ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Margarita Koropova

OPTIMALIZACE DISTRIBUCE VÝROBNÍCH DÍLŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Diplomová práce

2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

ČVUT FD

K617 .... Ústav logistiky a managementu dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Margarita Koropova

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – LA – Logistika a řízení dopravních procesů

Název tématu (česky): **Optimalizace distribuce výrobních dílů v automobilovém průmyslu**

Název tématu (anglicky): Optimization of Production Parts Distribution in Car Industry

Zásady pro vypracování

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

- Distribuce automobilových dílů v rámci Evropy ve společnosti Gefco Česká Republika, s. r. o.
- Teoretické možnosti řešení lokačních úloh
- Analýza existujícího distribučního modelu
- Optimalizace existujícího distribučního modelu
- Výhodnocení výsledků a doporučení pro implementaci v reálném provozu

ČVUT
FD

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: VOLEK, J., LINDA, B. Teorie grafů - aplikace v dopravě a veřejné správě. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012

JANÁČEK, J. Optimalizace na dopravních sítích. Vyd. 2. přepracované. Žilina: Žilinská univerzita, 2006

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Horák, Ph.D.**
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

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
-3-
L.S.

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. Margarita Koropova
jméno a podpis studenta

V Praze dne .... 6. června 2017

Poděkování

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Horákovi, Ph.D. za jeho rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Rovněž bych chtěla poděkovat doc. Ing. Josefu Volkovi, CSc. za vstřícnost a cenné rady při vypracování teoretické a praktické části.

Mé poděkování též patří kolegům z GEFCO Česká Republika, s.r.o za pomoc a poskytnuté informace a Bc. Kirylu Miranovichovi za pomoc při vypracování algoritmu.

Prohlášení

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 vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 30. 11. 2017 ....

Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

OPTIMALIZACE DISTRIBUCE VÝROBNÍCH DÍLŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

diplomová práce
listopad 2017
Bc. Margarita Koropova

ABSTRAKT:

Cílem diplomové práce je návrh optimalizace současného modelu distribuce automobilových dílů v logistické společnosti GEFCO Česká Republika, s. r. o. s pomocí lokační analýzy. V teoretické části je představena společnost GEFCO a je porovnán dřívější a současný model distribuce automobilových dílů. Dále jsou popsány metody operačního výzkumu, které slouží k řešení dopravních problémů a zvlášť je popsána lokační analýza. V praktické části je proveden výzkum pro zjištění optimálního umístění skladů pro rozvoz automobilových dílů. Pro účely diplomové práce byl použit iterativní algoritmus, sloužící k řešení lokačních úloh. Algoritmus byl implementován do interaktivního programu, napsaného v jazyce Python. Výsledek řešení je následně vyhodnocen a jsou doporučena opatření pro implementaci v provozu.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Optimalizace, lokační analýza, distribuce, automobilový průmysl, automobilové díly

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

OPTIMIZATION OF PRODUCTION PARTS DISTRIBUTION IN CAR INDUSTRY

Diploma Thesis

November 2017

Bc. Margarita Koropova

ABSTRACT:

The thesis proposes an optimization of automotive parts distribution in logistics company GEFCO by using the location analysis. The theoretical part introduces GEFCO and compares the earlier model of spare parts distribution with the current one. In this thesis, the methods of operational research used for solving problems in transportation are also described. Particularly, the location analysis is introduced. In the practical part, a research is carried out to find the optimal location of the warehouse for the distribution of automotive parts. For the purposes of the thesis, the iterative algorithm is implemented in an interactive program to solve the location problem. The outcome of the solution is then evaluated and recommendations for implementation in operations are suggested.

KEYWORDS: Optimization, location analysis, distribution, car industry, automotive parts

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CPM	Critical Path Method
FCL	Full Containerload
FIFO	First In First Out
FTL	Full Truckload
FVL	Finished Vehicles Logistics
GPS	Global Positioning System
ISO	International Organization for Standardization
JIT	Just In Time
LCL	Less Than Containerload
LTL	Less Than Truckload
MPM	Methode des Potentiels Metra
OVL	Overland
OVS	Overseas
PDI	Pre-delivery Inspections
PERT	Program Evaluation & Program Technique
PPO	Post Production Operations
PSA	Peugeot Société Anonyme
RŽD	Rossijskije Železnyje Dorogi
TPCA	Toyota Peugeot Citroën Automobile
TSP	Travelling Salesman Problem

ÚVOD

Vybraná logistická společnost je velkou mezinárodní firmou, působící po celém světě. Jedná se o dceřinou společnost PSA Group, která se nazývá GEFCO. Hlavní oblastí, na kterou je daná společnost zaměřena, je automobilový průmysl. Pro své největší a nejdůležitější zákazníky se firma vždy snaží nabídnout optimální řešení, a proto své služby neustále zlepšuje. Z tohoto důvodu byla v roce 2015 ve společnosti provedena optimalizace procesu distribuce náhradních a výrobních automobilových dílů pro francouzské PSA továrny.

Cílem této diplomové práce je zjistit, zda provedená optimalizace je pro společnost GEFCO nejlepším možným řešením. Rozhodnutí o optimalizaci bude uskutečněno pomocí operačního výzkumu na základě výsledků lokační analýzy. Pro lokační analýzu bude kromě manuálního řešení vypracován program, umožňující spočítat výsledky po zadání vstupních dat. Kromě ověření provedené optimalizace distribučních tras budou zjištěny i další možná opatření, která lze zavést pro efektivnější proces obsluhy klientů.

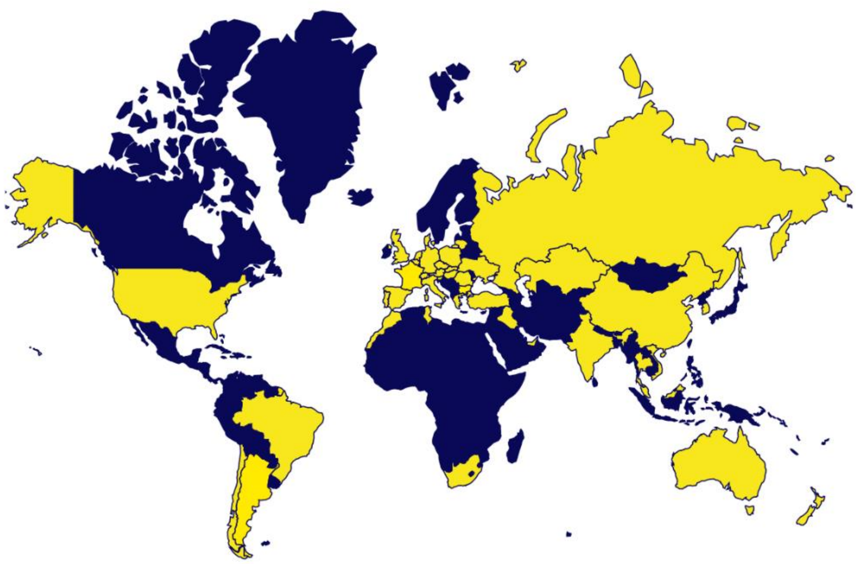
1 DISTRIBUCE AUTOMOBILOVÝCH DÍLŮ VE SPOLEČNOSTI GEFCO ČESKÁ REPUBLIKA, S.R.O.

1.1 O společnosti GEFCO

1.1.1 Obecné informace o společnosti GEFCO

Firma GEFCO byla založena ve Francii v roce 1949 automobilovou společností Peugeot jako „Les Groupages Express de Franche-Comté“, neboli sběrná služba francouzského regionu Franche-Comté. GEFCO je dceřinnou společností PSA Peugeot Citroën, která se postupně rozvíjela a dnes poskytuje logistické služby po celém světě. Její rozvoj začal v roce 1955, kdy GEFCO zvyšovala své aktivity po celé západní Evropě. Od roku 1998 do roku 2011 expanduje do centrální a východní Evropy (Německo, Polsko, Česká republika, Rakousko, Slovensko, Maďarsko, Rumunsko, Slovinsko, Dánsko, Ukrajina, Litva, Bulharsko), Jižní Ameriky (Argentina, Brazílie, Chile), Afriky (Maroko, Tunisko), Asie (Turecko, Čína, Hongkong, Kazachstán). Po roce 2011 přináší GEFCO svoje služby i do dalších zemí. Dnes má firma zastoupení v 37 státech a celkově působí ve 150 státech. Na obrázku číslo 1 jsou žlutě vyznačeny státy, ve kterých má firma zastoupení.

V dnešní době patří GEFCO mezi deset největších poskytovatelů logistických služeb v Evropě a je světovým lídrem v logistice automobilového průmyslu.



Obrázek 1. Zastoupení GEFCO ve světě (žlutě). (Zdroj: autor)

V roce 2012 získala společnost RŽD (Ruské státní železnice) 75 % akcií a stala se majoritním vlastníkem firmy. Zbylých 25 % akcií stále patří PSA (Peugeot Citroën Group). Od roku 2012 do současné doby je hlavou nejvyššího vedení ředitel skupiny GEFCO Francouz Luc Nadal.

V současné době je v GEFCO zaměstnáno přibližně 11,5 tisíce pracovníků. Pozemní přepravu (Overland) zajišťuje 500 stálých linek pro distribuci zboží po celém světě a dalších 300 destinací obsluhuje námořní služba Overseas. Co se týká logistiky hotových vozů, jsou od výrobců přepraveny více než 4 miliony nových automobilů. Celkový obrat společnosti GEFCO přesahuje 4 miliardy eur.

1.1.2 GEFCO Česká republika, s.r.o.

Zastoupení GEFCO v České republice bylo zřízeno 26. února 2003. Důvodem pro založení dceřinné společnosti se stala potřeba zajištění logistických toků mezi PSA Peugeot Citroën a Toyota Motor Corporation, které na základě vzájemné kooperace postavily v roce 2002 automobilku TPCA v Kolíně a nyní ji úspěšně provozují. Dalším cílem bylo posílit distribuční síť skupiny GEFCO, která poskytuje výrobcům a dealerům komplexní logistické služby. Proto se již po krátké době společnost GEFCO Česká republika, s. r. o. začala rozšiřovat a působit nejen pro účely zásobování továrny TPCA, ale poskytovat i různé služby pro skupiny dalších zákazníků.

Výsledkem rozšíření je v České republice vznik celkově 7 poboček provozujících logistické služby:

- sídlo společnosti GEFCO Česká republika s.r.o., centrála se nachází v Praze ve Futurama Business Parku a zároveň je zde operační centrum pro Overseas,
- pobočka Jažlovice. Warehousing & Overland,
- pobočka Kolín, Automotive,
- pobočka Kolín (Ovčáry), Overland & Customs,
- pobočka Brno, Overland & Warehousing,
- pobočka Otrokovice, Customs,
- pobočka Ostrava, Overland & Overseas.

Navíc se jako samostatně působící společnost od GEFCO Česká republika, s.r.o. oddělilo GEFCO Forwarding CZ, s.r.o., které momentálně sídlí v areálu pražského letiště a poskytuje služby letecké přepravy. Pobočky jsou zmapovány na obrázku níže.

Obrázek 2. Pobočky GEFCO v České republice. (Zdroj: [1])

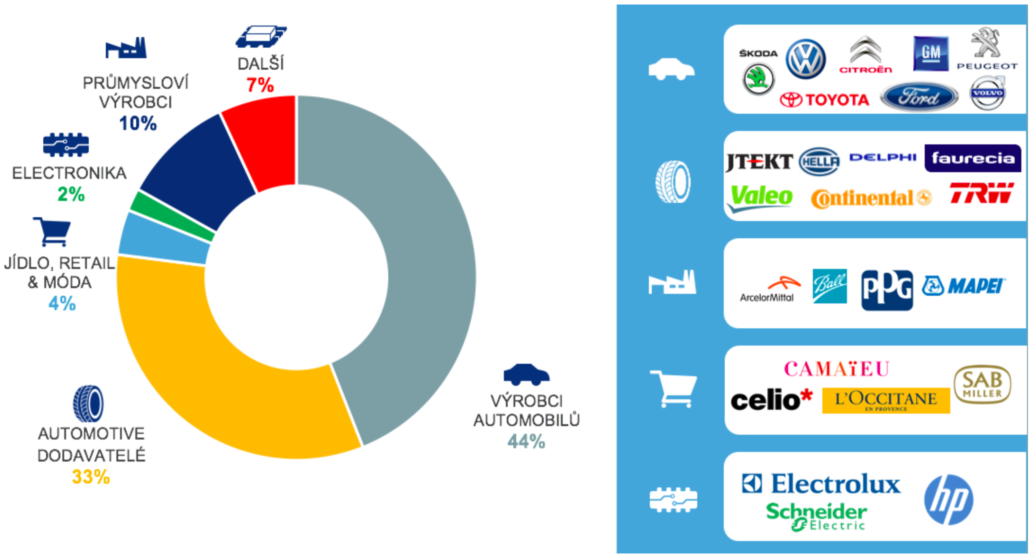
Služby poskytované každou pobočkou budou podrobněji popsány v následující kapitole.

V současné době je ve společnosti GEFCO Česká republika, s.r.o. zaměstnáno více než 300 pracovníků. Společnost má obrat kolem 2,5 miliardy Kč ročně.

Výkon GEFCO vyjádřený v číslech za rok 2016 je následující:

- 170 tisíc zásilek sběrné služby ročně,
- 250 expedovaných vozidel z TPCA,
- 1300 námořních/leteckých přeprav ročně,
- miliony tun přepravovaného nákladu,
- 250 přichystaných palet za rok,
- 15 tisíc celně odbavených zásilek,
- 240 000 m^2 skladovací plochy pro automobily,
- 17 000 m^2 plochy skladů pro zásilky.

Mezi zákazníky GEFCO patří především výrobci automobilů (PSA, Škoda, Toyota, General Motors, Volvo, Ford a Volkswagen) a dodavatelé náhradních nebo výrobních dílů automobilového průmyslu (Valeo, Continetal, Faurecia, Jtekt, Hella, Delphi, TRW a mnoho dalších), kteří tvoří největší část GEFCO zákazníků, a to v rozsahu více než 70 %. Dalšími klienty jsou výrobci jiného průmyslu (například slévárny). Menší podíl mají odvětví elektroniky, potraviny, módní a retailové obchody, kosmetika a jiné. Diagram zákazníků a jejich rozdělení dle jednotlivých oblastí jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Obrázek 3. Zákazníci GEFCO Česká republika, s.r.o. (Zdroj: [1])

V roce 2013 získala společnost GEFCO Česká republika, s.r.o. dva ISO certifikáty týkající se kvality poskytovaných služeb a ochrany životního prostředí a v současné době pracuje v návaznosti na ISO 9001:2001 (Quality Management System) a ISO 14001:2004 (Environmental Management System).

1.1.3 Rozsah služeb poskytovaných firmou

GEFCO Česká republika, s.r.o. poskytuje celkově 5 základních typů služeb:

- Finished Vehicles Logistics (FVL) – Logistika hotových vozů, je též známá jako Automotive,
- Overland (OVL) – Pozemní přeprava,
- Overseas (OVS) – Letecká a námořní přeprava,
- Logistics & Warehousing – Logistika a skladování,
- Customs – Celní a daňové zastoupení.

Dále bude každá z těchto služeb popsána zvlášť.

Logistika hotových vozů (Automotive)

Pobočka zodpovědná za Automotive služby se nachází v Kolíně přímo vedle automobilky TPCA. Mezi služby pobočky patří uskladnění hotových vozidel a veškerý servis včetně mytí, PPO (post production operations), PDI (pre-delivery inspections) a následující distribuce automobilů. PPO nebo služby po výrobě zahrnují pískování skel, instalace navigací, vyhřívaných sedadel, alarmů atd. Pod PDI nebo inspekci před doručením patří kontrola kvality a fyzické testy. Další služby prováděné v areálu pobočky jsou: příjem automobilů z výroby TPCA, silniční přepravy a nakládky vagonů.

Pozemní přeprava (Overland)

Pozemní přeprava je nejrozsáhlejší službou v celém GEFCO, proto se na silniční přepravě podílejí čtyři pobočky: Jažlovice, Brno, Kolín a Ostrava. Tyto pobočky provádějí každoročně společně přes 200 tisíc přeprav. Největší podíl přeprav má transport celovozových zásilek, kterým se říká FTL (Full Truckload). Velký význam mají i další služby, jako jsou dokládky LTL (Less than Truckload), vnitrostátní a mezinárodní distribuce, expresní zásilky GEFCO Special a JIT (Just in Time) režim přeprav. Rozmanitou síť má sběrná služba, která je provozována díky spolupráci jak českých, tak i zahraničních poboček GEFCO, což zaručuje širokou geografii přeprav. Důležitým projektem je projekt Manage Fleet, díky kterému může mít speditérská společnost GEFCO vozový park a obstarávat vozidla dopravců jako vlastní.

Letecká a námořní přeprava (Overseas)

Před několika lety se od českého GEFCO oddělily služby letecké přepravy, které v současné době provozuje GEFCO Forwarding, s.r.o. se sídlem v Praze 6 v areálu letiště Václava Havla. Nyní je společnost GEFCO Česká republika, s.r.o. zodpovědná pouze za námořní přepravy, ale v těsné spolupráci s GEFCO Forwarding, s.r.o. nabízí zákazníkům plnohodnotný servis, což znamená, že klienty rozdělení poboček nijak neovlivnilo. Operační centra pro námořní přepravy se nacházejí v Praze a v Ostravě. Mezi služby Overseas patří Ocean Stream, Sky Stream a Land Stream. Ocean Stream má na starosti dopravu celokontejnerů (FCL – Full Containerload) a sběrnou službu (LCL – Less Than Containerload). Sky Stream zajišťuje pravidelné odlety, expresní přepravy a řešení na míru. Pod Land Stream se rozumí kombinace silniční a námořní dopravy do jednotlivých států. Každá služba poskytuje zákazníkům aktuální informace o zásilce v reálném čase a dokáže doručit objednávku na určitou adresu.

