4.2.3) a nakonec pro určení lepšího řešení byla využita metaheuristika Tabu search (viz kapitola 4.3.2).

5.3 POPIS ALGORITMU

Jelikož všem nutným požadavkům vyhovoval již vytvořený, a navíc otestovaný algoritmus, byl na jeho základech vystavěn nový, který zvládá pracovat s reálnými daty, která byla v praktické části zpracována. Řada funkcí a proměnných zůstala zachována, zdrojem informací v následujících odstavcích tedy bude práce, která zmiňovaný otestovaný algoritmus popisuje [8].

Algoritmus byl vytvořen a upraven v jazyce C++ s využitím standardních knihoven STL. Vybrané proměnné a metody třídy VRPTW jsou blíže popsány v následujících dvou podkapitolách.

5.3.1 PROMĚNNÉ

Při výpočtu se využívá hlavně těchto proměnných:

saved – počet přípustných uložených řešení,

maxveh – maximální počet vozidel,

lambdai – maximální počet přesouvaných zákazníků v jedné trase,

tt – délka tabu listu,

nsize – počet zákazníků,

c – dvoudimenzionální pole vzdáleností,

d – pole poptávek zákazníků,

a – pole začátků časových oken,

b – pole konců časových oken,

s – pole délek doby vykládky,

q – kapacita vozidel,

iteration – počet iterací,

best_obj – hodnota účelové funkce při nalezení nejlepšího řešení.

5.3.2 METODY

Konstruktor třídy `VRPTW` iniciuje paměť a nastaví hodnoty proměnným `iteration`, `tt`, `saved` a `lambda`.

Hlavní metody (funkce) třídy `VRPTW` využívané při výpočtech jsou následující:

`read_data`

Metoda `read_data` slouží k načtení dat ze souborů.

Má 3 argumenty:

- řetězec s adresou souboru s distanční maticí,
- řetězec s adresou souboru s parametry úlohy,
- počet zákazníků;

`solomon_heuristic`

Tato metoda slouží k sestavení nějakého přípustného počátečního řešení. Při výpočtu je vytvořena i další prázdná trasa, kam lze v případě potřeby přesouvat zákazníky. Aktuální hodnota účelové funkce stanoví velikost proměnné `best_obj`.

Tato metoda má 4 argumenty:

- váhy ω_1 a ω_2 ,
- parametry λ a μ .

Hodnoty těchto parametrů jsou pevně nastaveny: $\omega_1 = 1$; $\omega_2 = 0,05$; $\lambda = 1$; $\mu = 1$.

`improve`

Metoda `improve` na každou trasu aktuálního řešení aplikuje křížení v okolí sousedních řešení. Metoda je ukončena ve chvíli, kdy již nedokáže nalézt lepší řešení.

tabu_search

Metoda `tabu_search` nemůže být volána, pokud dosud neexistuje nějaké počáteční řešení.

Jediný její argument je počet iterací `iteration`.

Během jedné iterace je vybrán a proveden nejlepší krok, který není zakázaný nebo splňuje aspirační kritérium, poté je aktualizován tabu seznam a následně jsou odstraněny všechny kroky, které se týkají pozměněných tras. Byla-li zaplněna prázdná trasa, je přidána nová. Pokud naopak vznikla nová prázdná trasa, je odstraněna a její tabu list je přepsán do druhé prázdné trasy. Následuje ještě křížení vrcholů okolních sousedních řešení a generování nových kroků. Když je hodnota účelové funkce aktuálního řešení menší než hodnota nejhoršího uloženého řešení, je toto řešení uloženo do seznamu nejlepších přípustných řešení, jehož velikost udává proměnná `saved`.

diversify

Metoda `diversify` zajišťuje diverzifikaci algoritmu. Postupně aplikuje určitý počet náhodně vybraných přípustných kroků, až na kroky, které zahrnují prázdnou trasu. Poté je znovu použita metoda `tabu_search`.

Jejími argumenty jsou počet náhodných kroků a počet iterací metody `tabu_search`.

intensify

Zintenzivnění je prováděno zafixováním náhodně vybraných tras.

Tato metoda má 3 argumenty:

- délka tabu listu `subproblem_tt`,
- velikost subproblému `subproblem_size`,
- počet iterací metody `tabu_search`.

Původní nastavení, seznam nejlepších přípustných řešení a informace o původním řešení jsou nejdříve uloženy. Potom je odebráno příslušné množství tras, všechny nevhodné kroky smazány, vyprázdněn seznam nejlepších přípustných řešení a nastaveny nové

parametry – délka tabu listu, nejlepší a nejhorší uložená hodnota účelové funkce. Nyní je na zbylý subproblém využita metoda `tabu_search`. Nakonec jsou k nejlepšímu řešení přidány zafixované trasy, jsou vygenerovány nové kroky a je obnoveno původní nastavení. Pokud je toto řešení lepší než dosud nejlepší, je zařazeno do původního seznamu nejlepších řešení.

Metoda `intensify` by měla být volána několikrát v rámci cyklu.

`load_best_solution`

Tato metoda načítá ze seznamu nejlepších přípustných řešení to nejlepší řešení.

`print_solution`

Metoda `print_solution` vypisuje aktuální řešení. Jejím argumentem může být cesta s názvem souboru, do kterého chceme řešení zapisovat.

5.3.3 VSTUPY

Vstup ke každé úloze je tvořen dvěma soubory, jejich struktura je znázorněna na následujících obrázcích 7 a 8.

Na obrázku č. 7 je matice vzdáleností mezi vrcholy i a j ve tvaru vektoru hodnot, kdy první hodnota značí vrchol i , druhá vrchol j a třetí je vzdálenost mezi nimi v kilometrech zaokrouhlená na celá čísla nahoru.

Na obrázku č. 8 jsou znázorněny parametry k úloze, tedy maximální možný počet vozidel, jejich kapacita a dále pro každého zákazníka i aktuální poptávka v kilogramech, začátek a konec časového okna v minutách.

DISTANČNÍ MATICE ÚLOHA 1

```

1 1 0
1 2 45
1 3 58
1 4 57
1 5 60
1 6 72
1 7 72
1 8 71
1 9 65
1 10 65
1 11 65
1 12 63
1 13 63
1 14 62
1 15 63
1 16 62
1 17 52
1 18 33
1 19 35
1 20 36
1 21 58
1 22 75
1 23 95

```

PARAMETRY K ÚLOZE 1

MAXIMÁLNÍ POČET VOZIDEL
14

KAPACITA
1000

ID	KG	OD	DO
1	0	0	1440
2	14	330	1140
3	274	240	1080
4	41	330	1140
5	19	330	1140
6	33	330	1140
7	18	330	1140
8	38	330	1140
9	175	240	1080
10	19	330	1020
11	13	240	1080
12	150	240	1080
13	21	240	1080
14	80	240	1080
15	30	330	1020
16	57	330	1140

Obrázek 7: Distanční matice [autor]

Obrázek 8: Parametry k úloze [autor]

Další pro chod algoritmu nutné hodnoty nejsou načítány ze souborů, ale jsou pevně nastaveny v programu. Jedná se o tyto hodnoty:

- průměrná rychlost vozidel – $1 \text{ km/s} = 60 \text{ km/hod}$,
- velikost doby vykládky = 7 min.,
- maximální počet přípustných uložených řešení = 5000,
- délka tabu listu = 50,
- maximální počet přesouvaných zákazníků v jedné trase = 2,
- počet iterací Tabu search = 1000,
- počet zákazníků – hodnota této proměnné závisí na konkrétní úloze.

5.3.4 VÝSTUPY

Výstupem úlohy je jeden soubor, ve kterém je na prvním řádku napsán počet použitých vozidel a na následujících řádcích jsou konkrétně vypsané jednotlivé trasy. Trasa vždy začíná a končí v depu (zákazník č. 1). Na posledním řádku je vypsan celkový počet ujetých kilometrů (viz následující obrázek).

```
6 pouzitych vozidel

1: 1 76 46 21 23 22 13 19 12 4 2 11 18 20 6 16 15 17 5 7 10 9 14 55 1
2: 1 71 58 74 78 65 66 83 77 79 70 69 1
3: 1 81 75 84 68 67 1
4: 1 27 30 26 37 28 40 43 33 25 24 36 39 34 41 32 31 35 29 38 42 3 1
5: 1 73 8 50 47 48 49 51 45 52 44 82 1
6: 1 80 72 53 54 57 63 62 60 61 59 56 64 1

Celkovy pocet ujetych kilometru: 2134
```

Obrázek 9: Výstup výpočtu 5. dne [autor].

Stejně jako dvojice vstupních, tak i výstupních souborů je pochopitelně stejně jako dnů ve sledovaném období, tedy celkem deset.

6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ METODIKY

V následující části diplomové práce budou popsány konkrétní kroky z celého procesu zpracování, které bylo nutné vykonat pro získání vstupních dat v podobě, která je vhodná pro strojové zpracování.

6.1 VÝCHOZÍ DATA

Doprava chlazeného zboží od objednavatelů k zákazníkům je outsourcována společností BH trans. Rozvoz se provádí podle požadavků zákazníků jednotlivých objednavatelů služby. Požadavky na další den dispečer přijímá do 18:00 hod. Pro potřeby diplomové práce byla dispečerem poskytnuta data, jejichž podoba je znázorněna na následujících obrázcích číslo 10, 11, 12 a 13, přičemž na každém obrázku jsou data od jiného objednavatele služby.

Objednávka	Císlo	Nazev	Ulice	Obec	Objednано KG	Dodano KG
Linka: 4310 Vlasimsko / BH						
(2379023)	3072101	Leona Jelinkova	Uvoz 24	Jihlava	67,250	0,000
(2378731)	3264301	Maso-uzeniny Ruze	Masarykova 857	Humpolec	10,000	0,000
(2376855)	3289107	LEVNE Vlasim	Lidicka 1919	Vlasim	68,640	0,000
(2378723)	3290902	Motorest Melikana	Jirice - Sperice 38,	okr. Pelhrimov	27,600	0,000
(2378725)	3290902	Motorest Melikana	Jirice - Sperice 38,	okr. Pelhrimov	5,200	0,000
(2378832)	3375801	Potravinny U Vachu	Vetrny Jenikov 104	Jenikov, okr. J	13,500	0,000
(2378935)	3379601	Restaurace U Libora	Gen. Vedrala Sazavsk	Sazava	50,500	0,000
(2375763)	4107601	ZD Hodice, ZD Rostyn	Hodice 211	Hodice	61,000	0,000
(2377995)	4116803	Vyvarovna Pecha	Hruskove Dvory 81	Jihlava	77,500	0,000
(2377990)	4116804	Vyvarovna Pecha	Hruskove Dvory 81	Jihlava	27,000	0,000
(2379249)	4167101	Jidelna U Peryho	Pavovska 3138/75	Jihlava	44,500	0,000
(2378066)	4170601	Resort Svata Katerin	Pocatky 327	Pocatky, okr. P	22,000	0,000
(2379134)	4185702	Pizza Nonno Ledec	Kozelska 205	Ledes nad Sazav	32,400	0,000
(2379146)	4185702	Pizza Nonno Ledec	Kozelska 205	Ledes nad Sazav	38,800	0,000
(2378678)	4196702	Pizza Grande Zruc	Sad Miru, staneK	Zruc nad Sazavo	28,000	0,000
(2378679)	4196702	Pizza Grande Zruc	Sad Miru, staneK	Zruc nad Sazavo	26,000	0,000
(2379105)	4202601	Zelivsky klaster	Zeliv 1	Zeliv, okr. Pel	47,000	0,000
(2379200)	4813301	Vysoka skola polytec	Tolsteho 1556/16	Jihlava	107,000	0,000
(2379067)	4814201	Stredni skola stavek	Zizkova 58	Jihlava	97,000	0,000
(2379077)	4814202	Stredni skola stavek	Zizkova 58	Jihlava	9,600	0,000
Objednavek v lince: 20 (4310)					860,490	0,000

Obrázek 10: Požadavky odběratele č. 1 [dispečer dopravní společnosti].

Objednavatel pošle do 18:00 hod požadavky svých zákazníků na následující den v podobě dokumentu ve formátu pdf. Neposílá celý seznam požadavků v jednom dokumentu, ale rozděluje požadavky podle místa určení. Přichází tedy několik dokumentů, přičemž v každém z nich je vždy uvedeno, v jakém regionu je požadavek registrován. Na obrázku je region Vlašimsko. Dalšími jsou např. Telčsko, Havlíčkobrodsko či Dačicko. Objednavatel posílá seznam zákazníků v pořadí, jak od nich postupně v čase přicházelí objednávky.

	A	B	C	D	E	F
1	Name	Delivery	Ship-to party Name	Ship-to party City	Netweight	WUn
2	OL	88876044	KAFE TULI	Sumperk	38 KG	
3	OL	88876060	MOL Prerov #C700 /p */	Prerov	55 KG	
4	OL	88876082	OMV #2115 Olomouc - obchvat	Olomouc	90 KG	
5	OL	88876093	Shell Deli2Go #8053 Daskabat	Velky Ujezd	95 KG	
6	OL	88876095	OMV #2148 Svitavy */	Svitavy	47 KG	
7	OL	88876096	Shell Deli2Go #8158 Svitavy	Svitavy - Lacnov	53 KG	
8	OL	88876103	CLARION CONGRESS HOTEL (BEZ DOPRAVN	Olomouc	45 KG	
9	OL	88876144	Kavarna Andelka (Penzion Andelka)	Hanusovice	26 KG	
10	OL	88876150	Kavarna Andelka (Penzion Andelka)	Hanusovice	21 KG	
11	OL	88876157	Cafe Club	Olomouc	48 KG	
12	OL	88876158	Hotel APLAUS */	Litomysl	50 KG	
13	OL	88876213	Restaurace Pohoda	Lulec	60 KG	
14	OL	88876228	OMV #2810 Prostejov */	Prostejov - Zesov	82 KG	
15	OL	88876236	TCHIBO CENTRUM OLYMPIA OLOMOUC	Olomouc	42 KG	
16	OL	88876238	Crosscafe Riegrova (bez dopravneho)	Olomouc	55 KG	
17	OL	88876241	OMV #2103 Mor. Trebova	Moravska Trebova	75 KG	
18	OL				882 KG	
19	OV	88874655	Olga Zednickova - VELKOOBCHOD	Ostrava - Stara Bela	110 KG	
20	OV	88876058	TCHIBO Opava - OC Breda	Opava	21 KG	
21	OV	88876100	Shell Deli2Go #8155 Vrazne - leva	Odry	95 KG	
22	OV	88876101	Shell Deli2Go #8041B Onava	Onava - Predmesti	37 KG	

Obrázek 11: Požadavky odběratele č. 2 [dispečer dopravní společnosti].

Další objednavatel posílá požadavky rozdělené též podle regionu, ve kterém má být zboží doručeno. V seznamu jsou vždy 3 regiony: OL – Olomoucko, OV – Ostravsko a UH – okolí Uherského Hradiště.

Data zasílá v podobě tabulek aplikace MS Excel, které jsou pro zpracování mnohem přívětivější.

Zákazníci opět nejsou seřazeny podle toho, jak by měli následovat za sebou.

	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
1	Odjezd	Kg	Objem	Id zákaznika	Č. objednávky	Název	Obec	PSČ	Ulice	Pozn.1	Pozn.2	P
2												
3	04:39	0	0	TE		TELČ	TELČ	58856	DAČICKÁ			
4	05:35	68	68	25013165148	10961000	PMU CZ, a.s.-1526	Třebíč	67401	Pražská 1056	0001921664	P-TREBIC;	
5	06:14	19	19	0001735382	10960957	Van Long Nguyen	Dalešice	67554	Dalešice 38	0001918165	P-JIHLAV;	
6	06:43	13	13	69673144000		0 Vildomcová Zdeňka	Náměšť nad Oslavou	67571	Husova č.555	0001923504	P-JIH-PS;	
7	06:43	21	21	69673144000	10961069	Vildomcová Zdeňka	Náměšť nad Oslavou	67571	Husova č.555	0001923504	P-JIH-PS;	
8	06:43	8	8	69673144000	10961076	Vildomcová Zdeňka	Náměšť nad Oslavou	67571	Husova č.555	0001923538	P-JIH-PS;	
9	06:53	65	65	25013165093	10960981	PMU CZ, a.s.-1517	Náměšť nad Oslavou	67571	Brněnská 991	0001921431	P-TREBIC;	
10	07:16	53	53	00032336153	10961052	JEDNOTA SD 153	Vysoké Popovice 212	66486		0001922446	P-JIH-PS;	
11	07:35	25	25	00032336033	10961015	JEDNOTA SD 033	Hluboké č.31	67571		0001921991	P-JIH-PS;	
12	07:59	65	65	00032344144	10961054	JEDNOTA SD 144	Velká Bíteš	59501	Hybešova 241	0001922457	P-JI-POS;	
13	08:05	20	20	25506641353	10960985	ROSA market, s.r.o.	Velká Bíteš	59501	Lánice 54	0001921461	P-JIH-PS;	
14	08:20	23	23	00032344167	10961071	Jednota SD 167	Křoví	59454		0001923523	P-JIH-PS;	
15	08:32	9	9	00032344056	10961045	JEDNOTA SD 056	Křižinkov			0001922375	P-JIH-PS;	
16	08:53	25	25	00032344177	10960987	JEDNOTA SD 177	OSOVA BITYŠKA 225	59453		0001921476	P-JIH-PS;	
17	08:59	45	45	0001735394	10961075	Fanda Tran s.r.o.	Osová Bítýška	59453	Osová Bítýška 82	0001923537	P-JIHLAV;	
18	09:06	18	18	00032344191	10961006	JEDNOTA 191	Zablatí	59453		0001921796	V-JIHLAV;	
19	09:29	25	25	45643083000	10961004	BAJER JIRI	KRIZANOV	59456	ZA BRANOU 319	0001921749	P-JIH-PS;	
20	09:35	27	27	0001300935	10961087	PHUONG QUYEN s.r.o.	Křižanov	59451	Masarykovo náměstí 169	0001923307	P-JIHLAV;	
21	09:41	31	31	00032344205	10961077	JEDNOTA SD 205	Křižanov	59451		0001923539	P-JIH-PS;	
22	10:05	99	99	00032344530	10962032	JEDNOTA SD 530	VELKE MEZIRICI	59418	NOVOSADY	0001923750	V-JI-POS;	
23	10:15	36	36	00032344190	10961037	JEDNOTA SD 190	VELKE MEZIRICI	59418	DRUZSTEVNI	0001922344	P-JIH-PS;	
24	10:26	14	14	00032344071		0 JEDNOTA SD 071	Velké Meziříčí	59401	Mírová	0001922095	P-JIH-PS;	
25	10:26	11	11	00032344071	10961026	JEDNOTA SD 071	Velké Meziříčí	59401	Mírová	0001922095	P-JIH-PS;	

Obrázek 12: Požadavky odběratele č. 3 [dispečer dopravní společnosti].

Objednavatel, jehož požadavky jsou znázorněny na obrázku 12, je největší. Posílá své požadavky již seřazené do tras. Vše zasílá v jednom dokumentu (tabulky aplikace MS Excel), přičemž na prvním listu je přehled tras, tedy číslo trasy, datum, odjezd, příjezd, ujetý počet km a počet kg, a na druhém listě jsou detaily jednotlivých tras, tedy seřazený seznam požadavků.

	A	B	C	D	E	F	G	
1	Seznam odběratelů na směr 435							
2	Bláha-jede s směrem 410							
3	Pouze odběratelé s objednávkami na den 20.04.2017							
4	19.04.2017, 13:35, počet odběratelů - 22							
5	Poř. Č.odb.	Název		Psč	Město	Ulice	Sit'	Vyřízení
6	14070	Jednota SD České Budějovice TREFA č186		373 41	Hluboká nad Vltavou	Masarykova 61	JCB	13.00 kg
7	14078	Jednota SD České Budějovice TREFA č. 101		373 50	Olešník	Olešník 147	JCB	11.00 kg
8	17013	Jednota SD České Budějovice TREFA č. 451		373 44	Zliv	Zliv 572	JCB	18.00 kg
9	17663	ŠUMAVA GASTRO s.r.o. (D)		383 01	Prachatice	UStadionu 383		32.00 kg
10	14072	Jednota SD České Budějovice TREFA č. 469		373 11	Ledenice	Ledenice 3	JCB	15.00 kg
11	17000	Jednota SD České Budějovice TERNO č. 185		674 01	Trhové Sviny	Budovatelská 916	JCB	85.00 kg
12	17016	Jednota SD České Budějovice TREFA č. 476		373 12	Borovany	Borovany 8	JCB	20.00 kg
13	17018	Jednota SD České Budějovice TREFA č. 487		373 35	Horní Stropnice	Horní Stropnice 47	JCB	17.00 kg
14	17055	Jednota SD České Budějovice TREFA č.231		378 10	České Velenice	Revoluční 223	JCB	13.00 kg
15	349	Thi Lanh Dau Kenda - Minimarket (D)		381 01	Český Krumlov	Za Nádražím 225	M	19.00 kg
16	2688	Voharčík Václav Srubecká smíšenka (D)		370 06	Srubec	Ledenická 252		16.00 kg
17	10713	Đuriš Pavel Smíšené zboží (D)		382 32	Mirkovice	Mirkovice 54		14.00 kg
18	15215	EICHLEROVÁ Jaroslava		387 73	Bavorov	náměstí Míru č.p.13	CBA	16.00 kg
19	0	17020 Jednota SD České Budějovice TREFA č. 497		373 81	Kamenný Újezd	Nádražní 49	JCB	16.00 kg
20	10	11516 Jednota sdružení spotřebitelů v Kaplici		382 42	Kaplice-Strítěž	nádraží 86	JKA	121.00 kg
21	85	9350 Jednota, spotřební družstvo ve Vimperku, Te...		383 01	Prachatice	Vusinecká ul. č.1190	JVI	31.00 kg
22	90	14138 Jednota SD Vimperk TUTY - prodejna 162		383 01	Prachatice	Vodňanská 50	JVI	73.00 kg
23	130	14136 Jednota SD Vimperk TUTY - prodejna 088/094		384 11	Netolice	Obecní 75	JVI	10.00 kg
24	175	14656 Jednota SD Volyně prodejna 027 TIP		389 01	Vodňany	nám. Svobody č. 4	JV	18.00 kg
25	185	17010 Jednota SD České Budějovice TERNO č. 215		375 01	Týn nad Vltavou	Orlická 555	JCB	38.00 kg
26	190	17012 Jednota SD České Budějovice TREFA č. 430		375 01	Týn nad Vltavou	Hlinecké sídl. 745	JCB	12.00 kg
27	200	17008 Jednota SD České Budějovice TERNO č. 213		391 65	Bechyně	Na Libuši 763	JCB	25.00 kg
28								
29			Celkem					633.00 kg

Obrázek 13: Požadavky odběratele č. 4 [dispečer dopravní společnosti].

A poslední zasílá své požadavky také již seřazené do tras. Dokumenty jsou opět v podobě tabulek aplikace MS Excel. Dokumentů je tolik, kolik je tras na další den.

6.2 SESTAVENÍ TRAS DISPEČEREM

Jelikož chce dopravní firma minimalizovat své náklady, dispečer musí požadavky kombinovat tak, aby byla maximálně využita kapacita vozidel a celkový počet ujetých kilometrů byl minimální.

Z důvodu časové náročnosti sestavy plánu tras a často se opakujících míst vykládky dispečer pouze skládá trasy k sobě a mezi jednotlivými trasami prohazuje zákazníky. Řidičům se předává pouze název trasy, kterou má jet, a neseřazený seznam zastávek (zákazníků), který si řidiči musí seřadit sami. Jediné, co dispečer archivuje, je tzv. rozpiska. V té je kolonka zákazník, pro kterého je zboží rozváženo, označení trasy, jméno řidiče, SPZ vozidla, orientační počet kilogramů, které řidič v dodávce poveze, a nakonec místo pro poznámku, viz následující obrázek.

ROZVOZ ZBOŽÍ						pátek 21.4.2017
ZÁKAZNÍK	LINKA	ŘIDIČ	AUTO	KG	POZNÁMKA	
DZK	OL	PRAŽSKÝ JIŘÍ		350	XXX	837
DZK	UH	POVOLNÝ		700	XXX	667
DZK	OV	ŠIMEK 914		900		VE VAL.MEZIRČÍ ---VYZVEDNOUT DODÁKY KLATOVSKÝ
MADE	3750 - TELČSKO	ŠTĚPÁN 928		350		BH TRANS 1 - Z LINKY 3750 SE PŘEHODILO PO UZAVŘENÍ NA 4310(HAJDIK) HUMPOLEC HOLUB A V PODHRADÍ OBEC KÁMEN
MADE	4310-VLAŠIMSKO	HAJDIK 945		350		PŘÍKLÁDKA - BH TRANS 2 - OD LINKY 3750(ŠTĚPÁN) SE PO UZAVŘENÍ PŘEHODILO NA TVOJÍ 4310 V PODHRADÍ OBEC KÁMEN A VÁCLAV HOLUB HUMPOLEC
KRÁSNO	STUDENÁ - VSELÍ n.L.	BIRNER		1000	XXX	978
KRÁSNO	TELČ-POPELÍN	NOVOTNÝ		350	XXX	954
KRÁSNO	BORY-NOVÁ VES	ZÁRUBA		1000	XXX	980
KRÁSNO	BOHDALOV - TŘEBÍČ	SELINGER		950		ZAČÍNAT VE VEL.MEZU MADOS RÁNO
KRÁSNO	JAKUBOV-KRAVSKO	HEJDA		700	XXX	74
KRÁSNO	TELČ -JIHLAVA-TELČ + 4320 - DAČICKO	FEDERSEL		950		PRACOVNÍ BOTY SEBOU!!!
DOVOLENÁ---NV---NEMOC		DOVOLENÁ ---SMEJKAL,KONRÁD, SVOBODA,		NEMOC - PECKA,		

Obrázek 14: Rozpiska tras s přiřazenými vozidly a řidiči [dispečer dopravní společnosti].

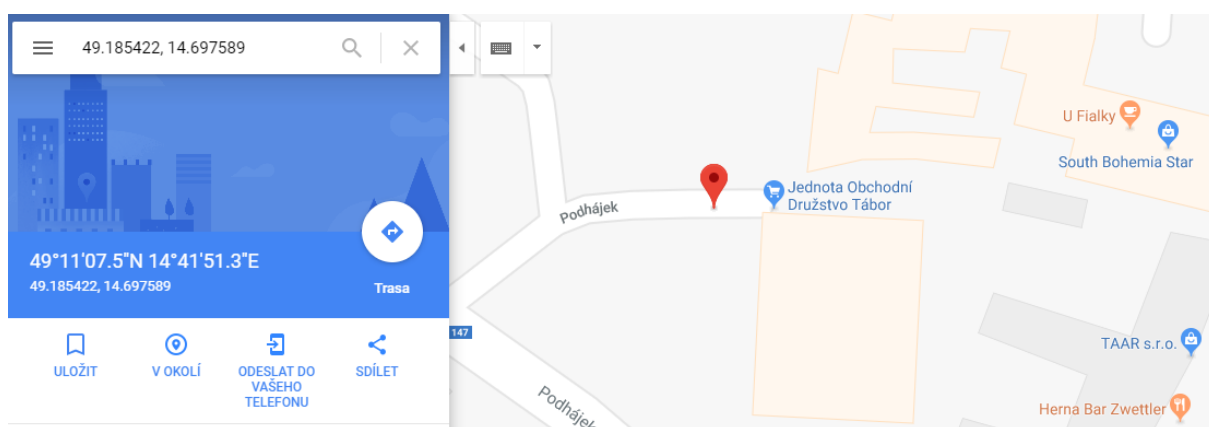
Bylo potřebné pro každý den a pro každou trasu určit s dispečerem pořadí obsluhovaných zákazníků tak, aby byl minimalizován dopravní výkon z pohledu ujetých kilometrů.

Pozn.: při určování počtu ujetých kilometrů byly brány vzdálenosti z distančních matic. Program pracuje s celočíselnými hodnotami. Vzdálenosti byly zaokrouhleny na celá čísla nahoru.

6.3 TVORBA DISTANČNÍCH MATIC

Po úpravě tras s dispečerem následovala náročnější část diplomové práce – vytváření distančních matic. K jejich výpočtu muselo být využito několika nástrojů.