Logistika a skladování (Logistics)

Skladovací plochy mají velký význam pro aktivity GEFCO, proto se ve společnosti neustále pracuje na jejich zlepšení a rozšíření. Dnes zaujímají logistika a skladování plochu 15 000 m^2 v Jažlovicích a 2000 m^2 v Brně. Jažlovická pobočka kromě samotného skladu též disponuje 19 rampami pro nakládku a vykládku a 3 vjezdovými rampami pro menší vozidla. Nejdůležitější služby, které poskytuje oddělení logistiky, jsou picking (kompletování objednávky) a kitting (vybavení zařízením, oblečením atd.), labeling, repacking a coopacking zásilek a jejich třídění. Pro optimalizaci služeb byly v GEFCO vyvinuty vlastní manipulační jednotky, které mají název GEFCOBox. Tato inovace je systémem vratných přepravních obalů, které se staly ekonomicky výhodnějším a ekologicky přijatelnějším řešením pro modulární balení. Do GEFCOBox systému patří plánování jednotlivých toků pro následující manipulaci s obaly a jejich údržba. Vzhledem k celkovému objemu přeprav přináší v GEFCO, zavedený systém každoročně velké výhody a úspory. V současné době má GEFCO k dispozici kolem 6,5 milionu vlastních obalů.

Celní a daňové zastoupení (Customs)

Tato služba je vyvinuta především pro klienty, kteří potřebují odeslat zboží do zahraničí, ale nemají potřebné zkušenosti a možnosti, nebo nechtějí řešit celní formality sami. Střediska pro celní a daňové služby jsou v Jažlovicích, Kolíně, Brně a Otrokovicích. GEFCO má dlouholetou praxi v oblasti celního a daňového zastoupení a všem svým zákazníkům vždy nabízí nejlepší a nejjednodušší řešení. Firma má AEO certifikát (Authorised Economic Operator), což jí umožňuje jako oprávněnému ekonomickému subjektu provádět celní procedury ve zjednodušeném postupu. Společnost navíc zajišťuje dovoz a vývoz a zastupuje klienta v celním řízení, a to včetně zajištění celních dokumentů a řešení celního dluhu. Co se týká daňového zastoupení, je zde možnost organizace a registrace DPH subjektů ze všech zemí EU a ze Švýcarska, včetně související administrativy a komunikace s úřady. To vše se provádí za účasti znalců místní legislativy, kteří dokážou vypracovat i hlášení pro orgány státní správy.

1.1.4 Sklad v Jažlovicích

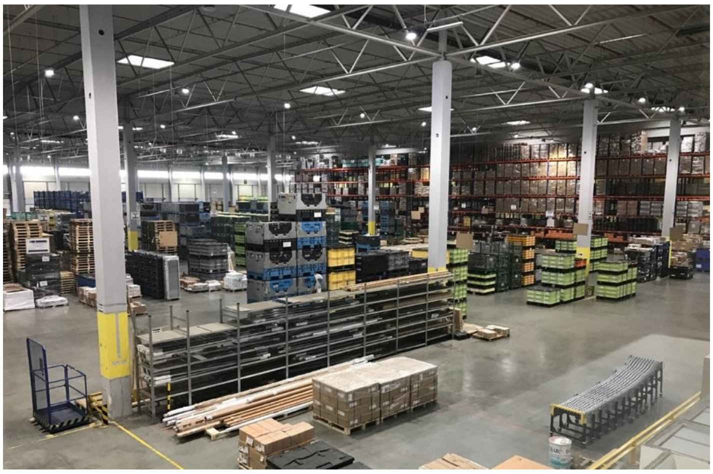
Sklad v Jažlovicích (viz obrázek 4) je jedním z největších skladů GEFCO v Evropě a vyřizuje požadavky zákazníků denně od 6:00 do 23:00 hodin.

Tento sklad existuje od roku 2009 a vznikl sdružením dvou poboček GEFCO: v Čestlicích a Nupakách u Prahy. Důvodem pro sjednocení se staly příliš vysoké náklady na provoz dvou skladovacích ploch. Pobočka v Čestlicích měla na starosti funkci Overland a jejím hlavním úkolem byl příjem FTL zásilek ze zahraničí a jejich následná distribuce v České republice, přičemž oblasti Moravy a Slezska obstarávala pobočka v Brně. Služby pobočky v Nupakách byly zaměřeny především na logistiku a skladování, pro které je zapotřebí mnohem větší plocha. Zde probíhala veškerá manipulace se zbožím, krátkodobé a dlouhodobé skladování, svoz a rozvoz zásilek a řešení na míru pro každého klienta. Dnes je v logistickém parku v Jažlovicích pouze jedna pobočka, která provozuje jak Overland služby, tak i logistiku se skladováním. Kromě toho je zde jedno z největších operačních center pro dispečink, tender centrum a oddělení nákupu transportních služeb. Samotný sklad má celkovou plochu 14 500 m^2 a existuje zde jak volné, tak i regálové skladování. Téměř každý sloup je označen dle typu zboží, které se tam skladuje, respektive říká, do jaké cílové destinace musí být zboží později expedováno. Velkou část zásob tvoří výrobní a náhradní díly, které jsou vždy připraveny k expedici pro automobilové továrny PSA ve Francii.

V roce 2016 byl v Jažlovickém skladu zaveden systém časových oken, což umožnilo dopravcům přijíždějícím na vykládku či nakládku předem si zarezervovat čas příjezdu, a tím se zbavit čekání ve frontě. K systému časových oken se ještě vrátíme v praktické části diplomové práce.

Veškeré procesy probíhající ve skladu se provádějí v návaznosti na ISO 9001. Manipulace při zpracování objednávky zahrnuje většinou následující kroky:

- příjem vozidla,
- vykládka či nakládka vozidla na rampě,
- uskladnění zboží,
- příprava objednávky.



Obrázek 4. Sklad v Jažlovicích. (Zdroj: autor)

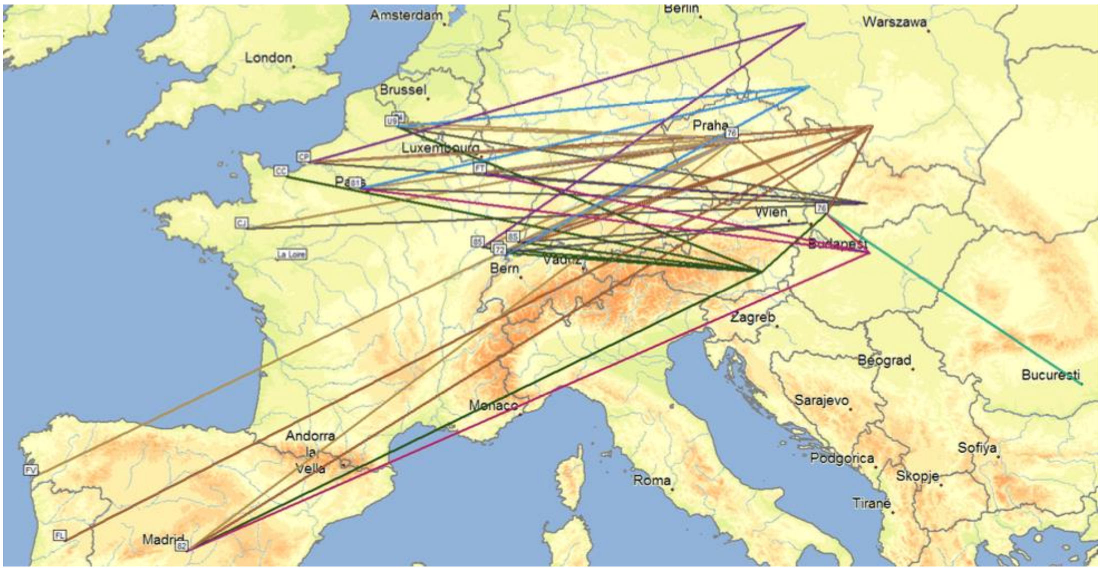
1.2 Porovnání dřívějšího a aktuálního modelu distribuce

Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, vznikla organizace GEFCO primárně pro účely PSA Group a původně sloužila pouze jako přepravce své mateřské společnosti. Ačkoli má v současné době GEFCO mnohem více zákazníků, PSA Group je stále nejvýznamnějším a nejdůležitějším partnerem. Právě proto se GEFCO snaží nabídnout PSA Peugeot Citroën nejlepší a nejkvalitnější služby, a to jak z finančního, tak i z časového hlediska. To se stalo hlavním důvodem pro zlepšení dřívějšího modelu distribuce náhradních a výrobních dílů, ve kterém nebylo využití vozů a tras úplně efektivní. Na začátku popíšeme, jak probíhala distribuce výrobních a náhradních dílů mezi společnostmi GEFCO a PSA Group do implementace nového distribučního řešení a poté uvedeme, jak se tento model distribuce změnil.

Před zavedením nového modelu v prosinci 2015 probíhala distribuce náhradních a výrobních dílů do západoevropských továren koncertu PSA následujícím způsobem: potřebné díly z jednotlivých evropských zemí se svážely do příslušných poboček GEFCO a následně se expedovaly do PSA továren ve Francii. Celkově se na přepravách podílelo 8 GEFCO poboček: na Slovensku, v České republice, v Rakousku, v Maďarsku, v Rumunsku a 3 pobočky v Polsku. Pobočka v Rumunsku byla však později z distribuce vyloučena, a to vzhledem k malému objemu zboží v této oblasti. Rozmístění poboček můžeme vidět na obrázku níže.

Obrázek 5. Rozmístění poboček GEFCO pro dřívější model distribuce. (Zdroj: [2])

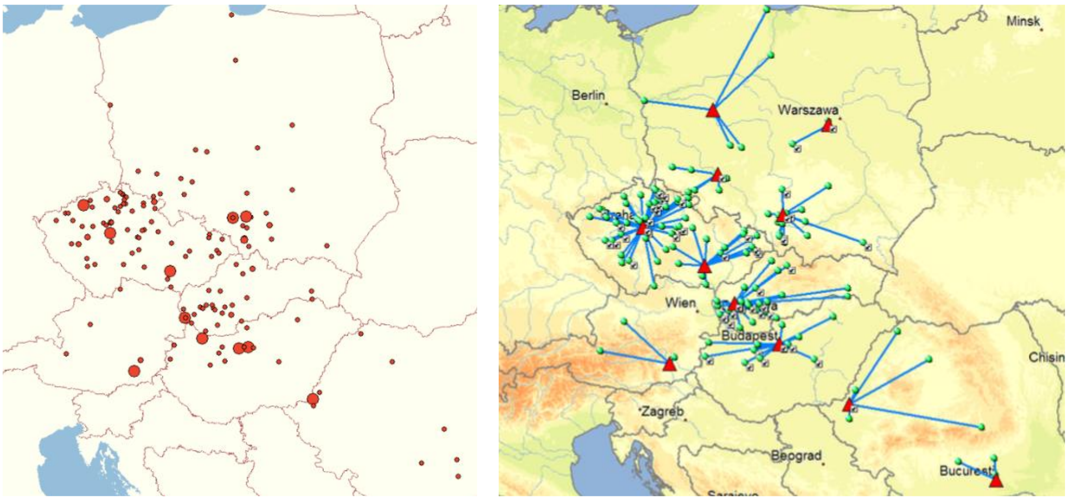
Kromě továren ve Francii vlastní koncert PSA ještě dvě továrny ve Španělsku, do kterých se také přepravovalo. Tak byly díly dováženy do celkově třinácti cílových destinací: ve Francii do PSA Sochaux, PSA Hérimoncourt, PSA Mulhouse, PSA Le Havre (PLIP), PSA Poissy, PSA Sevelnord, PSA Valenciennes, PSA Tremery, PSA Metz, PSA Vesoul, PSA Rennes, a ve Španělsku do PSA Madrid a PSA Vigo. Pokud znázorníme všechny dopravní toky, které se objevovaly při distribuci dílů ze všech GEFCO poboček do jednotlivých PSA továren ve Francii, dostaneme následující obrázek:



Obrázek 6. Dopravní toky pro dřívější model distribuce. (Zdroj: [2])

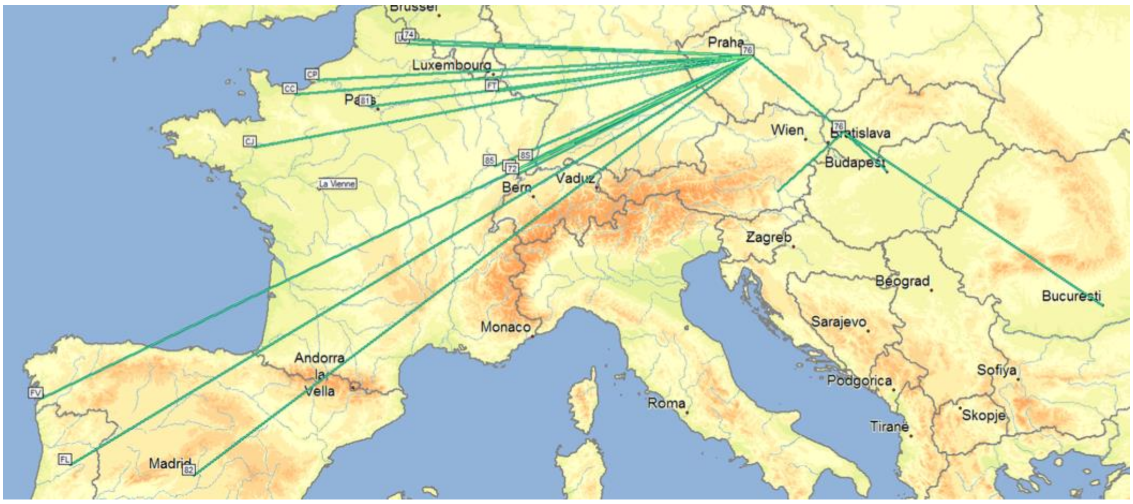
V roce 2015 došlo k rozhodnutí dosáhnout vyšší efektivity, a to prostřednictvím centralizace dopravních toků z jednotlivých zemí do jednoho skladu (anglicky „hub“), ze kterého bude následně probíhat rozvoz do továren PSA. Optimalizační projekt dostal název NATA a jeho příprava trvala přibližně jeden rok. Nejdříve byly zmapovány objemy zboží (náhradní a výrobní díly od dodavatelů), které jsou v jednotlivých evropských zemích vyráběny. Tyto objemy byly následně přiřazeny příslušným pobočkám GEFCO, které jsou umístěny nejblíž k jednotlivým dodavatelům. Výsledek první etapy je vidět na obrázku 7.

Z obrázku je dobře vidět i důvod pro budoucí vyloučení rumunské pobočky z projektu – objem vyráběných dílu v porovnání s ostatními dodavateli z jiných zemí je velmi malý. Stejný problém se objevil i u rakouské pobočky, která nakonec také nebyla do projektu zařazena.



Obrázek 7. Zmapované objemy vyráběných dílů a jejich přirazení pobočkám GEFCO. (Zdroj: [2])

Dalším krokem bylo zpracování získaných dat, a to za účelem zjištění nejvhodnějšího umístění tzv. „cross-docku“ – skladu, ve kterém bude probíhat konsolidace automobilových dílů a jejich následný rozvoz. Projektem se zabývala korporátní pobočka GEFCO ve Francii, která je zároveň centrálou a hlavním koordinátorem pro všechny ostatní GEFCO filiálky po celém světě, hlavně v oblasti Evropy. Projekce dopravních toků po zpracování dat ukázala, že střed těchto toků je na Moravě, a proto je nejvhodnější lokací pro umístění centrálního „hubu“ česká Jihlava. Vzhledem k tomu, že v dané oblasti není žádný sklad ve vlastnictví GEFCO a náklady na budování či pronájem nového skladu pouze pro účely PSA jsou velmi vysoké, bylo rozhodnuto, že centrální sklad bude umístěn v Jažlovicích blízko Prahy. Dopravní toky do Francie a Španělska by pak vypadaly následovně:



Obrázek 8. Dopravní toky po implementaci 1. projektu NATA. (Zdroj: [2])

Jak jsme již zmiňovali, nebyly do projektu nakonec zařazeny Rakousko a Rumunsko.

GEFCO také uvažovalo o jiné možnosti umístění centrálního skladu, respektive o umístění dvou skladů. Kandidátem pro druhý hub byla Trnava na Slovensku, ale z neznámých důvodů k implementaci této možnosti nedošlo.

Organizací jednotlivých přeprav procházejících přes český hub se následně zabývalo GEFCO v České republice. Na zpracování plánu přeprav a časových rozvrhů se především podílela jažlovická pobočka a také centrála v Praze. Současné schéma svozu výrobních a náhradních dílů do skladu v Jažlovicích lze pozorovat na obrázku níže.

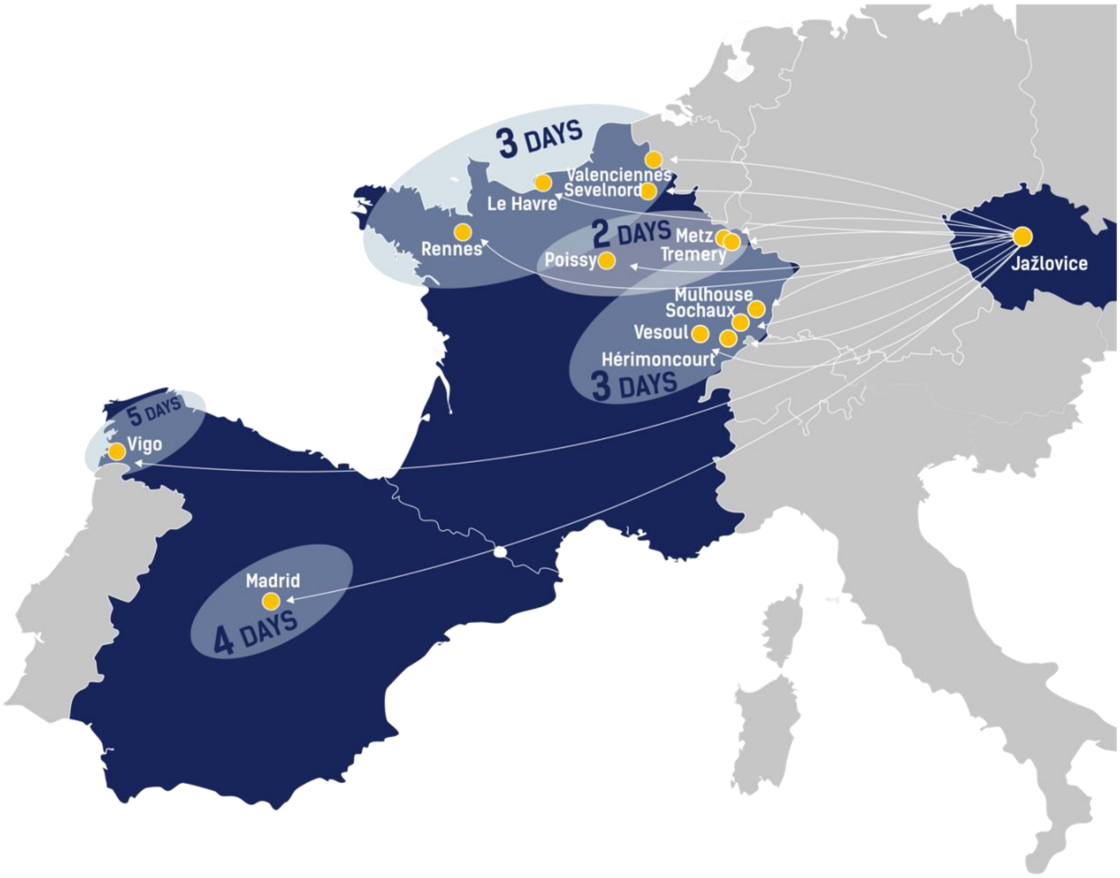
Obrázek 9. Schéma rozvozu automobilových dílu do skladu v Jažlovicích. (Zdroj: [1])

Proces pro dovoz PSA dílů je následující. Nejdříve sváží každá pobočka výrobní a náhradní díly od jednotlivých dodavatelů, které spadají pod její působnost. Většinou se tento svoz uskutečňuje dodávkami a každá pobočka má vlastní plán pro jeho realizaci. V českém GEFCO je svoz kombinován s rozvozem zboží službou „Domestic“, která se zabývá distribucí výrobků po České republice. Pro účely

„Domestic“ má GEFCO Česká republika, s.r.o. celkově pronajato 34 větších dodávek, každé vozidlo má rozměr cca 7 ložných metrů a může odvézt do 6 tun zboží.