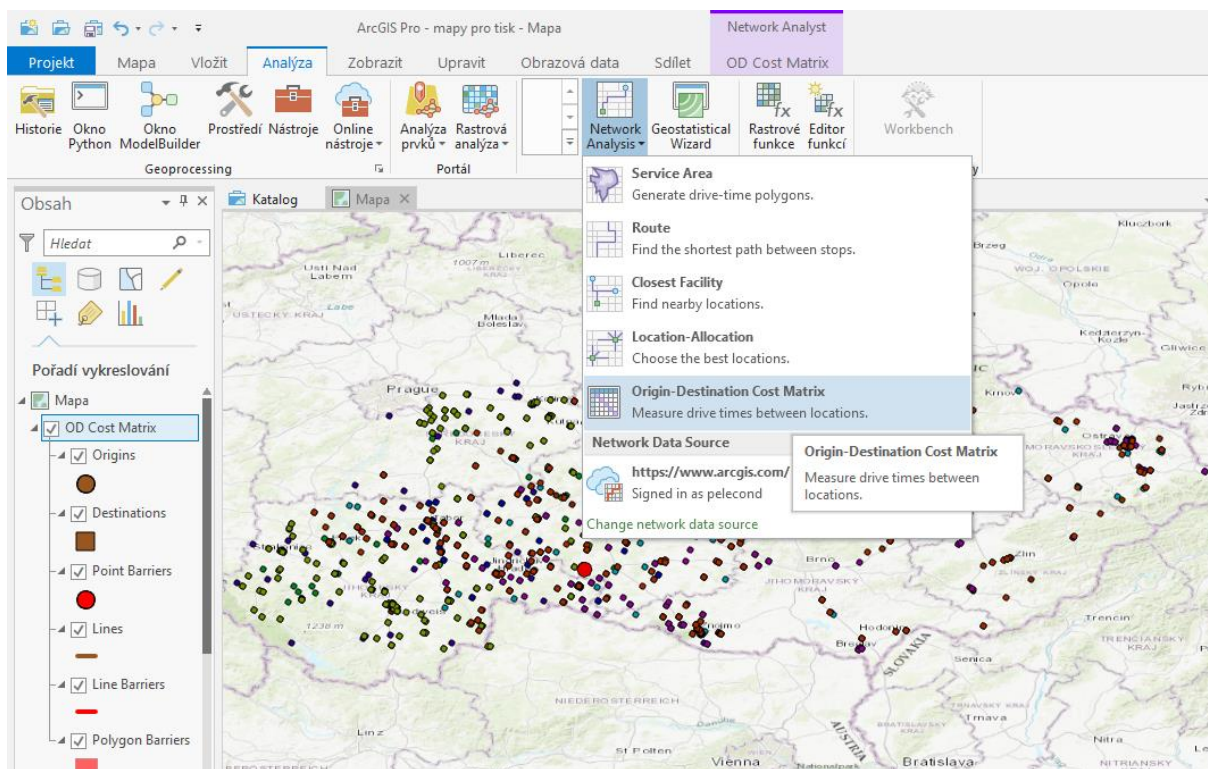
Pomocí webových stránek www.maps.google.com musela být u každého zákazníka zjištěna jeho GPS souřadnice (viz. obrázek č. 15).



Obrázek 15: GPS souřadnice jednoho ze zákazníků [maps.google.com].

Ve vybraném souboru 10 dnů je v průměru přibližně 190 zákazníků každý den. Někteří z nich se v průběhu dnů opakují, takže po odstranění duplicit zbylo necelých devět set zákazníků, pro které musely být nalezeny GPS souřadnice.

Po získání všech souřadnic bylo nutno nalézt vhodný nástroj, do kterého by mohly být tyto body vloženy a na základě nichž mohly být následně spočteny distanční matice. Byl využit nástroj ArcGIS Pro. Na standardní mapový podklad tohoto programu byly nahrány body do nové vrstvy a poté byly využity nástroje Origin-Destination Cost Matrix, jak je vidět na následujícím obrázku 16.

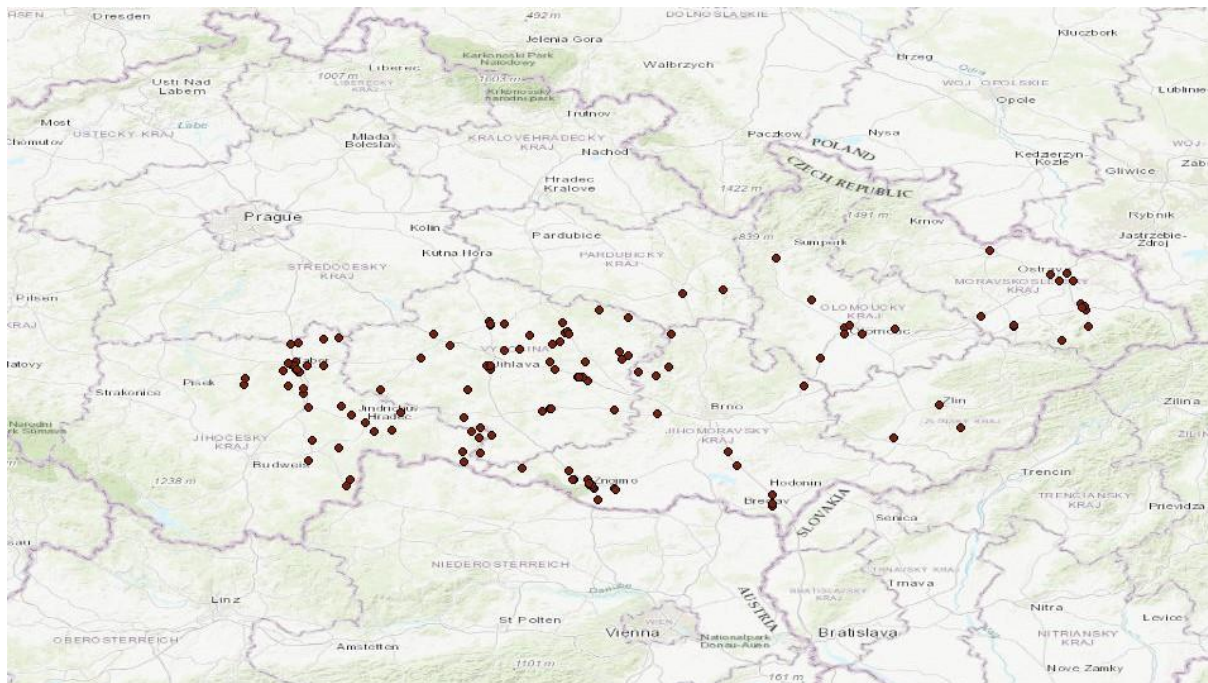


Obrázek 16: OD Cost Matrix v ArcGIS Pro [autor].

Všechny body vrstvy byly nastaveny jako Origins (zdroje) a zároveň i jako Destinations (cíle). Bylo nastaveno hledání jízdní vzdálenosti a poté byl výpočet spuštěn. Po několika desítkách minut byla matice spočtena a výsledek byl vyexportován do textového dokumentu, z něhož byla následně data exportována do tabulek MS Excel, aby se s nimi dalo lépe pracovat. Jelikož je Trial verze tohoto programu omezena nejen časově, ale i počtem kreditů, který se zmenšuje po určitých operacích, hlavně pak po velkých dotazech na online databázi, a právě nalezení distanční matice je jedním z těch větších dotazů, bylo nutno vytvořit několik účtů a zjišťovat distanční matici pro každý den, který měl být porovnáván. A právě díky této složitosti, a hlavně časové náročnosti zpracování, je v diplomové práci prakticky zpracováno a následně porovnáváno 10 pracovních dnů, tedy dva týdny.

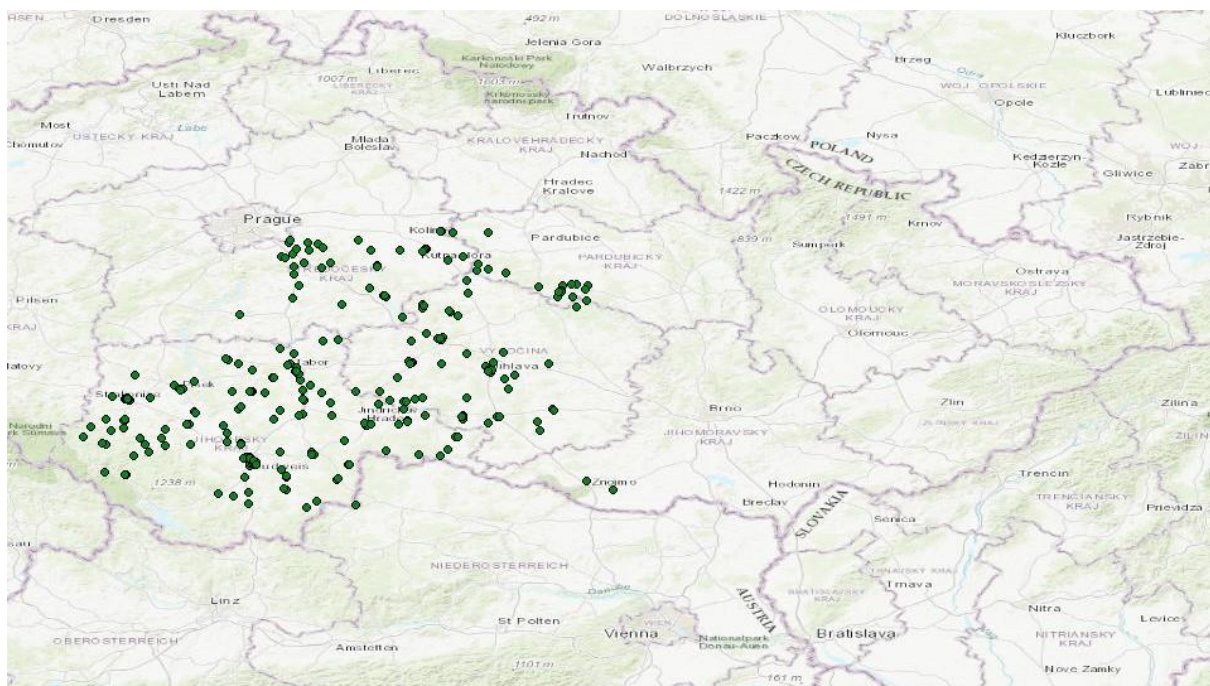
6.4 ROZMÍSTĚNÍ ZÁKAZNÍKŮ

Díky aplikace ArcGIS Pro je možné znázornit rozmístění zákazníků (zastávek). Na následujících obrázcích je postupně vyobrazeno 10 dnů.



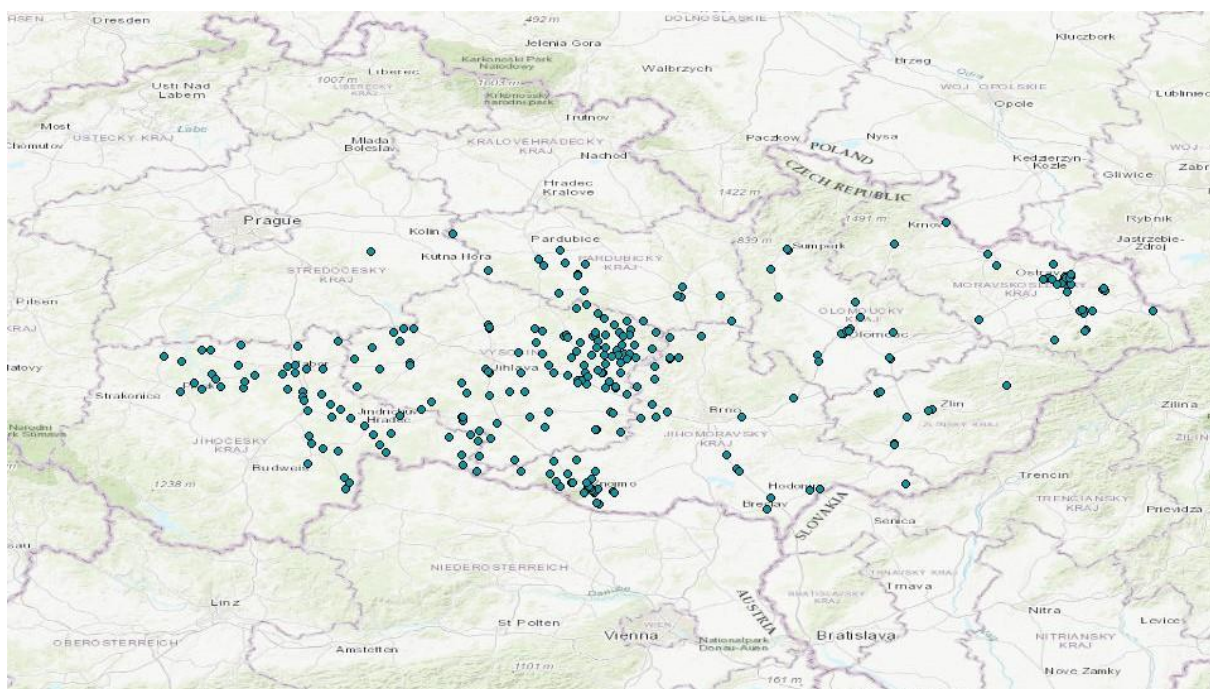
Obrázek 17: První pondělí [autor].

První pondělí ve sledovaném období bylo nutné navštívit celkem 137 zákazníků. Bylo využito celkem 8 vozidel, kapacita vozidel byla v průměru využita ze 78,3 % a celkový dopravní výkon činil 2937 km.



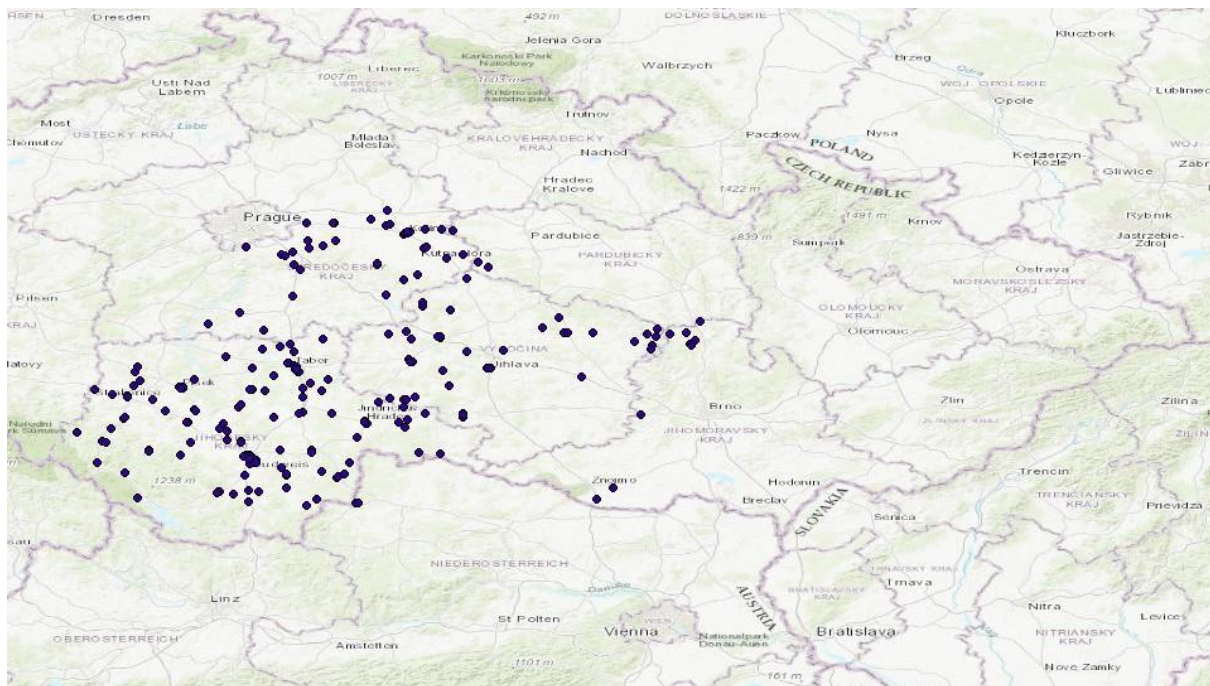
Obrázek 18: První úterý [autor].

První úterý ve sledovaném období bylo nutné navštívit celkem 268 zákazníků. Bylo využito celkem 11 vozidel, jejichž kapacita byla v průměru využita z 89,6 % a celkový dopravní výkon činil 3792 km.



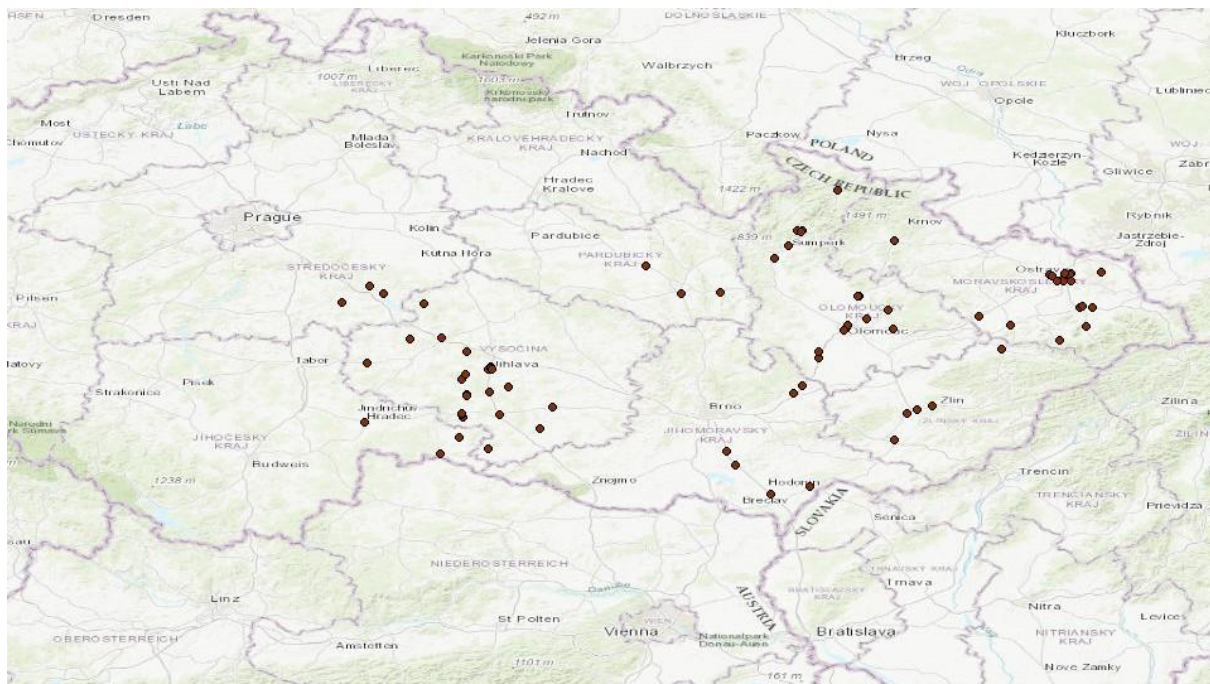
Obrázek 19: První středa [autor].

První středu ve sledovaném období bylo nutné navštívit celkem 290 zákazníků (viz obrázek 19). Bylo využito celkem 12 vozidel, jejichž kapacita byla v průměru využita z 92,1 % a celkový dopravní výkon činil 5131 km.



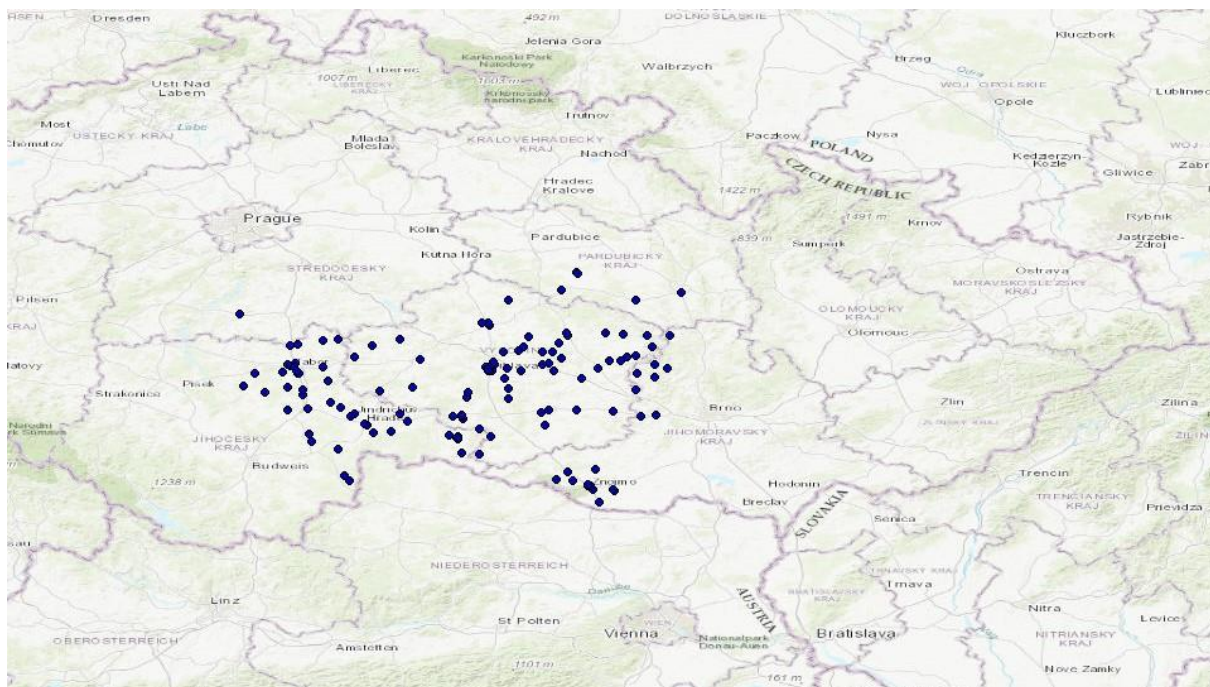
Obrázek 20: První čtvrtek [autor].

První čtvrtek ve sledovaném období bylo nutné navštívit celkem 221 zákazníků. Bylo využito celkem 8 vozidel, jejichž kapacita byla v průměru využita z 93,7 % a celkový dopravní výkon činil 3700 km.



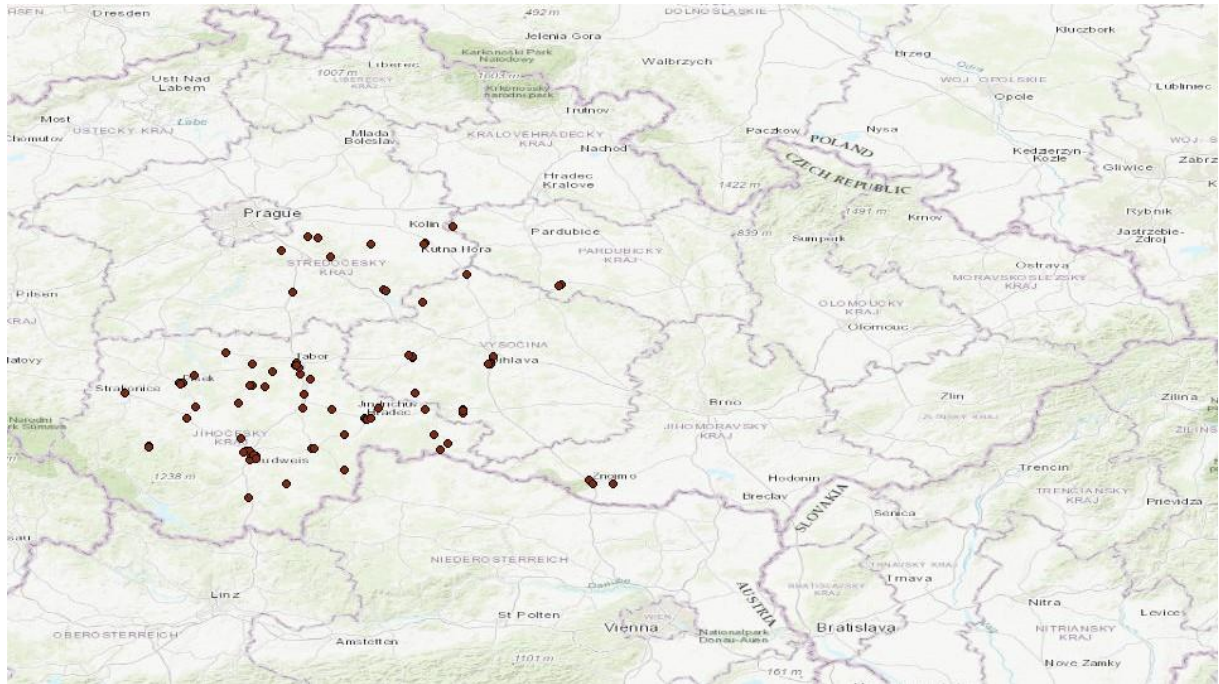
Obrázek 21: První pátek [autor].

První pátek ve sledovaném období bylo nutné navštívit 83 zákazníků. Bylo využito celkem 6 vozidel, jejichž kapacita byla v průměru využita z 90,5 % a celkový dopravní výkon činil 2325 km.



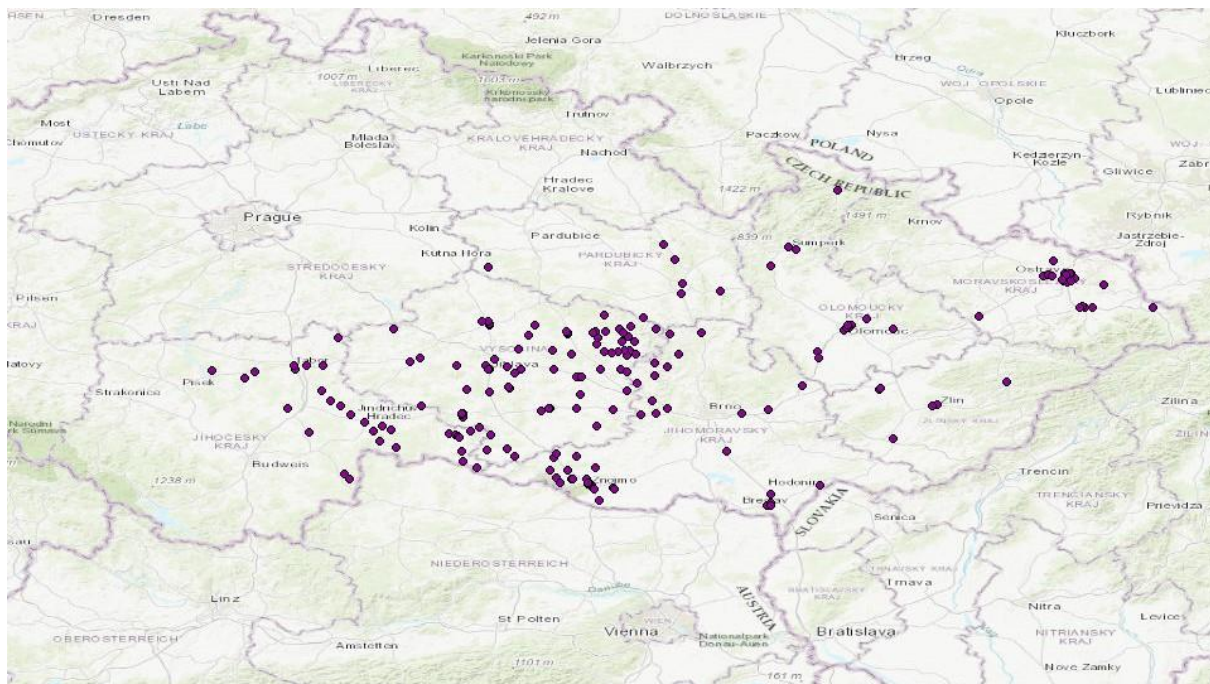
Obrázek 22: Druhé pondělí [autor].

Druhé pondělí ve sledovaném období bylo nutné navštívit celkem 139 zákazníků (viz obrázek 22). Bylo využito celkem 7 vozidel, jejichž kapacita byla v průměru využita z 88,1 % a celkový dopravní výkon činil 2007 km.