Zboží ze skladů v Polsku, Maďarsku, Česku a na Slovensku se následně přepravuje do velkého skladu v Jažlovicích. Vozidla jsou buď standardní plachtové návěsy anebo větší tzv. „megy“, přičemž je přeprava vždy uskutečněná takovým způsobem, aby byla využita co největší kapacita vozidla: každé má celkovou kapacitu 13,6 ldm (load meters/ložných metrů) a tato hodnota odpovídá délce vozidla. Pokud výrobky vyhrazené pro účely PSA nezaberou celou kapacitu, je do vozidla téměř vždy přidáno externí zboží. Platí to ve všech případech bez ohledu na to, jaký podíl tvoří PSA zboží. To znamená, že pokud nastane situace, kdy je zapotřebí odvézt pouze 3 ldm výrobních nebo nákladních dílů, vozidlo stejně pojede a bude doloženo jiným zbožím.

V Jažlovicích pak probíhá konsolidace zboží: veškeré díly jsou přeloženy na odpovídající vozidla tak, aby mohly být rovnou expedovány do příslušných francouzských továren. Rozvoz z Jažlovic je znázorněn na obrázku 10.



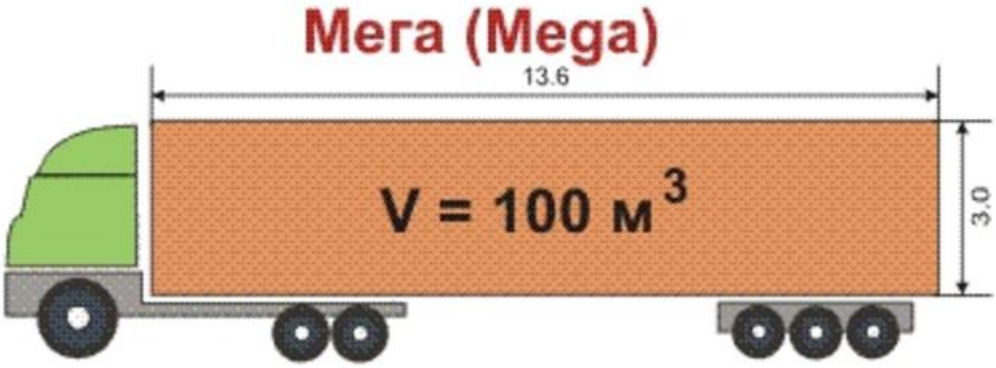
Obrázek 10. Rozvoz automobilových dílů ze skladu v Jažlovicích po implementaci 1. projektu NATA. (Zdroj: [3])

Po implementaci projektu NATA docházelo několikrát k různým změnám a zlepšením. Tak bylo kromě vyloučení z projektu rakouské a rumunské pobočky rozhodnuto o změně toků do Španělska. V dnešní době nenese za zboží směřující do Španělska odpovědnost české GEFCO – tuto přepravu má na starosti pobočka GEFCO v Německu. Toto rozhodnutí se stalo součástí projektu NATA II a umožnilo české pobočce soustředit své jak časové, tak i kapacitní možnosti na lepší provoz linek do Francie.

Francouzské továrny posílají měsíčně tzv. transportní plán, ve kterém je uvedeno, od jakého dodavatele a v jakém množství budou objednány potřebné výrobky. V současné době odjíždí ze skladu v Jažlovicích denně 9 kamionů do celkově jedenácti destinaci: Sochaux a Hérimoncourt, Mulhouse, PLIP Le Havre, Poissy, Sevelnord a Valenciennes, Tremery a Metz, Vesoul, Rennes. Podrobné schéma distribuce výrobků do Francie je znázorněno na obrázku 11.

Obrázek 11. Aktuální mapa doručování automobilových dílů ve Francii. (Zdroj: autor)

Těmto přepravám se říká „semi-direkt“: před příjezdem do Jažlovic jde o tzv. „semi“ sběr zboží od různých dodavatelů, zatímco po konsolidaci v jažlovickém skladu jde o direkt/přímé linky přímo do továren. Rozvoz z Jažlovic se uskutečňuje vozidly typu „mega“ (viz obrázek 12). Tento typ kamionů je optimální kvůli jak kapacitním, tak i časovým parametrům: do menších standardních vozidel se vejde méně zboží a větší dvoudílné soupravy zaberou více času při nakládce, vykládce a další manipulaci.

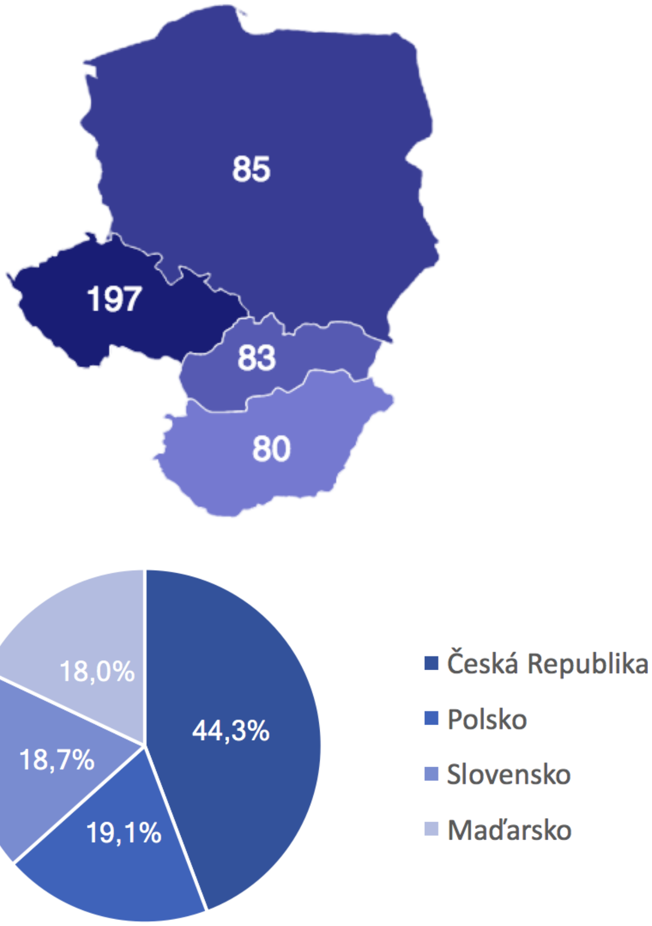


Obrázek 12. Kamion typu „mega“ používaný pro přepravu PSA zboží. (Zdroj: [10])

Jak již bylo řečeno, před tím, než vozidlo přijede do skladu v Jažlovicích, může být doloženo jiným zbožím, které nepatří PSA Group. Po konsolidaci v Jažlovicích je tato varianta striktně zakázána. Do jednotlivých PSA továren musí být přepraveno pouze to zboží, které je objednáno v transportním plánu. Každý dispečer jažlovické pobočky má na starosti několik linek do jednotlivých továren ve Francii a je zodpovědný za včasnou a kvalitní přepravu zboží. Pro převoz automobilových dílů se používají speciální palety a zboží je vždy transportováno buď v již popsaných GEFCO Boxech (viz podkapitola „Logistika a skladování“ v GEFCO Česká republika, s.r.o.) nebo v PSA vratných obalech.

Výsledkem projektu NATA je vyšší efektivita nákladů, snížení zásob ve výrobních závodech, zvýšení produktivity a zmenšení provozních nákladů téměř o 10 %.

V současné době se na výrobě automobilových dílů pro koncern PSA podílí téměř 500 dodavatelů ve východní Evropě, z toho převážná část je na území České republiky – 197 dodavatelů. Podrobnou mapu s počtem dodavatelů a jejich rozdělení v procentech vidíme na obrázku 13.



Obrázek 13. Počet dodavatelů automobilových výrobků v jednotlivých evropských zemích. (Zdroj: autor)

Cílem diplomové práce je s pomocí aparátu teorie grafů zjistit, zda optimalizace provedená společností, která spočívá v umístění pouze jednoho skladu, a to v Jažlovicích, je nejlepším možným řešením a přináší největší úspory.

V následující kapitole bude konstatováno, jaké metody teorie grafů se nejčastěji používají při řešení problémů v dopravě a která z těchto metod se nejlépe hodí v případě řešení problému distribuce automobilových dílů v GEFCO Česká republika, s.r.o.

2 TEORETICKÉ MOŽNOSTI ŘEŠENÍ LOKAČNÍCH ÚLOH

Pro optimalizaci distribučního modelu ve společnosti GEFCO je zapotřebí použít lokační analýzu, která je v současné době samostatnou vědní disciplínou operačního výzkumu. Lokační úloha však není jedinou metodou operačního výzkumu, která slouží k řešení různorodých dopravních problémů.

2.1 Nejčastěji používané metody řešení dopravních problémů

Aparát teorie grafů má velké množství metod a algoritmů pro řešení nejrůznějších úloh. Pro nás jsou nejdůležitější ty metody, které slouží k řešení dopravních problémů. Ve svém článku [5] popsala odborná asistentka Brázdová z Dopravní fakulty Jana Pernera v Pardubicích nejznámější metody z oblasti teorie grafů používané pro řešení dopravních úloh. Mezi ně patří hledání optimálních cest, síťová analýza, konstrukční úlohy na grafech, toky v dopravních sítích, lokační úlohy a okružní jízdy. Algoritmy těchto úloh jsou významnou částí operačního výzkumu a slouží k řešení rozsáhlé třídy matematických modelů. Dále stručně popíšeme každou metodu a její využití v oblasti dopravy.

2.1.1 Hledání optimálních cest na grafech

Algoritmy pro hledání optimálních cest jsou jedněmi z nejvyžadovanějších především v silniční dopravě. Optimální cestou rozumíme nejkratší, nejspolehlivější nebo cestu s maximální (případně i minimální) kapacitou. Na základě těchto tří typů hovoříme o třech zásadních úlohách pro hledání optimální cesty, přičemž pro každou úlohu modelujeme určitý graf, odpovídající reálné situaci. Hodnocení hran grafu může vyjadřovat vzdálenost mezi vrcholy nebo náklady na přepravu.

Výše zmíněné metody hledání optimálních cest se mohou navzájem kombinovat. Například je zapotřebí najít takovou cestu, u které jsou náklady na přepravu nejnižší, a zároveň je to nejbezpečnější cesta s minimální pravděpodobností výskytu krizové situace. Nejprve spočítáme všechny trasy, ve kterých je pravděpodobnost havárie nejmenší, potom z vybraných tras zvolíme jedinou s nejnižšími náklady na přepravu. Jako další příklad lze opět uvést přepravu nadrozměrného nákladu nejrychlejším způsobem. Nejdříve je nutno určit všechny trasy, vhodné pro přepravu nákladu. Pokud je těchto tras několik, pomocí algoritmu pro hledání nejkratší cesty se najde jediná optimální cesta [5].

2.1.2 Síťová analýza

Zvláštní disciplínou teorie grafů zaměřenou na analýzu projektů je takzvaná síťová analýza. Pod projektem obecně rozumíme komplex činností prováděných z důvodu dosažení určitého cíle, které na sebe jak časově, tak i věcně navazují. Metody síťové analýzy slouží k řízení soustavy činností, které mohou zahrnovat a většinou zahrnují stroje, suroviny a lidské zdroje. Modelem projektu je zvláštní typ orientovaného grafu, kterému se říká síťový graf. Do metod síťové analýzy patří řada metod. Mezi nejvýznamnější patří následující metody: CPM (Critical Path Method), PERT (Program Evaluation & Program Technique) a MPM (Methode des Potentiels Metra). Použití těchto metod je vhodné především pro výpočet kritické cesty a objektivně nutného času pro realizaci všech činností, řízení projektu a následnou kontrolu skutečného průběhu projektu v porovnání s plánem a případnou nápravy skluzu harmonogramu realizace projektu na základě opatření časového vyhodnocení síťového grafu. Nejpoužívanější metody jsou CPM, PERT a Ganttovy diagramy. Metodu CPM neboli metodu kritické cesty využijeme v případě, že hrany síťového grafu, které modelují jednotlivé činnosti projektu, jsou ohodnoceny časovou konstantou, která vyjadřuje dobu trvání operace (jedná se o deterministický model). Metoda slouží k určení kritické cesty a zjištění kritických činností (to znamená činností, jejichž prodloužení vede k prodloužení finálního termínu realizace celého projektu) a také k určení časových rezerv jednotlivých činností. Metoda PERT, úplný název (viz předchozí text) lze do češtiny volně přeložit jako „metoda oceňování programů a technika posouzení projektů“ nebo též „základní stochastická metoda pro vyhodnocení síťového grafu“, se používá pro analýzu síťových grafů, jejichž hrany jsou ohodnoceny časem, který v tomto případě, na rozdíl od metody CPM, představuje náhodnou veličinu (stochastický model). Metoda slouží k výpočtu pravděpodobnosti překročení, případně dodržení předpokládaného termínu dokončení projektu, pravděpodobnosti vzniku záporných interferenčních rezerv uzlů neležících na kritické cestě apod. [5][6].

V dopravní praxi lze síťovou analýzu využit pro optimalizaci technologických procesů v dopravních a logistických systémech, při plánování dlouhodobých a náročných projektů, jejichž jednotlivé činnosti je zapotřebí průběžně kontrolovat v souladu s předem vyvinutým plánem, aby nedošlo ke zpoždění a toto zdržení bylo včas eliminováno. V podstatě se jedná o všechny projekty v logistice a automobilovém průmyslu, a to zejména při plánování nepřetržitého toku logistického řetězce a následné distribuce vyrobeného zboží k zákazníkům.

2.1.3 Konstrukční úlohy na grafech

Mezi konstrukční úlohy patří zejména hledání minimální/maximální kostry grafu, eulerovské tahy a hamiltonovské kružnice.

Kostra grafu

Kostrou grafu rozumíme podgraf grafu, který je stromem (neobsahuje žádnou kružnici, definovanou v terminologii Teorie grafů) a zahrnuje všechny vrcholy původního grafu. V konstrukčních úlohách typu kostra grafu na sítích hovoříme o minimální nebo maximální kostře grafu. Minimální kostra grafu je taková kostra, pro kterou suma ohodnocení všech hran obsažených v kostře je minimální. Pro maximální kostru je suma ohodnocení hran maximální. Hledání minimální kostry grafu lze použit například v telekomunikacích v případě, že je zapotřebí propojit několik oblastí telefonním kabelem s nejmenšími náklady. Úloha o minimální kostře grafu může být také aplikovaná v oblasti krizového managementu dopravy. Názorným příkladem je krizová situace, kdy jsou nedostupné některé vrcholy sítě pro nesjízdnost jednotlivých úseků sítě anebo je nedostupná celá síť – například: povodeň, sněhová kalamita nebo jiné živelní pohromy velkého rozsahu. Prvním krokem před vracením celé dopravní sítě do původního provozuschopného stavu je nutnost obnovit nebo zajistit jiným způsobem alespoň základní a nejdůležitější spojení mezi všemi vrcholy grafu. Právě zde lze použít algoritmus pro vyhledávání minimální kostry grafu a následně aplikovat jeho výsledek pro určení komunikací, které by měly být zprůjezdněny přednostně při rekonstrukčních pracích [5].

Eulerovský tah

Jednou z významných úloh teorie grafů je zjistit, zda je, nebo není možné sestrojit graf jedním tahem tak, abychom každou hranou prošli pouze jednou. Problém zakreslení grafu jedním tahem vznikl v 18. století ve městě Königsberg (které je v dnešní době známo jako ruské město Kaliningrad) a vešel do historie teorie grafů jako Problém 7 mostů města Královce. Problém spočíval v sestrojení návrhu trasy slavnostního průvodu městem, zahrnující všech sedm mostů, které v roce 1736 spojovaly ostrovy a břehy města, přičemž průvod měl projít všemi mosty města právě jednou a skončit v místě začátku průvodu, tj. vrátit se zpět do výchozího místa, a přitom nepoužít již použité mosty. Pro vyřešení vzniklého problému se město obrátilo na známého německého matematika Leonharda Eulera. Na podkladě studia problému, které Euler provedl, vznikla teorie eulerovských tahů. Grafům, které lze sestrojit jedním tahem, se dnes říká eulerovské grafy a celá úloha dostala název eulerovský tah. Úlohu o eulerovském tahu lze v dopravě použít například při plánování dopravní obsluhy území [5][6].

Dalším matematikem, který se podílel na konstrukci eulerovských tahů ve 20. století, je Číňan Mei-Ku Kwan. Podle původu Mei Ku Kwana vzniklo pozdější označení problému jako Problém čínského pošťáka; označení původně vzniklo jako pracovní název modifikace Kwanovy metody pro vyhledání otevřeného eulerovského tahu. Označení navrhl Goldmann, člen výzkumného týmu Jacka Edmondse – významného kanadského matematika a informatika v oblasti kombinatorické optimalizace.

Hamiltonovská kružnice

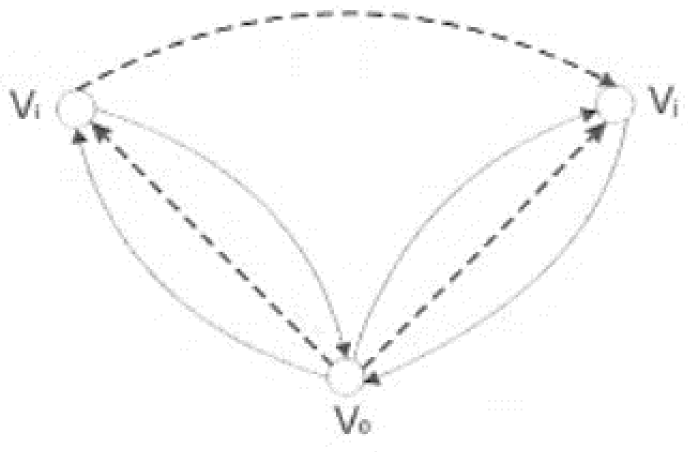
V 19. století se irský matematik, člen Irské astronomické společnosti – Sir R. W. Hamilton, zabýval studiem kružnic na dodecahedronu – pravidelném dvanáctistěnu. Hamilton se snažil vytvořit trasu zahrnující všechny vrcholy dvanáctistěnu, začínající a končící ve stejném vrcholu, přičemž každý vrchol můžeme navštívit pouze jednou. Takové trasy dostaly název hamiltonovské kružnice. Hamiltonova teorie o kružnicích na grafech se stala teoretickou základnou pro řešení světově známého problému obchodního cestujícího (anglicky TSP – Travelling Salesman Problem). TSP patří mezi nejvýznamnější problémy operačního výzkumu, na kterém se kromě Hamiltona také podílel britský matematik T. Kirkman. Úloha obchodního cestujícího byla formulována ve třicátých letech 20. století a zní následovně: máme zadáno několik míst (vrcholů) v určitém prostoru a matice vzdáleností mezi nimi (distanční matice); cílem je sestrojit nejkratší trasu, začínající a končící ve stejném vrcholu s podmínkou, že každým vrcholem můžeme projít pouze jednou. Problém obchodního cestujícího je v podstatě úloha o nalezení minimální hamiltonovské kružnice v hranově ohodnoceném souvislém grafu.

V dopravě lze problém obchodního cestujícího použit pro mnoho případů, například při distribuci produktů, plánování trasy sběrné služby, kurýrské služby atd.

2.1.4 Okružní jízdy

Úloha o okružních jízdách je v angličtině známa jako Vehicle Routing Problem (VRP) a pro její řešení se používá konstrukce podgrafů podobně jako v předchozích úlohách. Vzhledem k tomu, že okružní jízdy mají širokou aplikaci v dopravě, popíšeme tuto metodu zvlášť. Řešení problému okružních jízd lze použit v případě, že rozvážejícím vozidlem můžeme obsloužit více míst čili vozidlo má dostatečnou kapacitu pro postupnou obsluhu několika po sobě jdoucích vrcholů, je tedy schopné obsloužit více než jeden požadavek. Zjednodušeně je možné úlohu popsat následujícím způsobem: určitá firma vlastní hlavní sklad, ze kterého rozváží výrobky (buď hotové produkty anebo materiály, díly, polotovary,…) do dalších vrcholů sítě (pobočné sklady, obsluhovaná střediska, zákazníci); k dispozici je dostatečný počet nákladních vozidel se známou ložnou kapacitou; nejkratší cesty a jejich délky mezi hlavním skladem a všemi ostatními vrcholy sítě jsou též známy, stejně tak je známa vzdálenost mezi jednotlivými obsluhovanými vrcholy; každé vozidlo vyjíždí z centrálního skladu a po skončení rozvozu se vrací zpět. Distribuční plán musí být sestrojen tak, aby jednotlivé jízdy obslužných vozidel tvořily vrcholově a hranově disjunktní množiny, tj. nevznikaly navzájem se prolínající cykly. Ve výsledku musí být stanoven takový plán rozvozu, pro který hodnota celkem ujetých kilometrů všech vozidel je nejmenší čili dopravní výkon je minimální. Avšak tento podpis odpovídá nejjednoduššímu modelu okružních jízd, který v praxi většinou není možný. Překážkou jsou různé faktory: heterogenní flotila vozidel s různými kapacitami, nedostatečný počet automobilů ve vozovém parku, časová omezení, potřeba vícenásobné obsluhy skladů a mnoho dalších [5][8].

Pro řešení okružních jízd s rozvozem pouze z jednoho centrálního skladu byl vyvinut algoritmus Clarka a Wrighta. Princip Clark-Wrightovy metody je znázorněn na obrázku číslo 14.



Obrázek 14. Princip metody Clarka a Wrighta. (Zdroj: [6])

Předpokládáme, že každý pobočný sklad v_i a v_j je obsluhován jedním vozidlem, které se po rozvozu vrací zpět do centrálního skladu v_o. Pokud kapacita vozidla je dostatečná pro obsluhu dvou pobočných skladů, je vhodné spočítat, zda zavedení jednoho cyklu/okružní jízdy obsluhujícího oba vrcholy není výhodnější než dva jednotlivé cykly pro obsluhu každého vrcholu zvlášť. Základním předpokladem pro nahrazení dvou cyklů obsluhy jedním je podmínka, aby náklady na obsluhu obou vrcholů jedním vozidlem během jedné jízdy byly nižší nebo alespoň stejné:

$$d_{oi} + d_{io} + d_{oj} + d_{jo} \geq d_{oi} + d_{ij} + d_{jo}$$

Po zkrácení obou stran nerovnosti vypadá vzorec následujícím způsobem:

$$d_{io} + d_{oj} \geq d_{ij}$$

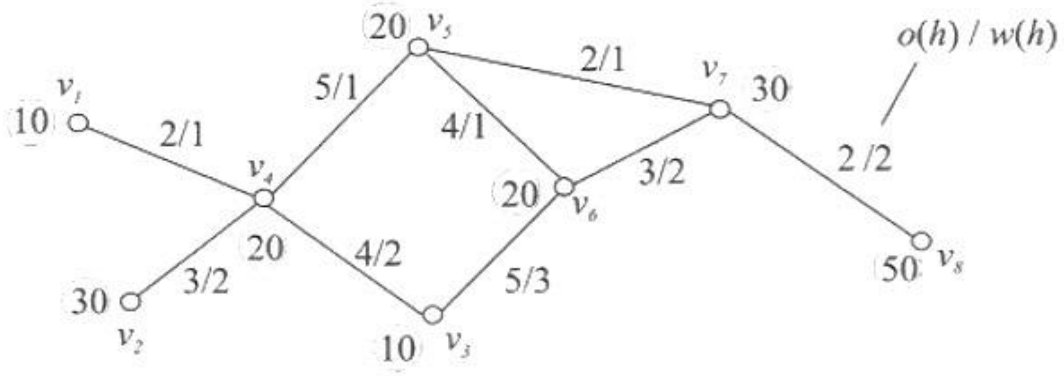
Tento vzorec vyjadřuje základní princip Clarke-Wrightonova algoritmu, který lze použít při plánování rozvozu z jednoho centrálního do několika pobočných skladů. V případě složitějších úloh, kde počet centrálních dep je větší, je možné použít například algoritmus Tillmana a Caina [6][8].

2.1.5 Toky na dopravních sítích

Pod pojmem dopravní síť rozumíme graf, který je orientovaný, neorientovaně souvislý, acyklický a hranově ohodnocený, přičemž každé hraně je přirazena nezáporná kapacita (propustnost) hrany. Pro dopravní síť je podstatné, že existuje zdroj a ústí. Zdrojem je vrchol grafu, který nemá žádné předchůdce a z něhož hrany pouze vycházejí. Ústím je naopak vrchol nemající následovníky, do něhož hrany pouze vcházejí. Kromě toho má graf i vnitřní vrcholy sítě, které mají minimálně jednoho následovníka a jednoho předchůdce. Jako příklad podobné sítě lze uvést počítačovou síť a libovolnou dopravní síť (silniční, leteckou, železniční apod.) včetně sítí potrubní dopravy/produktovodu typu ropovod, plynovod apod. V těchto sítích je každá hrana ohodnocena kapacitou, určující maximální hodnotu toku protékajícího po této hraně za zvolenou časovou jednotku. Úkolem je najít maximální tok v síti tak, aby byl na všech hranách menší nebo roven jejich kapacitě. Rozlišují se rovinné a prostorové sítě. Rovinná síť je taková, kterou lze nakreslit bez křížení hran, v níž zdroj a ústí jsou vnějšími vrcholy grafu. Pro zjištění maximálního toku na rovinné síti je možné použít algoritmus nasycování hran nebo postupného snižování kapacity hran na nejvýše položené dráze. Oba algoritmy jsou založeny na principu nejvyšší položené dráhy ze zdroje do ústí. Minimální volná kapacita této dráhy je maximálním tokem a hrana s tímto tokem se stává nasycenou. Při nasycování hran se uvádí tok aktuálně protékající hranou, v případě algoritmu snižování kapacity se udává zbývající volná kapacita. Dalším algoritmem pro zjištění maximálního toku je Ford-Fulkersonův algoritmus, který je možno použít jak v případě rovinné, tak i prostorové sítě. Dalším možným využitím Ford-Fulkersonova algoritmu je řešení jednoduchého přiřazovacího problému a problému neadresných toků mezi dodavateli a spotřebiteli [5][6].

2.1.6 Lokační úlohy

Cílem lokačních úloh je zjistit optimální rozmístění středisek obsluhy v geografickém prostoru. Geografickým prostorem se rozumí běžná komunikační síť tvořená souvislým grafem, kde vrcholy a hrany jsou ohodnoceny. Vrcholy obvykle představují jednotlivá osídlení, města nebo obce, ve kterých vznikají požadavky na obsluhu. Celkový počet požadavků v určitém vrcholu za určitou časovou jednotku je ohodnocením tohoto vrcholu a nazývá se jeho váhou. Hrany grafu vyjadřují úseky komunikace, po kterých se uskutečňuje doprava. Jejich ohodnocením je délka příslušného úseku většinou vyjádřená v kilometrech nebo metrech. Hrany mohou být též ohodnoceny váhou vyjadřující například třídu silnic pro znázornění důležitosti komunikace. Zkonstruovaná a ohodnocená síť pak může vypadat následujícím způsobem:



Obrázek 15. Příklad sítě pro lokační úlohu. (Zdroj: [6])

Lokační úlohy lze rozdělit na úlohy diskrétní a úlohy spojité. Pro určení vrcholově nebo hranově optimální lokace se používá například Iterativní algoritmus. V případě spojité lokace je možné použít například metodu založenou na principu vyhledávání vážené excentricity. Jedná se o metodu, kterou navrhl Hakimi, odtud název Hakimiho algoritmus. Lokační úlohy mají velice rozsáhlou aplikaci (nejen) v oblasti dopravy, např.: při budování sítě logistických skladů, čerpacích stanic, sítě institucí, servisních středisek, opraven apod. [6][7].

Po zkoumání všech výše uvedených metod lze říct, že operační výzkum a zejména teorie grafů je opravdu důležitým a velmi užitečným nástrojem pro řešení velkého množství dopravních problémů. Metody pro řešení těchto problémů dělíme na heuristické a exaktní. Exaktní metody na rozdíl od heuristických poskytují optimální řešení, protože prověřují každé možné řešení a na základě kritéria optimality naleznou optimální řešení z celkové množiny všech přípustných řešení. V praxi je řešení některých úloh pomocí exaktních metod velice náročné a trvá příliš dlouho a pro složitější úlohy s velkým množstvím proměnných ani není možné. Právě pro tyto úlohy je vhodné použít heuristické metody, které nezkoumají celou množinu přípustných řešení. Ve výsledku dosažené řešení nemusí být optimální, ale pouze suboptimální, avšak je ve většině případů velmi blízké k optimálnímu řešení. Pro každou úlohu je zapotřebí nejdřív zvážit její složitost a správně rozhodnout, jakou metodu je vhodné použít pro její řešení. Často je pro rozsáhlejší projekty kombinováno několik metod operačního výzkumu, díky kterým je postupně nalezen optimální výsledek [5][9].

Pro řešení problému distribuce náhradních a výrobních dílů ve společnosti GEFCO je zvolena lokační analýza, které bude věnována následující kapitola.

2.2 Lokační analýza

Pro optimalizaci distribučních tras ve společnosti GEFCO je zapotřebí rozhodnout, kde a v jakém počtu budou rozmístěny sklady pro dovoz výrobních dílů. Pro rozhodování, zda centrální sklady necháme v původním stavu nebo změníme jejich polohu či počet, použijeme lokační analýzu.

2.2.1 Popis a využití lokační analýzy

V současné době je lokační analýza samostatnou vědní disciplínou operačního výzkumu, zabývající se rozmisťováním středisek obsluhy (v našem případě skladů) na dopravních sítích. Většinou se jedná o rozmístění jednoho nebo více středisek obsluhy v geografickém prostoru, a to ve dvou případech: pokud máme předem danou síť potenciálních středisek, ze kterých musíme vybrat nejvhodnější, anebo v případě, že se ve zkoumané oblasti žádná střediska nenacházejí, a proto musíme rozhodnout o jejich umístění a následně středisko/síť středisek vybudovat. O umístění/lokaci střediska nebo středisek obsluhy rozhodujeme na základě požadavků zákazníků čili požadavků na obsluhu, a to za účelem optimalizace předem stanovených kritérií [4][7].

Lokační analýza je častým nástrojem pro řešení různých úloh, týkajících se rozmístění objektů. Pro sestavení obecného modelu těchto úloh a stanovení jeho cílů je nutné zobecnit konkrétní úlohy z praxe. Použitím tohoto postupu lze lokační analýzu aplikovat na velké množství praktických příkladů, které se trvale řeší v praxi. Volek a Linda [6] uvádějí následující příklady pro využití lokační analýzy.

Nejvhodnější rozmístění:

- firem a výrobních podniků,
- opraven a jiných servisních středisek,
- mateřských, středních, vysokých a veškerých jiných škol a vzdělávacích středisek,
- zdravotnických zařízení a nemocnic, stanic zdravotnické záchranné služby,
- policie a hasičských záchranných sborů,
- městských a jiných úřadů, administrativních center a nejrůznějších ústavů,
- nákupních a obchodních center,
- finančních zařízení, například platebních terminálů a bankomatů,
- sběrných dvorů pro různé typy odpadů,
- přestupních uzlů ve veřejné dopravě,
- čerpacích stanic a dobíjecích stanic pro elektromobily,
- veřejných logistických center,
- skládek materiálů pro například zimní údržbu dopravních komunikací,
- skladů techniky a zařízení pro krizové a jiné mimořádné situace.

V našem případě bude lokační analýza provedena pro zjištění optimálního umístění jednoho a dvou centrálních skladů logistické společnosti. V tomto případě musíme však rozhodnout, ve kterých vrcholech/vrcholu sklady/sklad umístíme. Výběr místa je společným typickým rysem pro všechny lokační úlohy. Dále se lokační úlohy mohou lišit podle různých parametrů. Zaprvé musíme říci, v kolika vrcholech bude středisko obsluhy umístěno. Řešení pro úlohu s jedním střediskem je nejjednodušší. Rozmístění většího počtu středisek obsluhy vyžaduje složitější a náročnější kombinatorickou úlohu. Zadruhé se úlohy liší podle toho, kde vznikají požadavky na obsluhu. Požadavky mohou vznikat jak ve vrcholech sítě (například v obcích nebo městech), tak i na jejích hranách, tj. na dopravní komunikaci. Existují také případy, pro které vznikají požadavky mimo definovanou síť – například povodně a lesní požáry, úrazy při horolezectví a jiné aktivity mimo město a komunikační síť. Zatřetí musíme rozhodnout, zda budou střediska rozmístěna ve vrcholech grafu, nebo na jeho hranách. Pokud mluvíme o rozmístění středisek ve vrcholech, znamená to, že střediska pro uspokojení vznikajících požadavků budou umístěna v místech, která tyto vrcholy představují – například ve městech, obcích atd. O umístění středisek na hranách většinou hovoříme v případě budování nových čerpacích stanic pohonných hmot (benzín, nafta, LPG) na dopravních komunikacích. V některých případech se jedná o umístění středisek mimo síť – střediska nebudou rozmístěna ani ve vrcholech, ani na hranách, ale na tzv.

„zelené louce“. Dalším důležitým rozdílem je kritérium kvality řešení. Pro většinu úloh platí, že chceme minimalizovat celkový dopravní výkon (obvykle v kilometrech). Výjimkou jsou však úlohy, pro které je podmínkou, aby byl čas dosažení každého místa, kde vznikají požadavky, minimální. Jedná se o úlohy typu minimax. Příkladem takových úloh je problém rozmístění středisek policie, výjezdových skupin hasičského záchranného sboru a stanic zdravotnické záchranné služby. Úlohy se také mohou lišit způsobem obsluhy úseků. První možnost je taková, že pro obsluhu na úseku bude náhodně vybrán bod, který bude obsloužen a obsluhující vozidlo se vrátí zpět do výchozího vrcholu po stejné cestě (pro náhodný výběr vrcholu, který bude obsloužen, se použije určité pravděpodobnostní rozdělení). Druhý způsob obsluhy vypadá následně: obsluhující vozidlo začíná obsluhu v jednom vrcholu úseku, tento úsek celý projede a vystoupí v jiném vrcholu. Kromě zmíněných odlišností mohou v praxi nastat i další případy, které mohou úlohu odlišovat od typických příkladů. Výše zmíněné parametry mohou dohromady vytvářet velké množství unikátních úloh, kde je pro každou nutno vybrat příslušnou metodu řešení a správně formulovat matematický model [6][9].