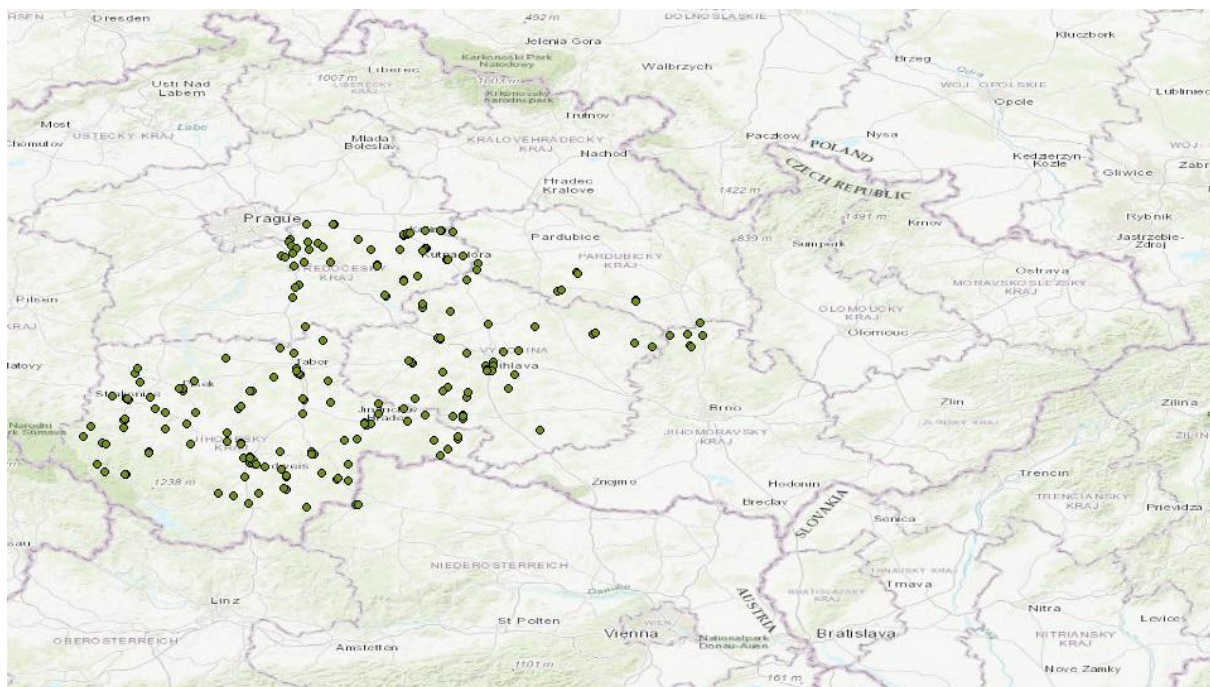
Obrázek 23: Druhé úterý [autor].

Druhé úterý ve sledovaném období bylo nutné navštívit celkem 80 zákazníků. Bylo využito celkem 6 vozidel, jejichž kapacita byla v průměru využita z 83 % a celkový dopravní výkon činil 1881 km.



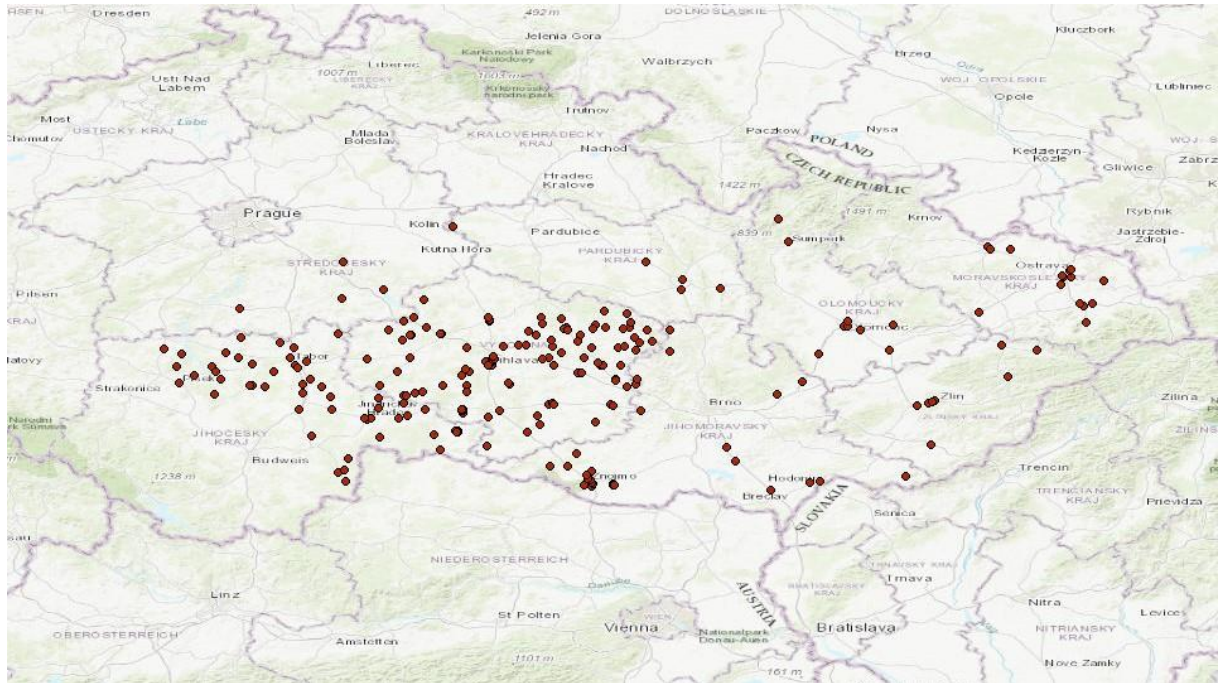
Obrázek 24: Druhá středá [autor].

Druhou středú ve sledovaném období bylo nutné navštívit celkem 207 zákazníkú. Bylo využito celkem 10 vozidel, jejichž kapacita byla v průměru využita z 90,1 % a celkový dopravní výkon činil 3857 km.



Obrázek 25: Druhý čtvrttek [autor].

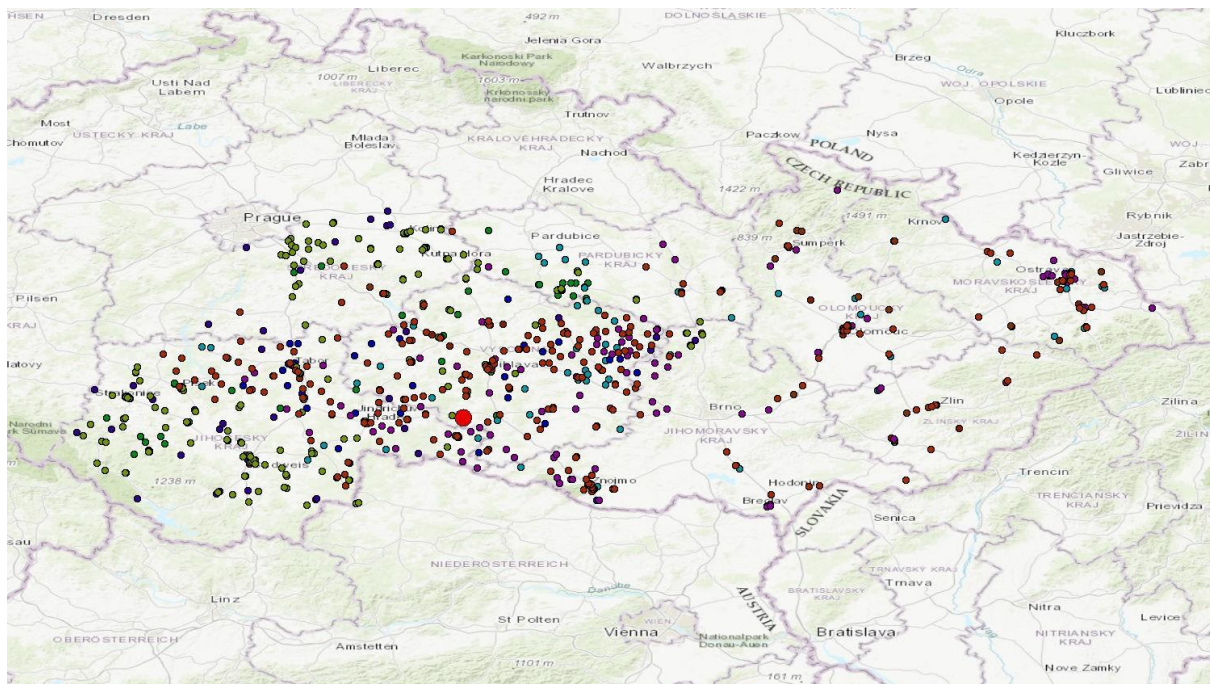
Jak je znázorněno na předchozím obrázku 25, druhý čtvrtek ve sledovaném období bylo nutné navštívit celkem 223 zákazníků. Bylo využito celkem 9 vozidel, jejichž kapacita byla v průměru využita z 96,1 % a celkový dopravní výkon činil 3451 km.



Obrázek 26: Druhý pátek [autor].

Druhý pátek ve sledovaném období bylo nutné navštívit celkem 236 zákazníků. Bylo využito celkem 11 vozidel, jejichž kapacita byla v průměru využita z 89,5 % a celkový dopravní výkon činil 4225 km.

Na posledním obrázku v kapitole 6.4 jsou všichni zákazníci z celého sledovaného období 10 dnů znázorněni najednou. Body mají celkem 10 druhů barev podle jednotlivých dnů. Depo je zvýrazněno velkým červeným bodem.



Obrázek 27: Všechny dny v jednom obrázku [autor].

Na obrázku je znázorněno dohromady 1884 bodů, přičemž některé se opakují. Celkový počet zákazníků ve sledovaném souboru je 891.

Na obrázku je vidět, že společnost BH trans obsluhuje zákazníky v kraji Jihočeském, Středočeském, Pardubickém, Olomouckém, Moravskoslezském, Zlínském, Jihomoravském a v kraji Vysočina, tedy dohromady v 8 krajích České republiky.

6.5 ČASOVÁ OKNA

Poslední věcí, která scházela z přípravy dat pro výpočty, bylo doplnit k jednotlivým zákazníkům časová okna. Tedy doby, ve kterých zákazníci požadují, aby jim bylo zboží doručeno. Převážně většině stačí, aby bylo zboží doručováno během provozní doby. Jen několik odběratelů žádá, aby jim bylo zboží doručeno v poměrně krátkém časovém okně. V následující tabulce je přehled vybraných časových oken.

Tabulka 2: Vybraná časová okna zákazníků [autor].

Popis	Časové okno od	Časové okno do
Bistra ve školách	7:00	12:00 až 14:00
Cukrárny	8:00	16:00
Čerpací stanice	0:00	24:00
Jednoty	5:30 až 6:00	16:00 až 19:00
Kavárny	8:30	20:00
Pizzerie	8:30	20:00
Restaurace	8:30	20:00
Dostál	5:00	6:00
Gastrocentrum ARAMARK	6:00	8:30
Gornický	5:00	6:00
Holub	3:40	6:30
Jatka Šebkovice	5:00	6:00
Jednota v Humpolci	4:00	12:00
Karbaš	4:30	5:30
Senior Home Telč	4:00	8:30
Vrzal	6:00	6:45
ZD Hodice	4:00	5:00

Do výpočtů musela být data zadávána v minutách. Depo bylo nastaveno na hodnotu od 0 minut do 1440 minut, tedy od 00:00 hod do 24:00 hod.

6.6 VYTVOŘENÍ VSTUPNÍCH DAT PRO MODELOVÉ VÝPOČTY

Všechna zpracovaná data byla nakonec sloučena dohromady a byly vytvořeny vstupní soubory ve tvaru, který je znázorněn v kapitole 5.3.3).

Soubory jsou pojmenovány DIST_MATICE_X.txt a PARAMETRY_X.txt, kde X je číslo úlohy, tedy číslo pořadí dne ve sledovaném období.

6.7 PŘEHLED DISPEČEREM SESTAVENÝCH TRAS

V následujících deseti tabulkách jsou přehledy jednotlivých dnů s vypsanými podrobnostmi o jednotlivých původních trasách.

V každé tabulce je uvedeno číslo vozidla a potom počet jeho zastávek, tedy počet obsluhovaných zákazníků, vozidlem ujetá vzdálenost, hmotnost jím přepraveného zboží a procentuálně vyjádřené využití kapacity vozidla. V posledním řádku je vždy uvedena suma přes všechna vozidla.

Tabulka 3: Přehled původních tras – první pondělí [autor].

DEN 1.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	16	181	997	99,7
2	18	300	926	92,6
3	13	188	673	67,3
4	7	124	669	66,9
5	46	545	995	99,5
6	12	486	738	73,8
7	15	626	701	70,1
8	10	487	565	56,5
Celkem	137	2937 km	6264 kg	78,3 %

Jak je vidět v předchozí tabulce 3, vozidla v prvním pondělí sledovaného období byla poměrně málo vytížena. Nejméně je kapacita využita u vozidla č. 8, přičemž jím ujetá vzdálenost činí téměř 500 km. Náklady na přepravovanou jednotku jsou tedy poměrně vysoké.

Tabulka 4: Přehled původních tras – první úterý [autor].

DEN 2.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	48	562	981	98,1
2	33	307	993	99,3
3	24	348	997	99,7
4	10	248	947	94,7
5	27	395	956	95,6
6	14	381	737	73,7
7	42	373	999	99,9
8	24	260	767	76,7
9	23	415	984	98,4
10	5	198	502	50,2
11	18	305	992	99,2
Celkem	268	3792 km	9855 kg	89,6 %

Tabulka 5: Přehled původních tras – první středa [autor].

DEN 3.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	16	300	926	92,6
2	25	335	864	86,4
3	24	358	855	85,5
4	26	211	996	99,6
5	36	482	965	96,5
6	33	388	987	98,7
7	22	255	966	96,6
8	22	451	956	95,6
9	8	178	675	67,5
10	26	687	998	99,8
11	34	903	958	95,8
12	18	583	910	91,0
Celkem	290	5131 km	11056 kg	92,1 %

Ve druhém dnu sledovaného období (tabulka 4) sice průměrná kapacita činí téměř 90 %, ale na jedné trase existuje vozidlo, jehož kapacita je pouze o dvě desetiny vyšší než 50 %, což z hlediska využití kapacity vozidel znamená nejnižší hodnotu ve zkoumaném souboru. Vozidlem ujetá vzdálenost však činí necelých 200 km, což je nejméně ze všech vozidel v tomto dnu. Náklady na přepravovanou jednotku zboží tedy nejsou opět zbytečně vysoké.

Třetí den sledovaného období (tabulka 5) je z hlediska počtu zákazníků, počtu použitých vozidel, jimi ujetých kilometrů a jimi přepraveného množství zboží největší. Průměrná kapacita je přitom přes 92 %, což je druhým nejlepším výsledkem z celého souboru. Nebýt trasy, na které je kapacita vozidla využita pouze ze 67,5 %, jednalo by se dokonce z hlediska využití kapacity vozidel o nejlepší den. Zmíněné vozidlo s nejméně využitou kapacitou ujelo necelých 200 km, takže náklady na jednotku zboží opět nejsou zbytečně vysoké.

Tabulka 6: Přehled původních tras – první čtvrtek [autor].

DEN 4.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	45	592	995	99,5
2	29	503	876	87,6
3	26	494	981	98,1
4	39	492	998	99,8
5	24	447	988	98,8
6	13	378	855	85,5
7	25	366	805	80,5
8	20	428	1000	100
Celkem	221	3700 km	7498 kg	93,7 %

První čtvrtek ve sledovaném období, který je znázorněn v tabulce výše, patří mezi 6 dnů, ve kterých bylo navštíveno více než 200 zákazníků. Kapacita vozidel byla v průměru využita nejlépe z celého souboru 10 dnů.

V tabulce 7 je znázorněn 5. den ze sledovaného souboru. Z hlediska počtu zákazníků se jedná o jeden z nejméně náročných dnů. Vozidlo s nejméně využitou kapacitou je na trase č. 3. Ujetá vzdálenost není nejmenší ze všech. I přesto ovšem nejsou náklady na přepravovanou jednotku zboží nejvyšší.

Tabulka 7: Přehled původních tras – první pátek [autor].

DEN 5.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	22	636	998	99,8
2	20	663	906	90,6
3	9	476	745	74,5
4	14	267	922	92,2
5	5	91	962	96,2
6	13	192	898	89,8
Celkem	83	2325 km	5431 kg	90,5 %

V následující tabulce 8 je znázorněn 6. den ze souboru deseti zkoumaných dnů. Bylo využito celkem 7 vozidel. Průměrná kapacita těchto vozidel je sice necelých 90 %, ale zboží je mezi ně rozmístěno rovnoměrně.

Tabulka 8: Přehled původních tras – druhé pondělí [autor].

DEN 6.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	15	441	954	95,4
2	21	169	939	93,9
3	18	288	846	84,6
4	12	200	765	76,5
5	9	141	725	72,5
6	17	202	940	94,0
7	47	566	998	99,8
Celkem	139	2007 km	6167 kg	88,1 %

Den 7., tedy druhé úterý (následující tabulka 9) ve zpracovaném období, je z hlediska všech popsanych hodnot nejmenší. Celkově bylo převezeno necelých 5 tun zboží, přičemž průměrné využití kapacity použitých šesti vozidel činilo 83 %.

Tabulka 9: Přehled původních tras – druhé úterý [autor].

DEN 7.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	14	268	976	97,6
2	8	225	699	69,9
3	8	374	652	65,2
4	12	404	822	82,2
5	3	147	834	83,4
6	35	463	998	99,8
Celkem	80	1881 km	4981 kg	83 %

V následující tabulce 10 jsou vypsány konkrétní informace o 8. dnu. Bylo využito celkem 10 vozidel, přičemž byla jejich kapacita využita téměř přesně z 90 %. Zboží bylo mezi vozidla rozmístěno rovnoměrně.

Tabulka 10: Přehled původních tras – druhá středa [autor].

DEN 8.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	21	360	839	83,9
2	17	298	800	80,0
3	19	230	811	81,1
4	34	521	894	89,4
5	29	212	999	99,9
6	16	177	821	82,1
7	24	668	995	99,5
8	23	647	853	85,3
9	15	528	997	99,7
10	9	216	997	99,7
Celkem	207	3857 km	9006 kg	90,1 %

V posledních dvou dnech (tabulky 11 a 12) bylo obsluženo podobné množství zákazníků. Jejich požadavky se dosti lišily, takže muselo být v posledním dnu využito více vozidel. Nutno podotknout, že předposledním dnu byla kapacita vozidel využita vůbec nejlépe.

Tabulka 11: Přehled původních tras – druhý čtvrtek [autor].

DEN 9.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	37	486	1000	100
2	22	396	935	93,5
3	14	289	999	99,9
4	24	446	936	93,6
5	28	430	941	94,1
6	15	374	861	86,1
7	28	328	999	99,9
8	43	528	993	99,3
9	12	174	989	98,9
Celkem	223	3451 km	8653 kg	96,1 %

Tabulka 12: Přehled původních tras – druhý pátek [autor].

DEN 10.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	14	545	837	83,7
2	19	710	914	91,4
3	13	513	661	66,1
4	26	359	980	98,0
5	26	334	974	97,4
6	20	199	714	71,4
7	36	454	978	97,8
8	28	343	954	95,4
9	18	144	958	95,8
10	16	196	928	92,8
11	20	428	945	94,5
Celkem	236	4225 km	9843 kg	89,5 %

A níže je pro přehlednost uveden přehled všech deseti dnů ze zpracovaného souboru (viz následující tabulka 13).

Tabulka 13: Přehled všech 10 původních tras [autor].

Den č.	Počet zastávek	Počet vozidel	Celková ujetá vzdálenost [km]	Celková hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	137	8	2937	6264	78,3
2	268	11	3792	9855	89,6
3	290	12	5131	11056	92,1
4	221	8	3700	7498	93,7
5	83	6	2325	5431	90,5
6	139	7	2007	6167	88,1
7	80	6	1881	4981	83,0
8	207	10	3857	9006	90,1
9	223	9	3451	8653	96,1
10	236	11	4225	9843	89,5
Průměr	188,4	8,8	3330,6	7875,4	89,1

Vozidla tedy za 10 dnů ujela celkem 33 306 km při vytížení jejich kapacity v průměru více než 89 %. V průměru bylo využito 9 vozidel, která dohromady v průměru ujela přes 3300 km a přepravila v průměru téměř 8 tun chlazeného zboží. Všichni zákazníci byli obslouženi řádně v jimi stanovených časových oknech.

7 VYHODNOCENÍ EFEKTIVNOSTI ŘEŠENÍ

V následující kapitole jsou uvedeny informace o jednotlivých nově vypočtených trasách. U každého dne jsou vypsány stejné typy hodnot jako v předchozí kapitole. Dále bude uvedena tabulka s porovnáním nově navržených tras oproti dispečerem navrženým trasám, a k tomu grafické zpracování výsledků ve formě několika grafů. Nakonec bude vyčíslen přibližný odhad uspořené nákladů.

7.1 PŘEHLED NOVĚ NAVRŽENÝCH TRAS

V následujících tabulkách 14 až 23 jsou přehledy jednotlivých nově navržených tras. Stejně jako v předchozí kapitole 6.7 je v každé tabulce uvedeno číslo vozidla a pak jeho počet zastávek, jeho ujetá vzdálenost, hmotnost jím přepraveného zboží a procentuálně vyjádřené využití kapacity vozidla. V posledním řádku je vždy uvedena suma přes všechna vozidla a průměrné vytížení všech vozidel.

Díky využitým sofistikovaným matematickým metodám bylo u prvního dne, tedy prvního pondělí ze sledovaného období (viz tabulka 14), dosaženo úspory 1 vozidla a 407 km, což odpovídá téměř 14 % počtu ujetých kilometrů na původních trasách. Díky úspoře vozidla bylo průměrné využití kapacity vozidel zvýšeno na bezmála 90 %. Nutno podotknout, že seznam obsahuje vozidlo, jehož kapacita není využita ani na 50 %. Ujetá vzdálenost však činí pouze 72 km, takže náklady na jednotku přepraveného zboží nejsou nadprůměrné.

Tabulka 14: Přehled nových tras – první pondělí [autor].

DEN 1.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	5	72	464	46,4
2	19	386	994	99,4
3	16	179	997	99,7
4	18	470	997	99,7
5	20	698	959	95,9
6	43	492	955	95,5
7	16	233	898	89,8
Celkem	137	2530 km	6264 kg	89,5 %

Ve 2. dnu ve sledovaném souboru, by trasy po spočtení vypadaly následovně (viz tabulka 15). Počet využitých vozidel by zůstal stejný, ale počet uspořenéých kilometrů by činil 639 km, což odpovídá téměř 17 % z původního počtu ujetých kilometrů.

Tabulka 15: Přehled nových tras – první úterý [autor].

DEN 2.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	26	332	977	97,7
2	31	360	951	95,1
3	21	319	931	93,1
4	11	97	930	93,0
5	36	386	988	98,8
6	31	369	992	99,2
7	23	206	919	91,9
8	31	328	842	84,2
9	29	362	994	99,4
10	9	179	477	47,7
11	20	215	854	85,4
Celkem	268	3153 km	9855 kg	89,6 %

V následující tabulce 16 je znázorněn den 3. Jedná se o den s největším počtem zákazníků, takže bylo očekáváno, že úspora bude největší. Spočtený počet ušetřených kilometrů by však odpovídal necelým 10 %, úspora by tedy byla překvapivě podprůměrná. Pro úplnost, počet uspořenéých kilometrů na nově spočtených trasách pro tento den by činil 505 km. Průměrné využití kapacity vozidel by se pochopitelně nezměnilo.

Tabulka 16: Přehled nových tras – první středa [autor].

DEN 3.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	29	556	1000	100,0
2	17	208	973	97,3
3	27	283	999	99,9
4	26	206	984	98,4
5	29	338	876	87,6
6	22	293	987	98,7
7	12	162	555	55,5
8	7	133	692	69,2
9	29	435	997	99,7
10	35	638	996	99,6
11	26	603	998	99,8
12	31	771	999	99,9
Celkem	290	4626 km	11056 kg	92,1 %

V tabulce 17 je znázorněn 4. den. Zde byla spočtena největší úspora kilometrů. Vozidla by dohromady ujela o 731 km méně. Relativně to odpovídá úspoře bezmála 20 %.

Tabulka 17: Přehled nových tras – první čtvrtek [autor].

DEN 4.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	30	416	997	99,7
2	19	208	730	73,0
3	22	364	999	99,9
4	34	415	997	99,7
5	32	333	993	99,3
6	28	404	823	82,3
7	27	377	990	99,0
8	29	452	969	96,9
Celkem	221	2969 km	7498 kg	93,7 %

Nově spočtené trasy pro první pátek ze sledovaného období jsou znázorněny v následující tabulce 18. Vzhledem k počtu zákazníků byla naplněna očekávání úspor. Počet vozidel by zůstal stejný a počet uspořené kilometrů by byl podprůměrný, konkrétně 191 km, což je něco přes 8 % z celkového počtu ujetých kilometrů podle tras určených dispečerem.

Tabulka 18: Přehled nových tras – první pátek [autor].

DEN 5.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	23	599	994	99,4
2	11	80	813	81,3
3	5	125	741	74,1
4	21	643	984	98,4
5	11	435	965	96,5
6	12	252	934	93,4
Celkem	83	2134 km	5431 kg	90,5 %

Zákazníci by ve druhém pondělí ze souboru sledovaných dnů (viz následující tabulka 19) byli na základě výpočtů obslouženi stejným počtem vozidel. Jimi ujetá celková vzdálenost by byla o 191 km kratší, což znamená úsporu téměř 15 % z původního počtu ujetých km. Poslední vozidlo je využito z necelých 40 %. Počet jím ujetých km je sice podprůměrný, ale náklady na jednotku přepraveného zboží jsou v tomto případě mírně nadprůměrné.

Tabulka 19: Přehled nových tras – druhé pondělí [autor].

DEN 6.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	14	237	994	99,4
2	20	193	974	97,4
3	20	351	991	99,1
4	41	478	989	98,9
5	17	209	952	95,2
6	14	103	892	89,2
7	13	140	375	37,5
Celkem	139	1711 km	6167 kg	88,1 %

V sedmém dnu (viz tab. 20) je nejmenší počet zákazníků. Dalo by se očekávat, že úspora bude nejmenší. Vozidla by však dohromady ujela o 329 km méně a úspora by v tomto případě byla paradoxně druhá největší, a to 17,5 %. Vozidlo s kapacitou využitou ani ne z 30 % by ujelo pouze 82 km, takže by náklady nebyly nadprůměrně vysoké.

Tabulka 20: Přehled nových tras – druhé úterý [autor].

DEN 7.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	19	385	953	95,3
2	17	256	968	96,8
3	22	404	998	99,8
4	14	278	941	94,1
5	3	147	834	83,4
6	5	82	287	28,7
Celkem	80	1552 km	4981 kg	83 %

V 8. dni (viz tabulka 21) je součet km ujetých na nových trasách menší o 284 km. Úspora je v tomto případě pouze 7,4 %. Počet použitých vozidel zůstal stejný.

Tabulka 21: Přehled nových tras – druhá středa [autor].

DEN 8.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	16	229	947	94,7
2	13	144	659	65,9
3	22	373	871	87,1
4	27	189	968	96,8
5	22	281	985	98,5
6	19	560	993	99,3
7	32	808	988	98,8
8	8	124	603	60,3
9	30	513	1000	100,0
10	18	352	992	99,2
Celkem	207	3573 km	9006 kg	90,1 %

Počet uspořených kilometrů v předposledním dnu, tedy ve druhém čtvrtku ze sledovaného souboru 10 dnů (viz tabulka 22), by byl 550 km. Vzhledem k tomu, že původní počet celkově ujetých km na trasách určených dispečerem byl 3451 km, jednalo by se o úsporu 15,9 %. Počet vozidel by zůstal stejný.

Tabulka 22: Přehled nových tras – druhý čtvrtek [autor].

DEN 9.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	30	424	993	99,3
2	28	303	957	95,7
3	29	361	971	97,1
4	26	311	991	99,1
5	11	185	997	99,7
6	20	339	990	99
7	24	273	866	86,6
8	23	267	893	89,3
9	32	438	995	99,5
Celkem	223	2901 km	8653 kg	96,1 %

Nejmenší procentuální úspora kilometrů byla spočtena u posledního dne, který je znázorněn v následující tabulce 23. Z původního počtu 4225 km by bylo díky vytvořenému modelu a užití výpočetní techniky uspořeno 307 km, což odpovídá 7,3 %. Byl však snížen počet potřebných vozidel, z jedenácti na deset, a bylo dosaženo vůbec nejlepšího průměrného využití kapacity vozidel, které by činilo více než 98 %.

Tabulka 23: Přehled nových tras – druhý pátek [autor].

DEN 10.				
Číslo vozidla	Počet zastávek	Ujetá vzdálenost [km]	Hmotnost zboží [kg]	Využití kapacity [%]
1	25	302	981	98,1
2	16	540	987	98,7
3	21	685	991	99,1
4	17	127	985	98,5
5	28	478	954	95,4
6	21	196	970	97
7	26	244	990	99
8	34	445	998	99,8
9	24	261	992	99,2
10	24	640	995	99,5
Celkem	236	3918 km	9843 kg	98,4 %

Jak je vidět v předchozích tabulkách, díky využití sofistikovaných matematických metod by vždy došlo ke zlepšení. V prvním a posledním dnu ze sledovaného období by se díky výpočtům snížil počet vozidel a u všech dnů by se snížil celkový počet ujetých kilometrů.