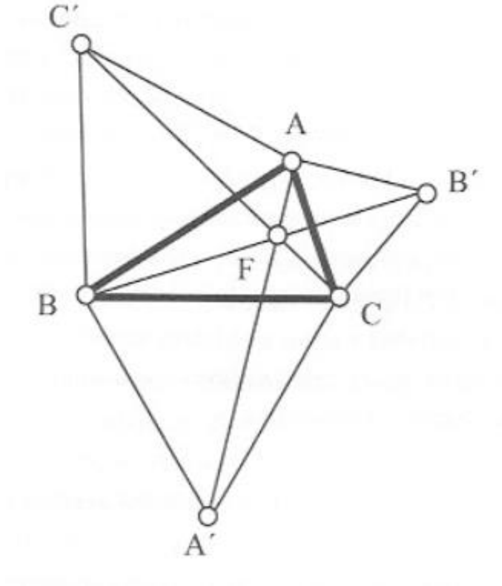
Pro uspokojení požadavků, které se provádějí ve vybraných střediscích obsluhy, je zapotřebí vykonat určitou dopravní práci. Tato dopravní práce může být buď v režii střediska obsluhy (firma rozváží objednávky, dopravní společnost výrobky, opravář vyjíždí na místo poruchy atd.) nebo v režii dotyčného (dojezd do nákupního centra, pěší cesta do nejbližší zastávky MHD, školy, nemocnice aj.).

Ve většině případů se lokační úlohy používají pro řešení problémů rozmístění středisek obsluhy do nějakých předem definovaných bodů (vrcholů), menší část je zaměřena na řešení problému umístění středisek na dopravních komunikacích (hranách). Vzácnou výjimkou je rozmístění středisek na „zeleně louce“. Budování nových středisek lze rozdělit do dvou skupin: budování sítě od začátku (nová firma přichází na trh a chce rozmístit své pobočky nejvhodnějším způsobem) a rozšíření již existující sítě středisek (kvůli většímu počtu vznikajících požadavků na obsluhu). Lokační analýzu lze také použít pro případ snížení existujícího počtu středisek [6].

2.2.2 Historie lokační analýzy

Lokační analýza jako samostatná vědní disciplína vznikla v 60. letech 20. století. Historie lokační analýzy počíná úlohou o nalezení prostorového mediánu (spatial median) – minisum bodu Euklidovské metriky (the minisum Euclidean distance point). Řešením problému se zabývalo hodně specialistů z různých oblastí. V dnešní době je těžké říct, kdo ve skutečnosti zformuloval a vyřešil úlohu jako první.

Nejznámějším autorem, který přispěl ke vzniku disciplíny, byl francouzský matematik Pierre de Fermat (1601–1655). Fermat objevil centrální bod trojúhelníku, kterému se dnes říká Fermatův bod (viz obrázek 16). Úloha byla formulována následujícím způsobem: je zapotřebí určit takový vnitřní bod trojúhelníka ABC, který minimalizuje součet délek úseček FA + FB + FC [6].



Obrázek 16. Fermatův bod. (Zdroj: [6])

Na grafickém řešení úlohy se pak podílel Galileo Evengelista Torricelli. Řešení bylo publikováno v roce 1659 Torricelliho žákem Vincenzem Vivianim. Fermatův bod je někdy označován jako Fermatův-Torricelliho bod, nebo první isogonický (z řečtiny je iso=stejný a gon=úhel) střed trojúhelníka. Existuje názor, že úloha byla poprvé navržena a vyřešena italským matematikem Battistou Cavalierim (1598-1647) a až poté Fermatem a Torricellim. Někdy se ale připisuje jak návrh, tak i řešení problému jenom Torricellimu [11].

V 18. století se problémem zabýval britský vědec Thomas Simpson (1710-1761). Ve své doktríně „Doctrine and Applications of Fluxions" v Londýně v roce 1750 navrhoval další grafické řešení pro nalezení bodu neváženého mediánu. Také navrhoval zevšeobecnění úlohy přidáním vah [11].

Dalším autorem, který rozvíjel lokační analýzu v 18. - 19. století, je Jakob Steiner. Zabýval se geometrií trojúhelníků a objevil tzv. Steinerův bod. Steinerova úloha rozšiřuje Fermatovy úlohy na větší počet bodů a umožňuje nalézt vnitřní bod čtyř a více úhelníků [6].

V roce 1869 poprvé popsal matematik Camille Jordan lokační problém na síti typu „strom“. Od té doby se rozšiřoval zájem o řešení problému umístění středisek obsluhy v geografickém prostoru.

První publikace lokačního modelu patří Alfredu Weberovi. Model zveřejnil ve své knize v roce 1909 [12]. Weber tušil, že lokační úloha může být velmi užitečná v dopravní praxi. Ve své práci použil váženou tříbodovou verzi problému (n = 3), pomocí které znázornil průmyslové umístění snižující dopravní náklady. Dva body představovaly zdroje materiálů s odlišnými vahami a třetí bod byl považován za lokaci trhu neboli „místo spotřeby“.

Poprvé vyřešil stejný problém pro n>3 a různé váhy maďarský matematik Endre Vaszonyi Weiszfeld v roce 1936 [13]. Weiszfeld publikoval ve francouzštině v japonském matematickém časopise a je nyní znám jako Andrew Vaszonyi. Metoda Weiszfelda pro řešení problému je iterativní procedurou, kde výsledky každé nové iterace nahrazovaly předchozí výsledek pro zlepšení řešení. Vzhledem k náročnosti procesu zůstávala metoda Weiszfelda během dalších více než 20 let neznámá a nepoužívatelná. S vývojem počítačů měla ve 20. století lokační analýza dynamický vývoj a metoda maďarského matematika byla znovu objevena. První, kdo znovu objevil metodu Weiszfelda, byl Miehle [14], který řešil komplexnější variantu Steinerovy úlohy. Nejkomplexnější studii však provedli Kuhn a Kuenne [15], kteří určili nezbytné a dostačující podmínky pro hledání optima. Nejnovější dokument na dané téma patří autorům Juelovi a Loveovi [16]. Iterativní proceduru Weiszfelda též použil Cooper pro svůj algoritmus k řešení úloh typu lokace-alokace [17]. Dále byla metoda několikrát zlepšena a modifikována různými autory, jako například Ostresh, Katz, Morris nebo Brimberg [11]. Zrychlená verze algoritmu byla navržena profesorem Dreznerem [18].

Nedůležitější posun nastal v 60. letech 20. století, kdy se lokační analýza stala samostatnou vědní disciplínou. Valnou měrou přispěl k použití lokační analýzy v praxi americký profesor Charles ReVelle. V roce 1977 řešil problém umístění nemocnic pro léčbu onkologických onemocnění a mozkových příhod na výzvu prezidenta USA L. B. Johnsona. Od té doby začalo mnoho autorů z různých oblastí používat lokační analýzu pro optimální umístění středisek obsluhy a lokaci jiných zařízení.

V tabulce níže jsou nejznámější případy použití lokační analýzy v praxi.

Tabulka 1. Aplikace lokační analýzy v praxi. (Zdroj: [11])

ROK	AUTOR	APLIKACE
1963	Kuehn a Hamburger	Sklady
1965	Hakimi	Střediska telekomunikace
1971	Marks a Liebman	Svoz pevných odpadů
1972	Holmes	Denní stacionáře
1972	Abernathy a Hershey	Regionální zdravotní zařízení
1975	Gleason	Autobusové zastávky
1977	ReVelle	Nouzová zdravotní střediska
1977	Hilger	Terminály pro zrno
1979	Patel	Střediska sociálních služeb
1980	Cohon	Elektrárny
1980	Schilling	Požární stanice
1980	Goodchild a Booth	Veřejné bazény
1981	Maze	Autobusové garáže
1982	Saatcioglu	Letiště
1982	Bennett	Venkovní zdravotní pracovníci
1983	Osleeb a Ratick	Zařízení pro manipulaci s uhlím
1984	Belardo	Nouzová zařízení pro ropné skvrny
1985	Birge a Malyshko	Návrh systému solárních pohonů
1985	Love	Terminály kamiónů
1986	Price a Turcotte	Krevní banky
1986	Ghosh a Craig	Střediska opravy počítačů
1987	O'Kelly	Střediska aerolinek
1987	Gelders	Sklady pivovaru
1987	Pirkul	Střediska počítačů
1987	Min	Fast-food restaurace
1987	Hodgson	Místa sklízení lesů
1987	Pirkul	Franšízy outletu
1987	Tewari a Sidheswar	Školy
1988	Flynn a Ratick	Nezbytná letecká doprava
1988	Drezner	Oběžné dráhy satelitů
1989	Helme a Magnanti	Stanice řízení satelitů
1990	Hogan	Srážkoměry
1991	ReVelle	Likvidace nebezpečných odpadů
1995	Swersey a Thakur	Stanice kontroly emisí
1996	Hodgson	Stanice kontroly vozidel
1997	Higgins	Koleje železničních tratí

2.2.3 Základní pojmy

Pro definici základních pojmů nezbytných pro pochopení tématu lokační analýzy se obrátíme k odborné literatuře [6] a popíšeme podstatné termíny.

Definice terminů

Komunikační síť představujeme v lokační analýze jako souvislý, vrcholově a hranově ohodnocený obyčejný graf $G = (V, X)$, kde V jsou vrcholy a X hrany grafu. Ohodnocením vrcholů je jejich váha $w\,(v)$, která vyjadřuje počet požadavků na obsluhu, vznikajících v daném vrcholu za určitou časovou jednotku. Ohodnocení hran je označováno $o\,(h)$ a udává délky úseků ve většině případů vyjádřené v kilometrech nebo jiných délkových jednotkách. Hrany mohou být také ohodnoceny a jejich váha $w\,(h)$ bude určovat například důležitost příslušného komunikačního úseku.

Jak jsme již zmiňovali v předchozích odstavcích, musí se pro uspokojení požadavků vykonat *dopravní práce*. Pod pojmem *dopravní práce* rozumíme přemístění z/do střediska obsluhy, které je měřeno vhodnou metrikou, například ujetou vzdáleností, spotřebou pohonných hmot, celkovým časem atd.

Uspokojení nebo také odbavení požadavků se realizuje ve střediscích obsluhy, pro která se v odborné literatuře vžilo označení *depa.* Množina dep je označováno D_k, kde k je jejich počet $k = |D_k|$, přičemž pro k platí: $1 \leq k \leq p$, kde p je celkový počet všech vrcholů sítě $p = |V|$.

Dalším důležitým pojmem je *atrakční obvod. Atrakčním obvodem* depa se v širším smyslu slova rozumí množina vrcholů a hran sítě, které jsou obsluhovány z tohoto depa. V užším smyslu slova rozumíme *atrakčním obvodem* označeným $A(v)$ depa $v \in D_k$ množinu vrcholů $u \in V$ a hran $h \in X$, pro které platí dvě pravidla:

- $u \in A(v)$, pokud neexistuje žádné depo $w \in D_k$, pro které $d\,(w, u) < d\,(v, u)$,
- $h \in A(v)$, pokud neexistuje žádné depo $w \in D_k$, pro které $d\,(w, h) < d\,(v, h)$.

Tato pravidla znamenají, že danému atrakčnímu obvodu přiradíme vrchol nebo hranu pouze v případě, pokud v množině všech dep neexistuje takové depo, pro které platí, že vzdálenost mezi daným depem a vrcholem/hranou je menší, než vzdálenost mezi vybraným depem a vrcholem/hranou.

Vzdálenost vrcholu $u \in A(v)$ *od depa* $v \in D_k$ je definována jako délka minimální cesty vyjádřená následujícím vzorcem $d\,(u, v) = \min_{m\,(u,v) \in M} \left\{\sum_{h \in m\,(u,v)} o(h)\right\}$, kde M je množina všech možných cest mezi u a v.

Atrakční obvod může být prvotní a přidělený. Dále definujeme prvotní atrakční obvod a přidělený atrakční obvod střediska obsluhy v užším smyslu slova.

Pod pojmem *prvotní atrakční obvod* označený $A'(v)$ depa $v \in D_k$ se rozumí množina vrcholů $u \in V$ a hran $h \in X$ sítě, pro které platí následující pravidla:

- $u \in A'(v)$, pokud neexistuje žádné depo $w \in D_k$, pro které $d\ (w,u)\ \leq d\ (v,u)$,
- $h \in A'(v)$, pokud neexistuje žádné depo $w \in D_k$, pro které $d\ (w,h)\ \leq d\ (v,h)$.

Pod pojmem *přidělený atrakční obvod* označený $A^*(v)$ depa $v \in D_k$ se rozumí množina vrcholů $u \in V$ a hran $h \in X$ sítě, které splňují následující vztahy:

$$A'(v) \subseteq\ A^*(v) \subseteq\ A(v) \text{ pro každé depo } v \in D_k,$$

$$\bigcup_{v \in D_k} A^*(v) = X \cup V,$$

$$A^*(v) \cap A^*(v) = 0 \text{ pro } \emptyset;\ u\ \neq v,\ v \in D_k.$$

Umístění střediska obsluhy – depa – může být optimální buď vrcholově, nebo hranově. Pokud se jedná o rozmístění dep na hranách sítě, pro lokační úlohu platí Hakimiho věta. Pro zjištění nejvhodnější lokace pro sklad GEFCO se ale zaměříme na obsluhu vrcholů sítě.

Kritérium pro optimalizaci vrcholově optimálního umístění depa/dep na síti

Vrcholově optimální umístění k dep ($k =\ |D_k|$) na síti je taková množina k dep D_k, pro kterou platí, že:

$$f(D_k) =\ \min_{D'_k}\{f(D'_k)\},$$

$$\text{kde } f(D'_k) =\ \sum_{v \in D'_k} \sum_{u \in A^*(v)} 2 \cdot d\ (u,v) \cdot w\ (u).$$

Funkce $f(D_k)$ udává minimální hodnotu kriteriální funkce. $f(D'_k)$ vyjadřuje hodnotu kriteriální funkce pro jednotlivé *k*-prvkové podmnožiny, kde D'_k jsou všechny *k*-prvkové podmnožiny V.

Dále popíšeme princip iterativního algoritmu, na jehož základě budou v následující kapitole provedeny výpočty pro zjištění optimálního umístění depa.

Depa nemusí být umístěna pouze ve vrcholech sítě, ale mohou být umístěna i na jejích hranách.

Kritérium pro optimalizaci hranově optimálního umístění depa/dep na síti

Hranově optimální umístění k dep ($k = |D_k|$) na síti je taková množina k dep D_k pro kterou platí, že:

$$g(D_k) = \min_{D'_k}\{g(D'_k)\},$$

$$\text{kde } g(D'_k) = \sum_{v \in D'_k} \sum_{h \in A^*(v)} (2 \cdot (d\,(v,h) + o(h)) \cdot w\,(h).$$

D'_k jsou všechny *k*-prvkové podmnožiny V.

Pro lokační úlohy platí Hakimiho věta: nechť pro libovolnou k-prvkovou množinu bodů (ne vrcholů) sítě - Y_k jsou funkce $f(Y_k)$ a $g(Y_k)$ formálně definovány stejně jako $f(D_k)$ a $g(D_k)$. Potom existuje alespoň jedna množina k vrcholů D_k (D'_k) sítě $G = (V, X)$, pro kterou platí, že $f(D_k) \leq \mathrm{f}(Y_k)$, resp. $g(D_k) \leq g(Y_k)$.

Dále popíšeme princip iterativního algoritmu, na jehož základě budou v následující kapitole provedeny výpočty pro zjištění optimálního umístění depa.

2.2.4 Iterativní algoritmus pro určení optimální lokace

Iterativní algoritmus je jednoduchou heuristickou metodou pro zjištění (sub)optimálního, umístění depa/množiny dep, jedná se o takzvanou „záměnnou heuristiku“. Algoritmus postupně zkoumá vrcholy a na základě minimální hodnoty kriteriální funkce rozhoduje o nejlepším umístění jednoho nebo více středisek obsluhy (v našem případě sklad nebo též „hub“). Jednotlivé dílčí kroky algoritmu popisují Volek a Linda [6] pseudokódem následovně.

1. krok:

- zvolíme výchozí množinu dep $\mathrm{D_k} \subset \mathrm{V}$, $\mathrm{k} = |\mathrm{D_k}|$,
- určíme množinu neprozkoumaných vrcholů $\mathrm{N} = \mathrm{V} \backslash \mathrm{D_k}$ (rozdíl množin V a $\mathrm{D_k}$),
- položíme registrační proměnnou $\mathrm{z} = 0$,
- určíme $\mathrm{f}(\mathrm{D_k})$, respektive $\mathrm{g}(\mathrm{D_k})$.

2. krok:

Zjistíme, zda množina neprozkoumaných vrcholů je prázdná.

2a) je-li $\mathrm{N} = 0$, pokračujeme krokem 4,

2b) je-li $\mathrm{N} \neq 0$,

- vybereme libovolný $v \in N$ a vytvoříme množiny $D_k^{v_j} = D_k - \{v_j\} + \{v\}$, pro $\forall v_j \in D_k$,
- vypočteme $f(D_k^{v_j})$, respektive $g(D_k^{v_j})$, $v_j \in D_k$,
- určíme $f(D_k^{v_r}) = \min_{v_j \in D_k} \{f(D_k^{v_j})\}$, respektive $g(D_k^{v_r}) = \min_{v_j \in D_k} \{g(D_k^{v_j})\}$.

3. krok:

Porovnáme hodnotu kritéria.

3a) pokud $f(D_k^{v_r}) \geq f(D_k)$, respektive $g(D_k^{v_r}) \geq g(D_k)$, položíme $N = N - \{v\}$ a pokračujeme krokem 2,

3b) pokud $f(D_k^{v_r}) < f(D_k)$, respektive $g(D_k^{v_r}) < g(D_k)$, vytvoříme novou množinu dep
$D_k = D_k - \{v_r\} + \{v\}$, položíme $z = z + 1$ a $f(D_k) = f(D_k^{v_r})$, respektive $g(D_k) = g(D_k^{v_r})$ a pokračujeme krokem 2.

4. krok

4a) je-li $z = 0$, pokračujeme krokem 5,

4b) je-li $z > 0$, položíme znovu $z = 0$, určíme novou množinu $N = V \backslash D_k$, pokračujeme krokem 2.

5. krok

Množina představuje vrcholově (případně hranově) (sub)optimální rozmístění dep na síti, respektive je minimální hodnotou kriteriální funkce, která může být dosažena tímto algoritmem při zadané počáteční množině dep.

3 OPTIMALIZACE EXISTUJÍCÍHO DISTRIBUČNÍHO MODELU

V této kapitole zjistíme s pomocí iterativního algoritmu, zda je umístění centrálního skladu pro konsolidaci automobilových dílů v Jažlovicích nejlepším řešením z pohledů lokační analýzy. Dále prověříme možnost rozmístění dvou skladů a spočítáme hodnotu kriteriální funkce i pro tento případ. Výsledky obou výzkumů budou porovnány a vyhodnoceny v následující kapitole.

3.1 Zpracování vstupních dat

Pro vyhledávání minimální hodnoty kriteriální funkce $f(D_k) = \min_{D'_k}\{f(D'_k)\}$ musíme nejdříve spočítat hodnotu $f(D'_k)$ pro všechny případy. Ze vzorce účelové funkce pro zjištění této hodnoty $f(D'_k) = \sum_{v \in D'_k} \sum_{u \in A^*(v)} 2 \cdot d\,(u,v) \cdot w\,(u)$ je zřejmé, že jako vstupní údaje pro řešení lokační úlohy je nutno nejdřív vypočítat distanční matici a určit váhu jednotlivých vrcholů.

Pro účely této práce byl použit upravený tvar účelové funkci $f(D'_k) = \sum_{v \in D'_k} \sum_{u \in A^*(v)} d\,(u,v) \cdot w\,(u)$. Důvodem je to, že v standardní lokační úloze uvažujeme o tom, že se po uspokojení požadavků obslužné vozidlo vrací zpět do výchozího vrcholu (depa), právě proto je v původním vzorci dvojnásobek vzdálenosti obsluhovaného vrcholu od střediska obsluhy (depa). V této práci se kamion nevrací: ve většině případů odjíždí dopravní společnost, která uskutečňuje přepravu, na místo další nakládky.

Z obrázku číslo 9 plyne, že na území východní Evropy existuje celkem 13 poboček GEFCO (Poznaň, Lodž, Grodzisk, Vratislav, Rzeszów a Czeladź v Polsku, Jažlovice a Brno v České republice, Žilina, Košice, Zvolen a Trnava na Slovensku, a nakonec Budapešť v Maďarsku), které se podílejí na přepravě PSA výrobků a disponují vlastním skladem pro manipulace s přepravovaným zbožím. Tyto pobočky představují vrcholy grafu. Hrany grafu jsou ohodnoceny vzdáleností mezi vrcholy. Tyto hodnoty vyjadřují délku minimální cesty $d\,(u,v)$ mezi příslušnými vrcholy. Pro zjištění těchto vzdáleností byl použit interní program GEFCO „Map and Guide“, který umožňuje sestrojit nejvhodnější a nejkratší trasu s ohledem na rozměry vozidla – v našem případě tzv. „megy“, které mají výšku 3 m (viz obrázek 11) a jejich průjezd není povolený po některých komunikacích.

Výsledkem je čtvercová symetrická matice vzdáleností $d\ (u, v)$ velikosti 13x13, kterou můžeme vidět v tabulce níže.

Tabulka 2. Matice vzdáleností *d (u, v)* vyjádřených v km. (Zdroj: autor)

d (u, v)	Poznan	Lodz	Grodzisk	Vratislav	Rzeszow	Czeladz	Jažlovice	Brno	Žilina	Košice	Zvolen	Trnava	Budapešť
Poznan	0	218	286	174	643	401	458	581	491	728	596	649	900
Lodz	218	0	114	222	432	191	559	460	362	518	468	528	779
Grodzisk	286	114	0	329	289	253	666	522	424	579	529	589	841
Vratislav	174	222	329	0	437	206	338	402	312	522	417	470	721
Rzeszow	643	432	289	437	0	251	683	498	325	200	388	475	460
Czeladz	401	191	253	206	251	0	456	271	175	342	280	339	590
Jažlovice	458	559	666	338	683	456	0	188	395	646	507	368	508
Brno	581	460	522	402	498	271	188	0	211	462	327	188	328
Žilina	491	362	424	312	325	175	395	211	0	252	108	156	332
Košice	728	518	579	522	200	342	646	462	252	0	212	361	261
Zvolen	596	468	529	417	388	280	507	327	108	212	0	151	158
Trnava	649	528	589	470	475	339	368	188	156	361	151	0	187
Budapešť	900	779	841	721	460	590	508	328	332	261	158	187	0

Dalším krokem je zjištění vah pro jednotlivé pobočky. Jak jsme již psali v předchozích kapitolách, každé pobočce je přirazena určitá množina dodavatelů, pro které zajišťuje sběr výrobních a náhradních dílů. Podle definice váhy vrcholu (viz kapitola 2.2.3), je to počet požadavků, generovaných za určitou časovou jednotku v určitém vrcholu. Vzhledem k tomu, že koncern PSA posílá transportní plán měsíčně, je nejlepší časový interval pro přesnější odhad jednotlivých vah jeden měsíc. Transportní plán je vždy zpracováván v Excelu. Výstupem zpracovaného transportního plánu je rozpis pro každou linku (linkou rozumíme „direkt" přepravu z jažlovického skladu do jednotlivých PSA továren ve Francii) předem objednaného potřebného množství výrobních a náhradních dílů od určitých dodavatelů. Následně organizují příslušné pobočky GEFCO sběr automobilových dílů od těchto dodavatelů. Z interního programu GEFCO, který je využíván zejména dispečery pro kontrolu toku zboží, lze zjistit, ze kterých měst jsou sváženy dodavatelské výrobky. Pro každou z těchto přeprav je uveden název výrobní firmy, lokace dodavatele, datum uskutečnění přepravy a brutto hmotnost přepravovaných výrobků. Vzhledem k tomu, že hmotnost zboží je jediným dostupným a spolehlivým údajem, přiřadíme jednotlivým pobočkám váhu, vyjádřenou v kg zboží, jehož přepravu každá příslušná pobočka zajišťuje během jednoho měsíce. Jak již bylo řečeno dříve, má transportní plán formu seznamu objednávek zboží, které musí být dopraveno do jednotlivých francouzských továren během měsíce. Tyto objednávky jsou nejprve zabezpečovány příslušnými pobočkami GEFCO pomocí sběrné služby (která funguje formou okružních jízd). Pro příslušnou pobočku je možno spočítat celkový počet objednávek během jednoho měsíce, nelze však tyto kumulativní hodnoty považovat za váhu vrcholů, protože tyto objednávky nejsou organizovány jako jednotlivé jízdy, ale vyřizují se v rámci okružních jízd sběrné služby.

Výslednou tabulku s celkovým počtem měsíčně vyřízených objednávek a hodnotami vah můžeme vidět v tabulce 3.

Tabulka 3. Váhy *w (v)* jednotlivých poboček GEFCO. (Zdroj: autor)

GEFCO SKLAD	POČET VYŘÍZENÝCH OBJEDNÁVEK MĚSÍČNĚ	CELKOVÁ VÁHA V KG
Brno	136	37 713,46
Budapešť	150	86 040,82
Czeladz	111	42 050,41
Grodzisk	14	5 957,60
Jažlovice	876	453 745,78
Košice	40	43 084,22
Lodž	14	6 507,00
Poznaň	43	22 889,40
Rzeszow	5	43 207,20
Trnava	268	139 072,52
Vratislav	78	14 486,10
Žilina	62	12 440,40
Zvolen	21	5 287,00

Vzhledem k tomu, že přeprava zboží nekončí v depech, jak to platí pro většinu lokačních úloh, ale pokračuje do dalších destinací ve Francii, musíme pro přesnější výsledek počítat s dopravní prací vykonanou vozidly pro přepravu zboží do těchto destinací. Tabulka číslo 4 ukazuje vzdálenosti mezi jednotlivými pobočkami a německým městem Heilbronn. Toto město bylo zvoleno jako fiktivní francouzská hranice, protože je nejbližším bodem cestou do Francie, ve kterém mají všechna vozidla všech linek stále společnou trasu. Potom se jejich trasy větví dle lokací odpovídajících francouzských továren.

Tabulka 4. Vzdálenosti mezi francouzskou hranici a jednotlivými pobočkami GEFCO. (Zdroj: autor)

d (u, v)	Poznaň	Lodž	Grodzisk	Vratislav	Rzeszow	Czeladz	Jažlovice	Brno	Žilina	Košice	Zvolen	Trnava	Budapešť
Francie	829	948	1055	727	1147	920	463	647	851	1103	925	785	898

Následující výpočty budou prováděny na základě získaných dat.

3.2 Lokační úloha pro případ jednoho skladu

Řešení lokační úlohy pro případ jednoho skladu vychází z iterativního algoritmu, pro který platí – počet dep $k = 1$. To je nejjednodušším případem lokační úlohy, pro kterou není potřebné zjišťovat atrakční obvod vzhledem k tomu, že všechny vrcholy budou ve výsledku patřit pouze jednomu kandidátu, který má nejmenší hodnotu kriteriální funkce. Dopravní práci pro tento případ můžeme vyjádřit zjednodušeným tvarem kriteriální funkce $f(D'_1) = \sum_{u \in A(v)} d\ (u, v) \cdot w\ (u)$, kde $A\ (v)$je jediným atrakčním obvodem zahrnujícím všechny vrcholy grafu. Výsledné optimální řešení opět vyjadřuje funkce $f(D_k) = \min_{D'_k}\{f(D'_k)\}$.

Pro náš případ je nutné propočítat 13 variant řešení, a to s tím, že uvažujeme, že každý vrchol bude zařazen do množiny kandidátů a je potencionálním místem pro umístění střediska skladů GEFCO, a z vypočtených variant vybrat nejlepší řešení. Nejlepším řešením je takové řešení, pro které je hodnota $f(D'_k)$ nejmenší. Výpočty jsou prováděny v Excelu a vstupní matice pro tuto úlohu je na obrázku 17. Vzdálenosti jsou uvedeny v [km], váhy v [kg] hmotnosti zboží.

d (u, v)	Poznan	Lodž	Grodzisk	Vratislav	Rzeszow	Czeladz	Jažlovice	Brno	Žilina	Košice	Zvolen	Trnava	Budapešť	Francie
Poznan	0	218	286	174	643	401	458	581	491	728	596	649	900	828,93
Lodž	218	0	114	222	432	191	559	460	362	518	468	528	779	947,83
Grodzisk	286	114	0	329	289	253	666	522	424	579	529	589	841	1054,81
Vratislav	174	222	329	0	437	206	338	402	312	522	417	470	721	727,37
Rzeszow	643	432	289	437	0	251	683	498	325	200	388	475	460	1146,57
Czeladz	401	191	253	206	251	0	456	271	175	342	280	339	590	919,9
Jažlovice	458	559	666	338	683	456	0	188	395	646	507	368	508	462,84
Brno	581	460	522	402	498	271	188	0	211	462	327	188	328	647,02
Žilina	491	362	424	312	325	175	395	211	0	252	108	156	332	850,56
Košice	728	518	579	522	200	342	646	462	252	0	212	361	261	1102,51
Zvolen	596	468	529	417	388	280	507	327	108	212	0	151	158	924,78
Trnava	649	528	589	470	475	339	368	188	156	361	151	0	187	784,76
Budapešť	900	779	841	721	460	590	508	328	332	261	158	187	0	897,52
Váhy	22889	6507	5958	14486	43207	42050	453746	37713	12440	43084	5287	139073	86041	**912482**

Obrázek 17. Vstupní data pro lokační úlohu. Snímek z Excelu. (Zdroj: autor)

Pro každou pobočku byla spočítána celková dopravní práce v případě, že tento vrchol bude zvolen jako depo bez následujícího rozvozu výrobků do Francie. Pro zjištění hodnoty účelové funkce byla použita funkce SUMPRODUCT, která násobí vzdálenosti mezi jednotlivými pobočkami a zvoleným kandidátem váhou příslušné pobočky a pak z toho vytváří součet. Pobočka s minimální hodnotou dopravní práce je pak optimálním kandidátem pro umístění centrálního skladu. V dalším kroku jsme ke každé vypočítané hodnotě dopravní práce přidali hodnotu dopravní práce v případě následující distribuce výrobků do Francie. Obě výsledné tabulky jsou seřazeny vzestupně od nejmenší hodnoty k největší, tj. od nejlepšího řešení k nejhoršímu.

Porovnání výsledků je vidět na obrázku 18. Hodnota kriteriální funkce nebo dopravní práce $f(D'_k)$ je vyjádřena jako přepravní výkon a jeho jednotkou jsou tunokilometry.

Depo	f(D'k) [tkm]
Jažlovice	209 116
Brno	222 250
Trnava	272 020
Žilina	291 011
Zvolen	341 847
Czeladz	359 316
Vratislav	359 437
Budapešť	370 672
Košice	441 404
Lodž	476 085
Rzeszow	485 200
Poznan	488 405
Grodzisk	544 180

Depo	f(D'k) + f(D'k) do Francie [tkm]
Jažlovice	631 449
Brno	812 645
Trnava	988 100
Vratislav	1 023 149
Žilina	1 067 131
Zvolen	1 185 692
Budapešť	1 189 643
Czeladz	1 198 708
Poznan	1 244 788
Lodž	1 340 962
Košice	1 447 425
Grodzisk	1 506 675
Rzeszow	1 531 424

Obrázek 18. Porovnání výsledků v případě rozmístění jednoho skladu. Snímek z Excelu. (Zdroj: autor)

Z výsledků lokační úlohy pro $k = 1$ lze konstatovat, že umístění skladu v českých Jažlovicích je nejlepším možným řešením bez ohledu na to, zda výrobky jsou pak dováženy do Francie nebo ne. Výsledek úlohy je znázorněn na obrázku níže.

Obrázek 19. Optimální umístění jednoho skladu. (Zdroj: autor)

3.3 Lokační úloha v případě více než jednoho skladu

Pro řešení úlohy s rozmístěním dvou skladů je nutno postupovat v souvislosti se vzorcem pro výpočet dopravní práce $f(D'_k) = \sum_{v \in D'_k} \sum_{u \in A^*(v)} d\,(u, v) \cdot w\,(u)$, kde jsme opět z důvodů specifiky našeho případu vynechali 2 před $d\,(u, v)$ (po rozvozu se vozidla nevrací do výchozího vrcholu). V porovnání s úlohou pro $k = 1$, úlohy, kde je $k > 1$, je tento úkol mnohem složitější a vyžaduje náročnější výpočty. V případě, že počet vrcholů v grafu je větší než 5, je manuální výpočet pro tyto úlohy docela obtížný. Pro řešení daného typu úloh je vhodné použít program založený na iterativním algoritmu. Vzhledem k tomu, že žádný podobný naprogramovaný algoritmus není volně dostupný, musela jsem pro vyhledávání optimálního řešení v případě dvou skladů navrhnout vlastní algoritmus.

3.3.1 Implementace iterativního algoritmu v jazyce Python

Iterativní algoritmus je zapsán v programovacím jazyku Python. Program byl doplněn o proceduru umožňující výpočet finálních výsledků s ohledem na vzdálenosti do Francie. Procedura bude podrobněji popsána v následujících kapitolách.

Programovací jazyk Python byl zvolen z několika důvodů, z nichž hlavními jsou:

- dostupnost,
- jednoduchost a intuitivní přístup,
- rozmanitý ekosystém.

Jedním z nejdůležitějších faktorů pro použití jazyka je skutečnost, že tento software je volně dostupným programem, který lze stáhnout z oficiálních stránek [19] a nainstalovat pro téměř libovolný operační systém (od všeobecně známých Windows, Mac OS, Linux po velké množství dalších méně využívaných OS). Velkou výhodou Pythonu je jednoduchost: program je intuitivní a dobře pochopitelný na rozdíl od složitějších analogů. Další plus je široký ekosystém, do kterého patří velké množství rozšíření, například různorodé moduly a knihovny (SciPy, Pandas, Numpy, …) a pochopitelná dostupná dokumentace a manuály [20].

V současnosti je Python třetím nejpoužívanějším jazykem a počet jeho uživatelů stále roste. Kromě již zmíněných výhod je dalším důvodem fakt, že tento software vyhovuje pro řešení různých problémů v mnoha oblastech: například při statistické analýze dat, vývoji webovských a mobilních aplikací, vědecko-technických výpočtech, vývoji počítačových her atd. [20].

Pokud porovnáme Python s Matlabem, používaným na Dopravní Fakultě ČVUT (viz tabulka 5), zjistíme, že má méně nedostatků a je uživatelsky přátelštější.

Tabulka 5. Porovnání Pythonu a Matlabu. (Zdroj: autor)

Python	Matlab
Výhody	
• bezplatný a volně dostupný • jednoduchý a intuitivní • možnost spouštění kódu na libovolných platformách • rozsáhlý ekosystém (lze nainstalovat hodně různorodých rozšíření)	• již zahrnuje některá rozšíření • dostupná a rozsáhlá dokumentace • velká vědecká komunita
Nevýhody	
• knihovny pro rozšířenou funkčnost musí být nainstalovány zvlášť	• kód programu je skrytý (nevíme, jak funguje) • je drahý (není volně dostupný) • nízká přenosnost (kód nefunguje stejně na všech platformách)

K ověření funkčnosti algoritmu byly použity jednoduché úlohy s menším počtem vrcholů, pro které bylo optimální řešení předem známo. Následně, po ověření funkčnosti algoritmu bylo ověřeno řešení pro jeden sklad, spočítané pomocí MS Excelu. I v tomto případě se ukázalo, že je algoritmus funkční a dává správné výsledky.

3.3.2 Verbální popis algoritmu pro dva sklady

Princip a funkci vyvinutého algoritmu verbálně popíšeme na příkladu, ve kterém zároveň ověříme, zda by umístění dvou skladů v Jažlovicích a Trnavě bylo optimálním řešením.

Jak jsme již zmiňovali, vychází program napsaný v Pythonu z iterativního algoritmu [6], (viz kapitola 2.2.4 Iterativní algoritmus pro určení optimální lokace).

Uživatelské rozhraní programu je znázorněno na obrázku 21.