Vozidla by podle nových tras za 10 dnů ujela celkem 29 067 km, přičemž by v průměru byla vytížena z 91 %.

Celkově by to tedy znamenalo zvýšení využití kapacity vozidel o 2 % a úsporu přes 4 tisíce ujetých kilometrů.

7.2 POROVNÁNÍ VARIANT

V následující tabulce 24 je znázorněn celkový přehled jak dispečerem určených tras, tak nově spočtených. Pro každý den jsou v tabulce uvedeny informace o původním (dispečerem určeném) počtu využitých vozidel, o jejich celkové ujeté vzdálenosti, o novém (nově spočteném) počtu vozidel a jejich celkové ujeté vzdálenosti, a dále potom úspora počtu vozidel, úspora ujeté vzdálenosti a procentuální vyjádření uspořených kilometrů vůči počtu ujetých kilometrů v dispečerem určených (původních) trasách.

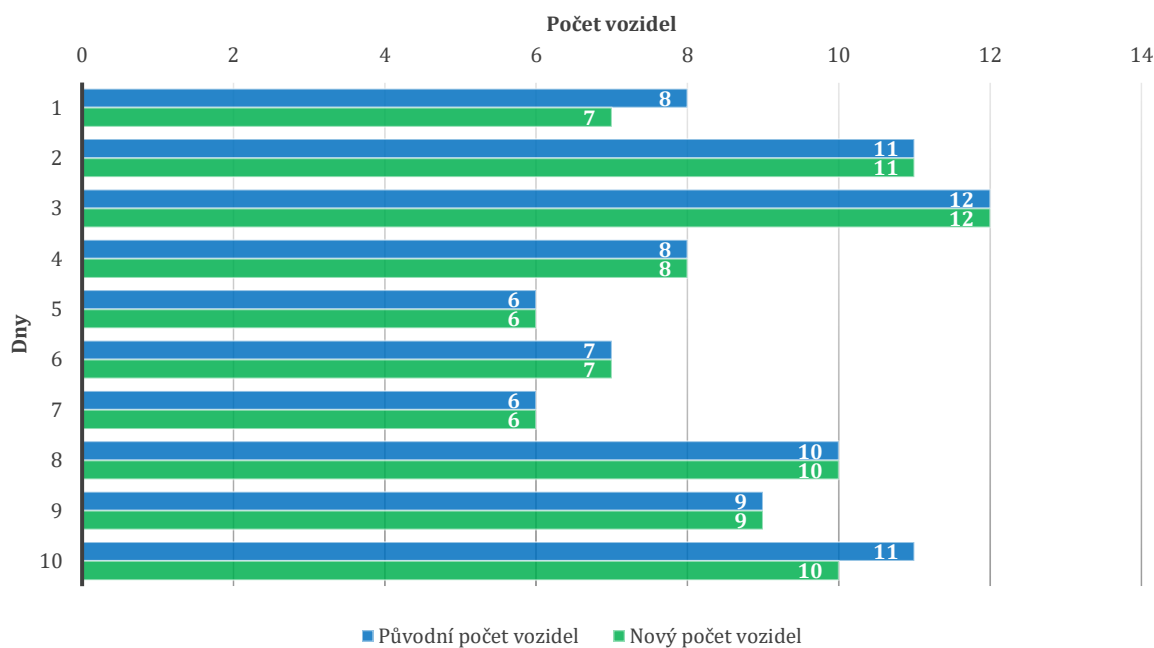
Tabulka 24: Celkový přehled [autor].

Den	Původní počet vozidel	Původní počet kilometrů	Nový počet vozidel	Nový počet kilometrů	Úspora vozidel	Úspora kilometrů	Úspora kilometrů v procentech
1	8	2937	7	2530	1	407	13,9
2	11	3792	11	3153	0	639	16,9
3	12	5131	12	4626	0	505	9,8
4	8	3700	8	2969	0	731	19,8
5	6	2325	6	2134	0	191	8,2
6	7	2007	7	1711	0	296	14,7
7	6	1881	6	1552	0	329	17,5
8	10	3857	10	3573	0	284	7,4
9	9	3451	9	2901	0	550	15,9
10	11	4225	10	3918	1	307	7,3
Σ	88 voz.	33306 km	86 voz.	29067 km	2 voz.	4239 km	13,1 %

V následujících grafech jsou ještě tyto hodnoty graficky znázorněny.

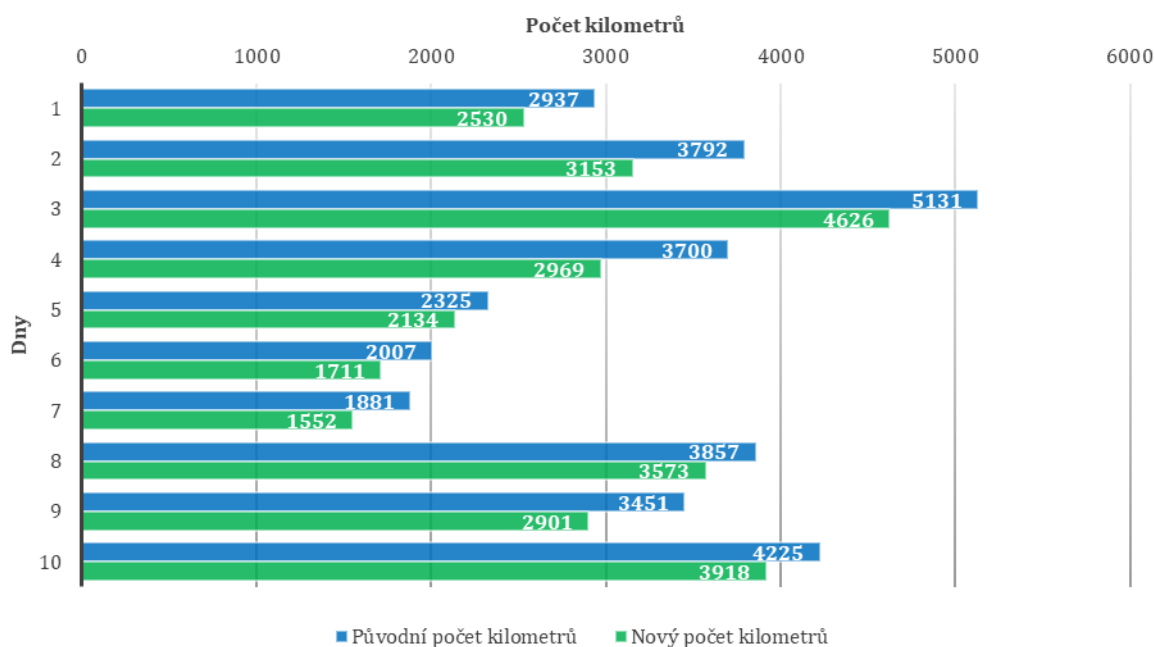
V grafu 1 je graficky znázorněna úspora počtu vozidel pro každý den a v grafu 2 je graficky znázorněna úspora ujetých kilometrů pro každý den ze zpracovaného souboru deseti dnů,

Porovnání původního počtu vozidel s novým za každý den



Graf 1: Porovnání původního počtu vozidel s novým za každý den [autor].

Porovnání původního počtu kilometrů s novým za každý den

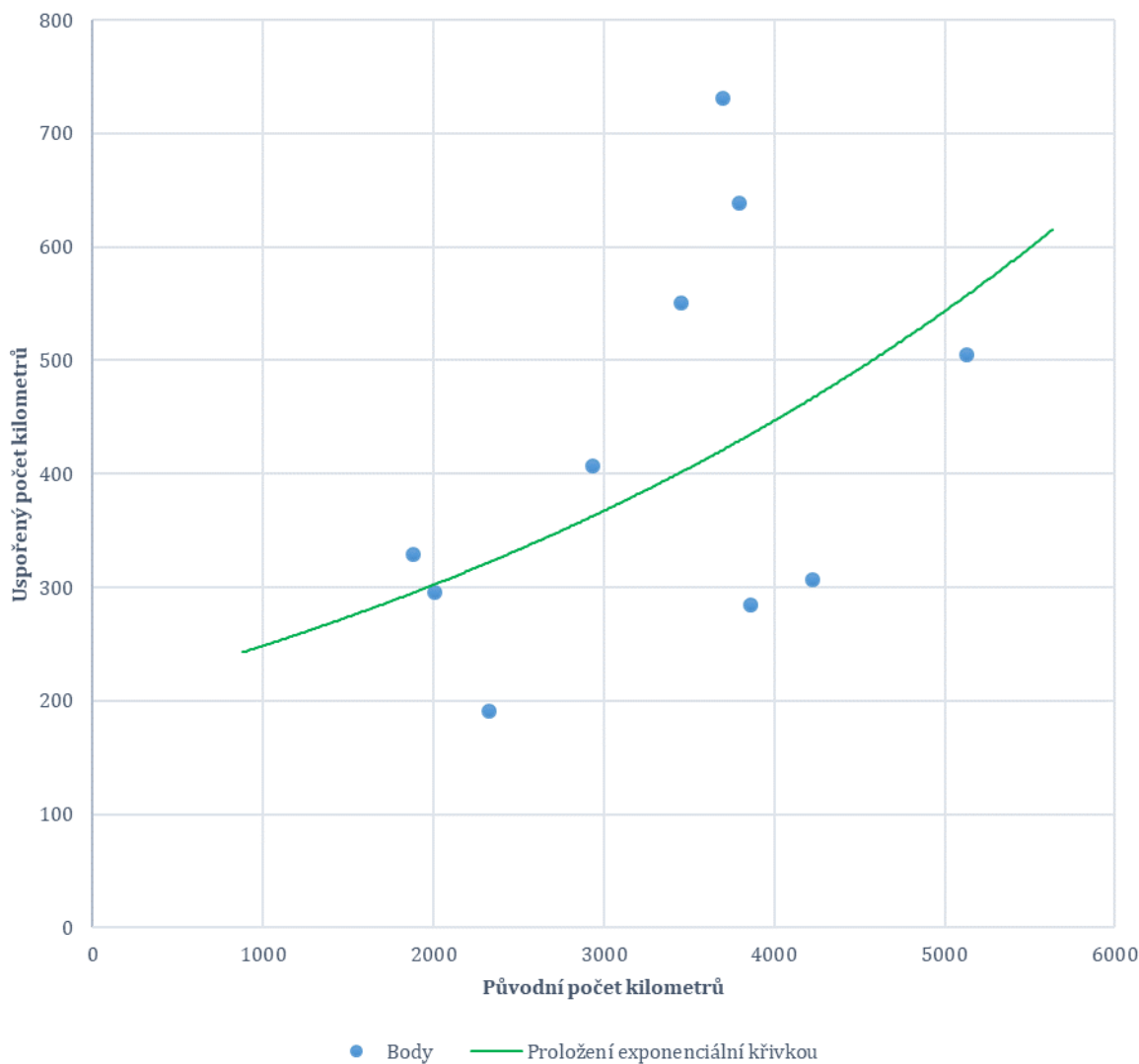


Graf 2: Porovnání původního počtu kilometrů s novým za každý den [autor].

V grafu 2 je patrné, že největší úspora je u druhého, třetího, čtvrtého a devátého dne.

V úvodu je předpokládáno, že využití sofistikovaných matematických metod pro tvorbu tras má tím větší význam, čím větší vzdálenost vozidla dohromady ujedou či čím více je zákazníků, které musí vozidla obsloužit. Závislosti uspořené kilometrů na původním počtu ujetých kilometrů a na počtu zákazníků jsou uvedeny v grafech 3 a 4.

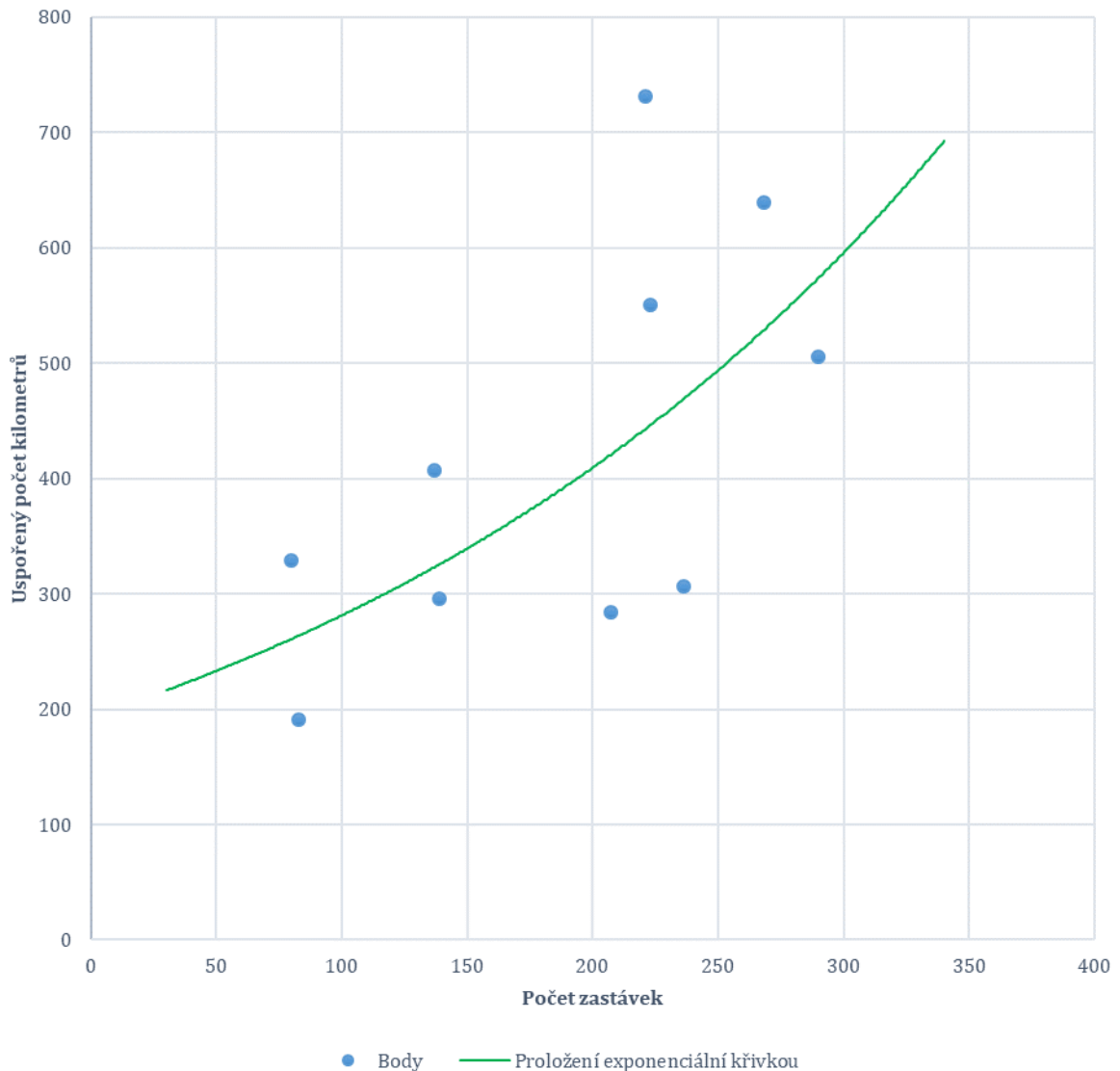
Graf závislosti uspořené kilometrů na původním počtu kilometrů



Graf 3: Graf závislosti uspořené kilometrů na původním počtu ujetých kilometrů [autor].