0. krok – vstupy řešení

Vstupní data jsou zadána ve formátu uvedeném na obrázku 20 je použito následovné označení vstupů:

- names: množina kandidátů, kterou v našem případě představuje 13 poboček GEFCO,
- weights: váhy jednotlivých vrcholů (hmotnost zboží přepravovaného každou pobočkou v kg),
- dist: čtvercová symetrická matice nejkratších cest mezi vrcholy (pobočky) v km,
- france: vzdálenosti mezi Francií a jednotlivými pobočkami.

```
names = ['Poznan', 'Lodz', 'Grodjizk', 'Wroclaw', 'Rzeszow', 'Czeladz', 'Jazlovice', 'Brno', 'Zilina',
'Kosice', 'Zvolen', 'Trnava', 'Budapest']
weights = [22889, 6507, 5958, 14486, 43207, 42050, 453746, 37713, 12440, 43084, 5287, 139073, 86041]
dist = [[0, 217.91, 285.64, 173.50, 643.05, 401.45, 458.02, 581.48, 491.23, 728.26, 596.34, 649.09, 900.05],
        [217.91, 0, 114.36, 222.24, 432.39, 190.79, 558.65, 459.89, 362.46, 517.61, 467.58, 527.50, 778.92],
        [285.64, 114.36, 0, 329.22, 289.22, 252.53, 665.63, 521.63, 424.20, 579.34, 529.32, 589.24, 840.66],
        [173.50, 222.24, 329.22, 0, 437.02, 205.95, 338.19, 401.90, 311.65, 522.24, 416.77, 469.51, 720.93],
        [643.05, 432.39, 289.22, 437.02, 0, 251.03, 683.08, 497.62, 324.59, 200.03, 388.10, 475.17, 459.72],
        [401.45, 190.79, 252.53, 205.95, 251.03, 0, 456.41, 270.95, 175.27, 341.86, 280.39, 338.56, 589.98],
        [458.02, 558.65, 665.63, 338.19, 683.08, 456.41, 0, 188.37, 395.21, 645.64, 507.03, 368.40, 507.59],
        [581.48, 459.89, 521.63, 401.90, 497.62, 270.95, 188.37, 0, 211.36, 461.80, 327.08, 188.44, 327.64],
        [491.23, 362.46, 424.20, 311.65, 324.59, 175.27, 395.21, 211.36, 0, 252.15, 107.94, 155.79, 332.11],
        [728.26, 517.61, 579.34, 522.24, 200.03, 341.86, 645.64, 461.80, 252.15, 0, 211.79, 361.32, 260.96],
        [596.34, 467.58, 529.32, 416.77, 388.10, 280.39, 507.03, 327.08, 107.94, 211.79, 0, 150.69, 157.86],
        [649.09, 527.50, 589.24, 469.51, 475.17, 338.56, 368.40, 188.44, 155.79, 361.32, 150.69, 0, 186.92],
        [900.05, 778.92, 840.66, 720.93, 459.72, 589.98, 507.59, 327.64, 332.11, 260.96, 157.86, 186.92, 0]
        ]
france = [828.93, 947.83, 1054.81, 727.37, 1146.57, 919.9, 462.84, 647.02, 850.56, 1102.51, 924.78, 784.76,
```

Obrázek 20. Snímek programu se vstupními daty. (Zdroj: autor)

1. **krok**

Uživatel je vyzván k zadání počtu dep k (viz. obrázek 20). Pro případ rozmístění dvou skladů v Jažlovicích a Trnavě $k = 2$.

Algoritmus následně vytvoří prázdnou množinu dep D_2 pro $k = 2$. Uživatel je vyzván k zadání dvou dep jako inicializační řešení úlohy. Zadání může proběhnout buď náhodně (bez žádných předchozích předpokladů o nejlepším umístění), anebo intuitivně na základě některých informací (např. dle vah, vlastních preferencí, ověření předem získaných výsledků, ověření již existujícího řešení atd.). V našem případě jsme použili depa podle předchozího rozhodnutí pracovníků GEFCO o nejlepším umístění skladů, tj. depa Jažlovice a Trnava.

Dále je definována prázdná množina neprozkoumaných vrcholů N. Následně algoritmus přiřazuje prázdné množině vrcholů N všechny vrcholy, které nejsou v matici D_2, tj. vrcholy, které nejsou zvoleny uživatelem jako inicializační řešení, tedy v našem případě všechny vrcholy kromě Jažlovic a Trnavy.

Pro výpočet funkce $f(D_2)$ nejdřív musíme zařadit všechny vrcholy do příslušných atrakčních obvodů. V algoritmu jsme přiřazení atrakčních obvodů provedli v rámci definice funkce $f(D_2)$.

Přiřazení probíhá následovně. Nejdříve se vytvoří prázdná matice A s počtem řádků které je roven k. Každý řádek je atrakčním obvodem jednoho vybraného kandidáta na umístění střediska. V našem případě matice A má celkově 2 řádky pro Jažlovice a Trnavu. Přiřazení jednotlivých neprozkoumaných vrcholů do atrakčních obvodů vybraných středisek se provede na základě porovnání vzdálenosti, v případě rovnosti vzdáleností k oběma (obecně *k* střediskům) je nutné určit jedno středisko, do jehož atrakčního obvodu bude vrchol jednoznačně zařazen).

Výsledkem je matice přiřazených atrakčních obvodů A [[1, 4, 7, 8], [2, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13]], kde vrcholy [1, 4, 7, 8] jsou města spadající pod Jažlovice (vrchol 7) a [2, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13] pod Trnavu (vrchol 12).

V následujícím kroku je sečtena váha vrcholů náležejících do příslušného atrakčního obvodu. Pro $k = 2$ obdržíme weightA [528834, 383647], kde výsledná váha 528834 je pro Jažlovice a 383647 pro Trnavu.

Dalším důležitým krokem je výpočet dopravní práce podle vzorce (viz kapitola 2.2.3). Definujeme matici *result,* jejíž prvky vyjadřují dopravní práci pro každý atrakční obvod. Výsledkem našeho příkladu obdržíme matici [267252166, 377165692], kde první hodnota je celkovou dopravní prací pro atrakční obvod Jažlovic, a druhá pro atrakční obvod Trnavy. Následně se k dopravním pracím v jednotlivých atrakčních obvodech připočte dopravní práce při přepravě z depa do Francie (v tomto kroku z Jažlovic a Trnavy).

Výsledkem celková dopravní práce, tvořená sumou dopravních prací v atrakčních obvodech obou kandidátů včetně dopravního výkonu ze středisek do Francie (75. řádek, celá funkce $f(D_2)$ 35. až 70. řádek).

Další řádek algoritmu definuje proměnnou *minimum,* která v danou chvíli má hodnotu funkce $f(D_2)$ (78. řádek).

2. krok

V 2. kroku je nejdříve zadána pomocná proměnná z, sloužící k registraci počtu změn množiny D_k, v našem případě D_2 (83 řádek). Pří každé změně množiny dep je proměnná z inkrementována o hodnotu 1: $z = z + 1$. Pokud změna nenastala, zůstává hodnota $z = 0$.

Další řádek algoritmu ověřuje, zda množina N je prázdná (86. řádek). Pokud množina N není prázdná, pokračujeme následujícím řádkem (87.), pokud množina je prázdná, přejdeme na krok 4 (řádek 116).

V našem případě množina prázdná není, proto pokračujeme výpočty ve 2. kroku. Vybereme vrchol z množiny neprozkoumaných vrcholů N a vytvoříme množinu D, ve které bude probíhat záměna. Vrcholy pro záměnu se vybírají postupně. Prvním vrcholem je Poznaň. Množina D je pak rozdělena na *k* počet podmnožin. Náš příklad má *k* = 2 a proto množina D bude rozdělena na dvě podmnožiny $D^{v_{12}} = [v_7, v_1]$ a $D^{v_7} = [v_1, v_{12}]$, kde jsme v původní množině D_2 nahradili nejdřív vrchol v_{12} a potom vrchol v_7 vrcholem v_1.

Poté použijeme pomocnou množinu *res*, do které vložíme odpovídající hodnoty dopravní práce nově vytvořených atrakčních obvodů. K tomu opět potřebujeme zařadit vrcholy sítě do jednoznačně přidělených atrakčních obvodů. Pro tento účel se vyvolá funkce $f(D_2)$ kde parametrem D_2 bude nejdřív D^{v_7} a pak $D^{v_{12}}$ (řádek 97). Výsledkem je zmíněná množina *res*, obsahující prvky, které vyjadřují hodnoty dopravní práce podmnožin D^{v_7} a $D^{v_{12}}$.

Výsledky z programu:

- Dopravní práce pro kombinaci vrcholů [1, 12] je: 967331529 (Poznaň, Trnava)
- Dopravní práce pro kombinaci vrcholů [7, 1] je: 659514581 (Jažlovice, Poznaň)

Tímto ukončíme 2. krok.

3. krok

Definujeme proměnnou *locmin*, do které patří minimální hodnota dopravní práce atrakčních obvodů daných podmnožinami D^{v_7} a $D^{v_{12}}$. V našem případě byla minimální hodnota pro vrcholy [7, 1] a proto *locmin* se rovná 659514581. Hodnota *locmin* určí pouze minimální hodnotu, nikoliv kombinaci vrcholů, pro které je hodnota kritéria minimální. Následně je použita pomocnou proměnnou *which*, která vyjadřuje, pro kterou dvojici vrcholů je výsledek lepší. Jak již bylo řečeno, je to kombinace vrcholů v_7 a v_1 (Jažlovice a Poznaň).

V dalším kroku porovnáváme hodnotu *locmin* s aktuální hodnotou proměnné *minimum*. Pokud je locmin větší nebo roven hodnotě *minimum*, zkoumaný vrchol (v našem případě vrchol v_1 – Poznaň) vyloučíme z množiny neprozkoumaných vrcholů *N* a vrátíme se na krok

2 (řádek 82). Pokud je *locmin* menší, pokračujeme vytvořením nové množiny dep $D_k = D_k - \{v_r\} + \{v\}$. Položíme $z = z + 1$, *minimum* = *locmin,* vyloučíme vrchol v_1 z množiny neprozkoumaných vrcholů *N* a vrátíme se na krok 2. V našem případě *locmin* je větší než minimum, proto vyloučíme vrchol v_1 (Poznaň) z množiny neprozkoumaných vrcholů N. Vrátíme se ke kroku 2 a pokračujeme výpočtem pro další kombinaci středisek s použitím dalšího neprozkoumaného vrcholu v pořadí (2. vrchol, Lodž). Tento postup se opakuje, pokud nebude nalezeno (sub)optimální řešení.

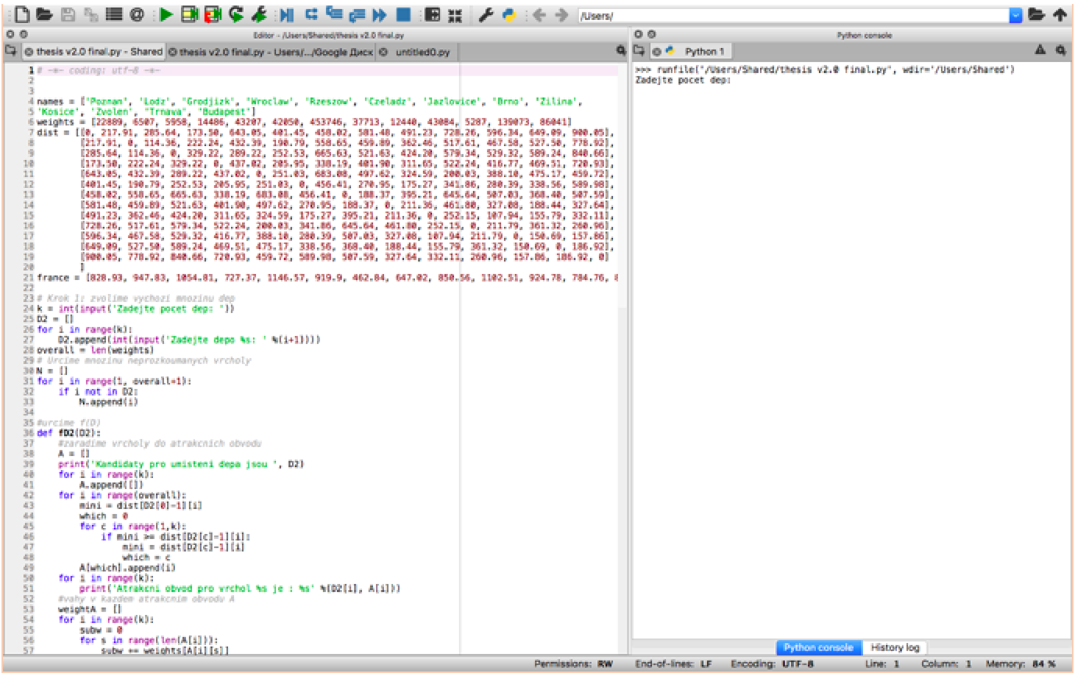
4. krok

Je-li $z = 0$, pokračujeme krokem 5 (řádek 124), pokud $z > 0$, vrátíme se ke kroku 2 (řádek 82), položíme $z = 0$ a určíme novou množinu N.

5. krok

Poslední krok algoritmu ukazuje výsledky (sub)optimálního řešení.

V našem případě jsou to vrcholy v_7 a v_8 – Jažlovice a Brno. Minimální hodnota dopravní práce je 632968092.49 [kg*km].



Obrázek 21. Uživatelské rozhraní programu Python. (Zdroj: autor)

3.3.3 Výpočty pro různý počet skladů

Algoritmus byl použit pro zjištění výsledků několika variant:

- 1 sklad bez ohledu na přepravy do Francie,
- 1 sklad s ohledem na přepravy do Francie,
- 2 sklady bez ohledu na přepravy do Francie,
- 2 sklady s ohledem na přepravy do Francie,
- 3 sklady bez ohledu na přepravy do Francie,
- 3 sklady sklad s ohledem na přepravy do Francie,
- 4 sklady bez ohledu na přepravy do Francie,
- 4 sklady s ohledem na přepravy do Francie.

Díky tomu bylo zaprvé zjištěno, že algoritmus umí počítat úlohy s libovolnou předem zadanou hodnotou k, a zadruhé byly ověřeny výsledky úlohy pro jeden sklad, spočítané v Excelu v předchozí kapitole. Výsledky jednotlivých výpočtů jsou uvedeny níže.

1 sklad

1 sklad bez ohledu na přepravy do Francie

k = 1: Množina D { ['Jažlovice'] } představuje vrcholové optimální rozmístění 1 depa na sítí.

Minimální hodnota dopravní práce je 209115353.24. Vrcholy: [7]

1 sklad s ohledem na přepravy do Francie

k = 1: Množina D { ['Jažlovice'] } představuje vrcholové optimální rozmístění 1 depa na sítí.

Minimální hodnota dopravní práce je 631448059.28 Vrcholy: [7]

Výsledky nám vyšly stejně, jako při výpočtech v Excelu a optimální umístění jednoho skladu (v Jažlovicích) je již znázorněno na obrázku 18.

2 sklady

2 sklady bez ohledu na přepravy do Francie

k = 2: Množina D { ['Trnava', 'Jažlovice'] } představuje vrcholové optimální rozmístění 2 dep na síti.

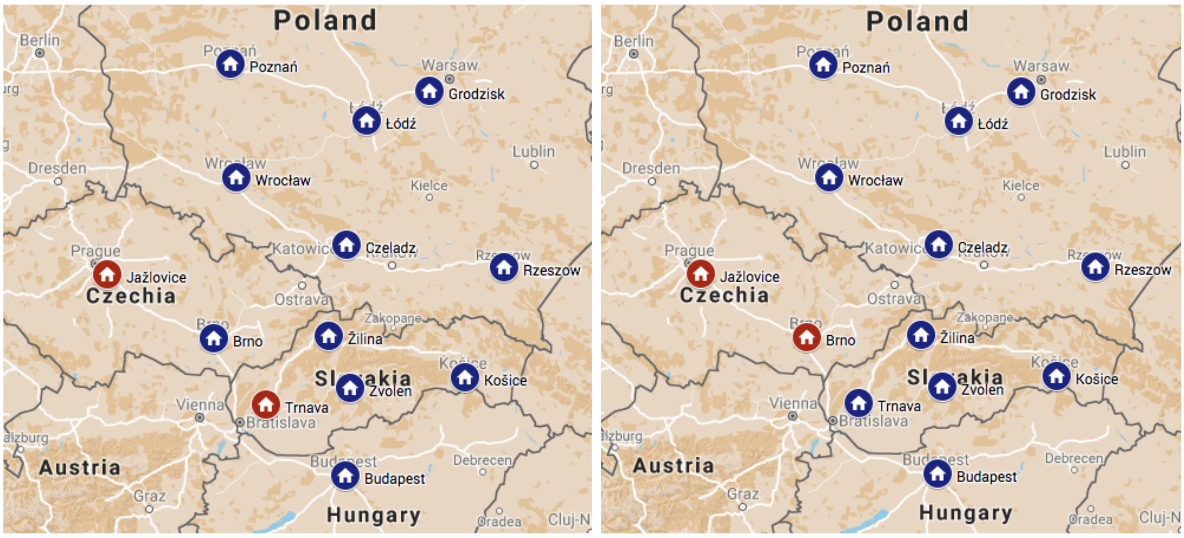
Minimální hodnota dopravní práce je 98581510.77000001. Vrcholy: [12, 7]

2 sklady s ohledem na přepravy do Francie

k = 2: Množina D { ['Brno', 'Jažlovice'] } představuje vrcholové optimální rozmístění 2 dep na síti.

Minimální hodnota dopravní práce je 632968092.49. Vrcholy: [8, 7]

Porovnání výsledků pro 2 sklady pro oba případy vidíme na mapě na obrázku 22.