Jak již bylo řečeno výše, tento graf 3 znázorňuje vztah uspořené ujetých kilometrů vůči původnímu celkovému počtu kilometrů, které vozidla dohromady každý den ujela. Rozložení bodů lépe vyhovuje proložení exponenciální křivkou, což ve své podstatě znamená, že s rostoucím počtem dohromady ujetých kilometrů exponenciálně roste potenciál využívat k určování tras matematické metody a výpočetní techniku.

Graf závislosti uspořené kilometrů na počtu zastávek



Graf 4: Graf závislosti uspořené km na počtu zastávek [autor].

Z hlediska rychlosti růstu proložené exponenciální křivky pochopitelně ještě lépe vypadá graf 4. Hodnota počtu uspořené kilometrů exponenciálně roste s rostoucím počtem zákazníků (zastávek). Chce-li tedy firma rozšiřovat okruh svých zákazníků, měla by reálně uvažovat o zavedení určování denních tras pomocí sofistikovaných matematických metod. Může se totiž stát, že díky těmto rostoucím nákladům nastane situace, kdy s rostoucím počtem zákazníků nebudou celkové náklady na flotilu vozidel klesat, a tedy na základě této úvahy by ani nemělo smysl rozšiřovat okruh zákazníků a zvyšovat přepravní výkon.

Nakonec je ještě znázorněno využití kapacity všech vozidel (viz graf 5), přičemž předmětem zájmu je, jestli jsou vozidla využita alespoň z poloviny, tedy přepravují-li alespoň 500 kg.

Jedinou zdánlivou nevýhodou nově spočtených tras je využití kapacity použitých vozidel. V grafu je patrné, že rozdělení kapacit je sice rovnoměrnější, ale ve čtyřech dnech ze zkoumaného souboru deseti dnů existuje jedno vozidlo, které nemá využitou kapacitu ani z poloviny. Velký problém by to mohl být ve chvíli, kdy by vozidlo zároveň mělo ujet poměrně velký počet kilometrů. Tato situace však v žádném z případů nenastala.

V grafu jsou na svislé ose zobrazeny jednotlivé dny a na vodorovné ose využití vozidel. Pro každý den je znázorněno procentuální využití kapacity jednotlivých vozidel, a to jak u vozidel na původních trasách (modře), tak u vozidel na nových trasách (zeleně). Rozmezí vodorovné osy bylo pro lepší viditelnost zmenšeno na 25 % – 100 %.

Využití kapacity každého vozidla v původních i nových trasách



Graf 5: Využití kapacity každého vozidla [autor].

7.3 POTENCIÁLNÍ ÚSPORA NÁKLADŮ

Procentuální podíl uspořených kilometrů vůči původnímu počtu ujetých kilometrů činí 13,1 %, což je dokonce o něco více, než byl úvodní předpoklad.

Cena jednoho kilometru je odhadována na 10,5 Kč bez DPH. Vzhledem k tomu, že bylo dohromady uspořeno 4 239 km, činí tato úspora celkem 44 510 Kč za 10 pracovních dnů, tedy 2 týdny. Rok má dohromady 52 týdnů. Vynásobíme-li tedy předchozí výsledek číslem 26, získáme roční úsporu. Ta vychází na 1 157 247 Kč, tedy na 96 437 Kč bez DPH za měsíc.

Výpočty jsou ještě graficky znázorněny v následující tabulce 25.

Tabulka 25: Finální hodnota úspory [autor].

Parametr	Hodnota	Jednotka
Uspořené kilometry	4 239	km
Náklady na 1 km:	10,5	Kč/km
Úspora za 2 týdny:	44 510	Kč
Úspora za rok:	1 157 247	Kč
Úspora za měsíc:	96 437	Kč

Je nutno podotknout, že nebyly započteny časové náklady. Využití optimalizačních metod a výpočetní techniky by uspořilo nejen podstatnou část pracovní doby dispečerovi, ale navíc i řidičům, kteří už by si nemuseli trasy upravovat sami.

8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat stávající provoz flotily vozidel, pomocí popsanych matematických metod provoz optimalizovat a vyjádřit uspořené náklady.

První část práce je věnována popisu dopravní společnosti BH trans, s.r.o. a principům rozvozu chlazeného zboží. Dále jsou formou SWOT analýzy popsány vnitřní a vnější vlivy, které na dopravní společnost působí.

Druhá část pojednává obecně o problémech typu okružních jízd s časovými okny – VRPTW (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*). Je uvedeno, z jakých principů řešení problému vychází, je popsán a komentován matematický model a jeho možnosti aplikací a zobecnění.

V další části diplomové práce jsou uvedeny nástroje, kterými je možné problémy typu VRTPW řešit. Kapitola je rozdělena na tři části, ve kterých jsou postupně uvedeny informace o exaktních metodách řešení, jednoduchých heuristických metodách a o metaheuristikách, mezi které patří i metoda Tabu search, která byla pro výpočet tras použita.

Následují kapitoly, ve kterých je popsána praktická část diplomové práce. Nejprve je úloha formulována a matematicky popsána, dále jsou popsány nástroje, pomocí kterých byla úloha řešena. Dále je popsán algoritmus řešení se všemi jeho hlavními proměnnými a funkcemi a byla znázorněna struktura vstupních a výstupních souborů.

Další kapitola popisuje celý proces zpracování výchozích dat do podoby, se kterou je možné využít výpočetní techniku. Je znázorněno, v jaké podobě jsou data dispečerovi předávána a jakým způsobem je zpracovává. Následuje popis tvorby vstupních dat modelu, zejména distančních matic, zobrazení a popsání jednotlivých úloh ze sledovaného období, přehled časových oken zákazníků a přehled jednotlivých dispečerem stanovených tras.

Poslední kapitola se zabývá vyhodnocením efektivnosti navrženého řešení. Nejprve je uveden přehled jednotlivých nově navržených tras vždy pro každou úlohu. Následně je uvedena tabulka, ve které jsou varianty porovnány. Je sledována úspora vozidel a úspora počtu ujetých kilometrů. V úvodu bylo předpokládáno, že dojde ke snížení počtu ujetých

kilometrů a že průměrná denní úspora bude činit cca 10 %. Předpoklad byl potvrzen, průměrná denní úspora by byla 13,1 %.

Následuje porovnání variant graficky. Nejprve je znázorněna úspora vozidel a ujetých kilometrů a poté jsou na základě dalšího úvodního předpokladu znázorněny grafy závislosti uspořených kilometrů na původním počtu celkem ujetých kilometrů a na počtu zákazníků. Předpoklad byl potvrzen a bylo proti původním předpokladům zjištěno, že závislost je spíše exponenciální než lineární. Potvrzení exponenciální závislosti by si vyžádalo provést experimenty v daleko větším rozsahu, což z důvodu časové náročnosti přípravy vstupních dat nebylo možné.

Dále byla spočtena potenciální úspora nákladů díky použitým metodám. Ve sledovaném období 2 týdnů bylo ve dvou případech ušetřeno vozidlo a dále bylo ušetřeno 13,1 % celkem ujetých kilometrů, což činí úsporu 4 239 km. Při odhadu ceny 10,5 Kč/km činí úspora 44 510 Kč. Potenciální měsíční úspora by činila více než 96 000 Kč, což odpovídá roční úspoře více než 1,1 milionu Kč bez DPH.

Závěrem diplomové práce lze konstatovat, že pokud bude dopravní společnost vykazovat rostoucí počet obsluhovaných zákazníků, měla by reálně uvažovat o racionalizaci sestavy denních plánů, jejich optimalizaci a automatizaci sestavy plánů s využitím výpočetní techniky. Poslední graf znázorňuje procentuální využití kapacity každého vozidla v každé úloze. V jednom grafu jsou uvedeny procentuální hodnoty kapacit vozidel jak na dispečerem stanovených, tak na nově spočtených trasách.

9 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] EL-SHERBENY, Nasser A. Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University – Science*. Elsevier, 2010, 123-131.
- [2] HUML, Tomáš. *Optimalizace projektových portfolií s časem a zdroji*. Praha, 2011. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [3] CRAINIC, Teodor Gabriel. a Gilbert LAPORTE. *Fleet management and logistics*. Boston Kluwer, c1998. ISBN 0792381610.
- [4] TOTH, Paolo. a Daniele. VIGO. *The vehicle routing problem*. Philadelphia Society for Industrial and Applied Mathematics, c2002. ISBN 0898714982.
- [5] LENSTRA, Jan Karel a Alexander Rinnooy KAN. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 1981, 221-227.
- [6] KOHL, Niklas a Oli B. G. MADSEN. An optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows based on lagrangian relaxation. *Operation Research* 45 (3), 1997, 395-406.
- [7] BAKER, Edward a Joanne SCHAFFER. Solution improvement heuristics for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints. *American Journal of Mathematics and Management Sciences* 6(3,4), 1989, 261-300.
- [8] KAFKA, Ondřej. *Optimální plánování rozvozu pomocí dopravních prostředků*. Praha, 2013. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [9] CHIANG, Wen-Chyuan a Robert RUSSELL. Simulated annealing metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows. *Annals of Operations Research* 63, 1996, 3-27.

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Tabulka úloh a jejich značky [5].....	15
Obrázek 2: Výpočetní náročnost úloh [5].....	15
Obrázek 3: Krok 2 – <i>Opt</i> [8].....	25
Obrázek 4: Krok 3 – <i>Opt</i> [8].....	25
Obrázek 5: <i>Or</i> – <i>Opt</i> krok přesouvající 2 vrcholy [8].	25
Obrázek 6: Crossover [8].	26
Obrázek 7: Distanční matice [autor]	37
Obrázek 8: Parametry k úloze [autor]	37
Obrázek 9: Výstup výpočtu 5. dne [autor].	38
Obrázek 10: Požadavky odběratele č. 1 [dispečer dopravní společnosti].....	39
Obrázek 11: Požadavky odběratele č. 2 [dispečer dopravní společnosti].....	40
Obrázek 12: Požadavky odběratele č. 3 [dispečer dopravní společnosti].....	41
Obrázek 13: Požadavky odběratele č. 4 [dispečer dopravní společnosti].....	41
Obrázek 14: Rozpiska tras s přiřazenými vozidly a řidiči [dispečer dopravní společnosti].	42
Obrázek 15: GPS souřadnice jednoho ze zákazníků [maps.google.com].....	43
Obrázek 16: OD Cost Matrix v ArcGIS Pro [autor].	44
Obrázek 17: První pondělí [autor].	45
Obrázek 18: První úterý [autor].	46
Obrázek 19: První středa [autor].	46
Obrázek 20: První čtvrtek [autor].	47
Obrázek 21: První pátek [autor].	48
Obrázek 22: Druhé pondělí [autor].	48
Obrázek 23: Druhé úterý [autor].	49
Obrázek 24: Druhá středa [autor].	50
Obrázek 25: Druhý čtvrtek [autor].	50
Obrázek 26: Druhý pátek [autor].	51
Obrázek 27: Všechny dny v jednom obrázku [autor].	52

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Porovnání původního počtu vozidel s novým za každý den [autor].....	69
Graf 2: Porovnání původního počtu kilometrů s novým za každý den [autor].	69
Graf 3: Graf závislosti uspořenéých kilometrů na původním počtu ujetých kilometrů [autor].	70
Graf 4: Graf závislosti uspořenéých km na počtu zastávek [autor].	71
Graf 5: Využití kapacity každého vozidla [autor].	73

12 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: SWOT analýza společnosti BH trans, s.r.o. [autor]	13
Tabulka 2: Vybraná časová okna zákazníků [autor].	53
Tabulka 3: Přehled původních tras – první pondělí [autor].	54
Tabulka 4: Přehled původních tras – první úterý [autor].	55
Tabulka 5: Přehled původních tras – první středa [autor].	55
Tabulka 6: Přehled původních tras – první čtvrtek [autor].	56
Tabulka 7: Přehled původních tras – první pátek [autor].	57
Tabulka 8: Přehled původních tras – druhé pondělí [autor].	57
Tabulka 9: Přehled původních tras – druhé úterý [autor].	58
Tabulka 10: Přehled původních tras – druhá středa [autor].	58
Tabulka 11: Přehled původních tras – druhý čtvrtek [autor].	59
Tabulka 12: Přehled původních tras – druhý pátek [autor].	59
Tabulka 13: Přehled všech 10 původních tras [autor].	60
Tabulka 14: Přehled nových tras – první pondělí [autor].	61
Tabulka 15: Přehled nových tras – první úterý [autor].	62
Tabulka 16: Přehled nových tras – první středa [autor].	63
Tabulka 17: Přehled nových tras – první čtvrtek [autor].	63
Tabulka 18: Přehled nových tras – první pátek [autor].	64
Tabulka 19: Přehled nových tras – druhé pondělí [autor].	64
Tabulka 20: Přehled nových tras – druhé úterý [autor].	65
Tabulka 21: Přehled nových tras – druhá středa [autor].	65
Tabulka 22: Přehled nových tras – druhý čtvrtek [autor].	66
Tabulka 23: Přehled nových tras – druhý pátek [autor].	67
Tabulka 24: Celkový přehled [autor].	68
Tabulka 25: Finální hodnota úspory [autor].	74