Obrázek 22. Optimální rozmístění 2 skladů bez ohledu (vlevo) a s ohledem (vpravo) na Francii. (Zdroj: autor)

3 sklady

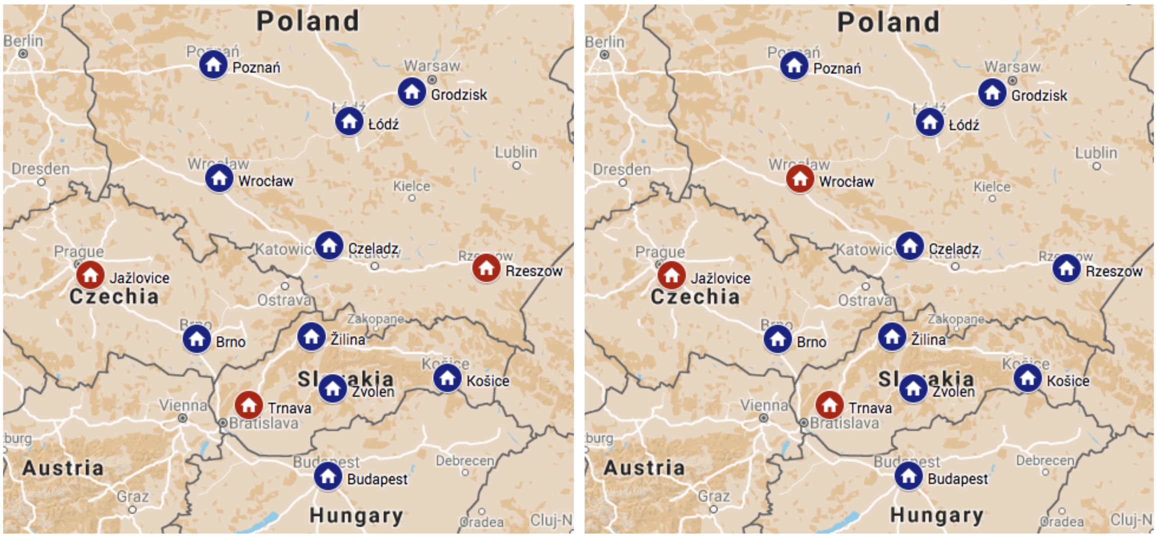
3 sklady bez ohledu na přepravy do Francie

k= 3: Množina D { ['Trnava', 'Jažlovice', 'Rzeszow'] } představuje vrcholové optimální rozmístění 3 dep na síti. Minimální hodnota dopravní práce je 65014785.79. Vrcholy: [12, 7, 5]

3 sklady sklad s ohledem na přepravy do Francie

Množina D { ['Trnava', 'Wroclaw', 'Jažlovice'] } představuje vrcholové optimální rozmístění 3 dep na síti. Minimální hodnota dopravní práce je 626524880.07. Vrcholy: [12, 4, 7]

Porovnání výsledků pro 3 sklady je na obrázku 23.



Obrázek 23. Optimální rozmístění 3 skladů bez ohledu (vlevo) a s ohledem (vpravo) na Francii. (Zdroj: autor)

4 sklady

4 sklady bez ohledu na přepravy do Francie

k = 4: Množina D { ['Trnava', 'Czeladz', 'Budapest', 'Jažlovice'] } představuje vrcholové optimální rozmístění 4 dep na síti.

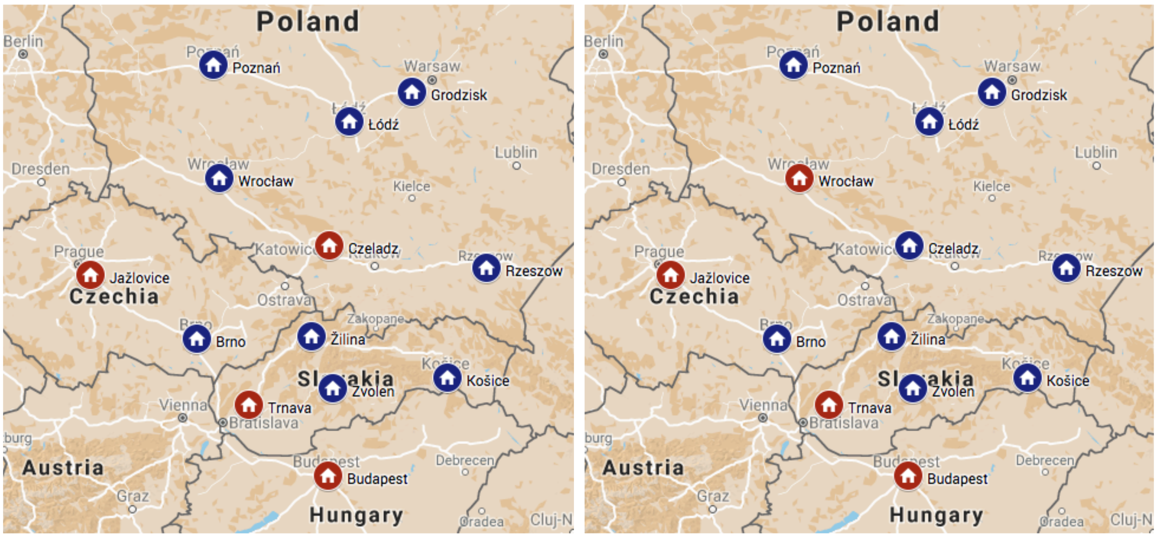
Minimální hodnota dopravní práce je 46846402.309999995. Vrcholy: [12, 6, 13, 7]

4 sklady s ohledem na přepravy do Francie

k = 4: Množina D { ['Budapest', 'Jažlovice', 'Trnava', 'Wroclaw'] } představuje vrcholové optimální rozmístění 4 dep na síti.

Minimální hodnota dopravní práce je 620678321.11. Vrcholy: [13, 7, 12, 4]

Porovnání obou variant lze opět sledovat na mapě na obrázku níže.



Obrázek 24. Optimální rozmístění 3 skladů bez ohledu (vlevo) a s ohledem (vpravo) na Francii. (Zdroj: autor)

2 sklady bez ohledu na přepravy do Francie a bez ohledu na váhy

Dalším zajímavým výpočtem, který byl proveden při testování algoritmu, byl výpočet optimálního umístění 2 dep bez ohledu na následující distribuci do Francie a bez ohledu na přiřazení jednotlivým vrcholům váhy (tzv. každý vrchol měl stejnou váhu rovnou 1). V tomto případě zvolil algoritmus jako optimální pro umístění depa vrcholy v polském městě Lodž a ve slovenské Žilině.

Množina D { ['Žilina', 'Lodž'] } představuje vrcholové optimální rozmístění 2 dep na síti.

Minimální hodnota dopravní práce je 2508.9300000000003. Vrcholy: [9, 2]

Na obrázku 25 je mapa, znázorňující umístění 2 skladů bez ohledu na váhy a následující přepravy do Francie a atrakční obvody těchto skladů. Červeně jsou vyznačeny vrcholy, které patří do atrakčního obvodu skladu v Lodži, modře jsou označeny vrcholy patřící do atrakčního obvodu Žiliny.

Obrázek 25. Umístění 2 skladů bez ohledu na váhy a následující distribuci a jejich atrakční obvody. (Zdroj: autor)

4 VYHODNOCENÍ NÁVRHU A DOPORUČENÍ PRO IMPLEMENTACI V REÁLNÉM PROVOZU

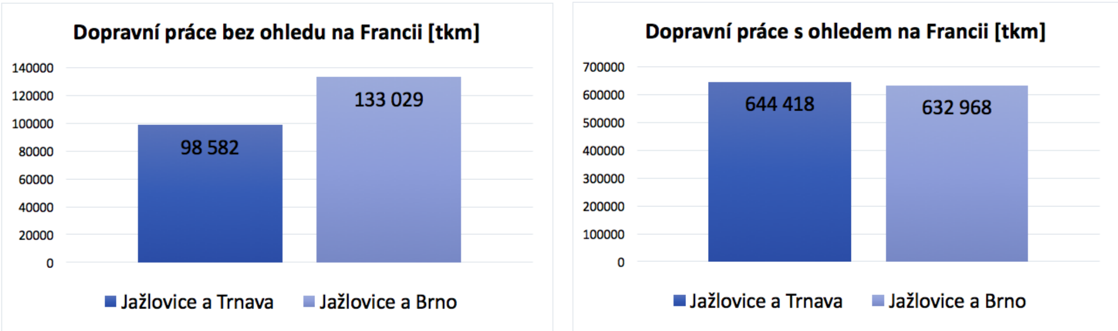
4.1 Vyhodnocení výsledků lokační analýzy

Výsledky lokační analýzy v případě rozmístění jednoho skladu potvrdily, že nejlepší lokace pro umístění tohoto skladu je v českých Jažlovicích, a to bez ohledu na to, zda výrobky budou následně distribuovány do Francie nebo ne. V obou případech jsou Jažlovice optimálním vrcholem pro umístění centrálního skladu. Výsledek byl nejdřív spočítán v Excelu a následně ověřen v programu.

Tento výsledek byl předvídatelný již v průběhu řešení úlohy vzhledem k tomu, že váha vrcholu „Jažlovice“ byla výrazně větší než u ostatních vrcholů. Navíc je pozice Jažlovic nejlepší z pohledu následující přepravy zboží do Francie: jažlovický sklad se nachází nejblíž ze všech možných variant k francouzské hranici. Výsledná dopravní práce činí bez ohledu na přepravy do Francie 209.115.353,24 [kg*km], čili přibližně 209.115 [tkm]. Pokud se zohlední následné přepravy do Francie, bude se tato hodnota rovnat 631.448.059,28 [kg*km] čili 631.448 [tkm].

Dále byla ověřena možnost umístění dvou skladů předpokládaná společností GEFCO, a to v Jažlovicích a Trnavě. Zajímavé je, že bez zohlednění následující distribuce automobilových dílů do Francie potvrdil výpočet v programu, že toto umístění je skutečně nejlepší. Avšak při zohlednění vzdáleností do Francie, respektive dopravních prací vykonaných při následující přepravě zboží do jednotlivých francouzských PSA továren, není tato varianta optimální. V případě umístění dvou skladů v Jažlovicích a Trnavě činí výsledná celková dopravní práce 98.581.510,77 [kg*km] nebo 98.582 [tkm] bez ohledu přeprav do Francie a 644.417.859,05 [kg*km] neboli 644.418 [tkm] s ohledem na tyto přepravy. V případě umístění centrálních skladů do Jažlovic a Brna jsou tyto hodnoty následující: 133.029.301,65 [kg*km] nebo 133.029 [tkm] bez ohledu na následující distribuci a 632.968.092,49 [kg*km] čili 632.968 [tkm] s ohledem na následující přepravy do Francie.

Výsledky jsou znázorněny na obrázku níže.



Obrázek 26. Porovnání výsledků dopravních prací pro 2 sklady. (Zdroj: autor)

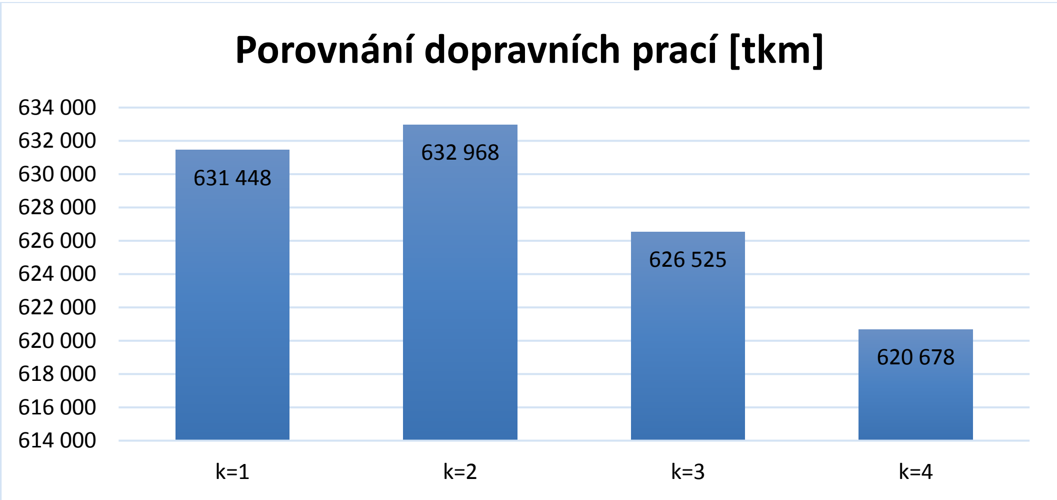
Čím menší je hodnota vykonané dopravní práce, tím lepší je řešení. Z obrázku 26 je vidět, že pokud se nepočítá s následující distribucí výrobků do Francie, rozmístění skladů v Jažlovicích a Trnavě je výrazně lepším řešením. Pokud však do řešení bude promítnuta dopravní práce, kterou je zapotřebí vykonat pro následující rozvoz zboží do Francie, budou se optimální vrcholy pro umístění skladů nacházet v Jažlovicích a Brně, i když rozdíl mezi touto variantou a variantou umístění dep do Jažlovic a Trnavy je velmi malý. Každopádně, dle výsledků algoritmu je umístění dvou skladů v Jažlovicích a Brně nejlepším řešením a pokud ho zmapujeme a znázorníme atrakční obvody, patřící každému skladu, dostaneme následující obrázek:

Obrázek 27. Optimální umístění 2 skladů a jejich atrakční obvody. (Zdroj: autor)

Na obrázku jsou centrální sklady (Jažlovice a Brno) čili depa označeny ikonkou s vlajkou, atrakční obvody jsou pak vyznačeny ikonkou bez vlajky a mají barvu stejnou jako příslušné depo.

Je jasné, že výpočet dopravní práce bez ohledu na následující distribuci výrobků do Francie nedokáže poskytnout nejpřesnější informaci o optimálním umístění depa, proto nemá smysl porovnávat výsledné hodnoty dopravních prací pro tento případ. Avšak je důležité porovnat výsledné hodnoty dopravních prací pro všechny spočítané k s ohledem na přepravy do Francie a zjistit, pro jaký počet dep (centrálních skladů) je výsledné řešení nejlepší. Dále budou srovnány hodnoty dopravní práce pro $k = 1$, $k = 2$, $k = 3$ a $k = 4$. Pro $k = 1$ (Jažlovice) je výsledná hodnota 631.448 tkm, pro $k = 2$ (Jažlovice a Brno) je 632.968 tkm, pro $k = 3$ (Jažlovice, Trnava, Vratislav) je 626.525 tkm a nakonec pro $k = 4$ ((Jažlovice, Trnava, Vratislav a Budapešť) je tato hodnota 620.678 tkm.

Výsledky porovnání jsou znázorněny ve sloupcovém grafu, který je vidět na obrázku číslo 28 níže.



Obrázek 28. Porovnání získaných hodnot dopravních prací s ohledem na přepravy do Francie. (Zdroj: autor)

Na základě grafu lze říci, že nejlepší výsledek byl dosažen v případě rozmístění většího počtu skladů, zatímco varianta s dvěma sklady je dle výsledků lokační analýzy nejhorší, přičemž rozdíl mezi hodnotami pro 1 a 2 sklady je minimální. Avšak v praxi vede rozmístění většího počtu středisek obsluhy k vyšším nákladům. Zaprvé každý sklad musí být rozšířen a připraven pro příjem a odbavení PSA vozidel. Ve skladu se také musí uvolnit místo pro skladování výrobků, jejichž dodání může být požadováno urgentně. Tyto činnosti mohou omezit současnou funkčnost skladů a snížit jejich schopnost pro příjem či rozvoz zboží klientů mimo PSA Group. Zadruhé, jak se již psalo dříve, denně do Francie odjíždí 9 kamionů. Každý z těchto kamionů je předem naložen podle objednávky určité továrny.

Avšak zboží, které musí být do příslušné objednávky zahrnuto, může být dováženo od několika rozličných dodavatelů, kteří se nacházejí v různých částech Evropy. Tato podmínka velmi komplikuje možnost distribuce zboží do Francie z většího počtu skladů, protože v tomto případě musí být každý sklad schopen zajistit potřebné množství automobilových dílů tak, aby každé vozidlo bylo naloženo kapacitně maximálně. Zatřetí je rozdíl mezi výslednými hodnotami poměrně malý. Pokud vezmeme v úvahu skutečnost, že zvolené váhy nejsou dostatečně přesné, tento rozdíl můžeme v podstatě zanedbat. Nepřesnost vah vyplývá z několika faktorů, například transportní plán a s ním i počet objednávek a jejich hmotnost se může každý měsíc měnit, navíc hmotnost zboží nezohledňuje jeho rozměr, proto nemůžeme říci, kolik kamionů přesně potřebujeme pro zajištění přeprav z každého skladu.

Na základě této analýzy lze konstatovat, že současné umístění skladu v Jažlovicích je skutečně nejvhodnějším řešením. Při zvýšení počtu skladů vzniknou další náklady, které však ve výsledku nezaručují lepší efekt a větší úspory.

4.2 Další možná opatření – optimalizace procesu odbavení vozidel

Vzhledem k tomu, že pro všechny situace vychází optimální umístění skladu i s ohledem na následující přepravu do Francie v Jažlovicích (nebo jsou Jažlovice alespoň jedním ze všech výsledných nejlepších kandidátů v případě, že počet dep je větší než 1), pro GEFCO je vždy vhodné tento sklad zlepšovat. Navíc, jak bylo zjištěno v předchozí kapitole, umístění pouze jednoho skladu, a to v Jažlovicích, je optimálním řešením, při kterém jsou výsledky nejlepší.

Jak se již psalo v kapitole věnované společnosti GEFCO, proběhla před rokem v areálu skladu optimalizace, která spočívala v zavedení systému časových oken pro rychlejší nakládku a vykládku vozidel. Tato optimalizace byla provedena především pro efektivnější odbavení PSA vozidel.

V rámci předmětu teorie hromadné obsluhy jsem prováděla simulace předchozího a současného stavu skladu a zjišťovala, zda je optimalizace pro sklad přínosná a řeší problém vytváření front při obsluze nákladních automobilů.

Simulace byla provedena pomocí simulačního programu HPSim, ze kterého byla získána potřebná data pro následné zpracování. HPSim na rozdíl od Matlabu velmi dobře znázorňuje situaci a umožňuje hned v procesu simulace odhalit některé problémy a závady modelu. Dále se pomocí Matlabu a programu Gretl[1] testovaly předem stanovené hypotézy, týkající se efektivity nového systému obsluhy.

4.2.1 Popis situace v praxi

Zde popíšeme princip obsluhy kamionů pro předchozí a současný stav.

Výrobky ve skladu patří do dvou skupin: část zboží pokračuje hned po překládce dále k příjemci, další část se skladuje a čeká na vyzvednutí. Kamiony, které přijíždějí do skladu, lze rozdělit na tři typy:

1) prázdný kamion, který přijíždí na nakládku (PSA),
2) kamion, který přijíždí na vykládku a po vykládce odjíždí prázdný,
3) a kamion, který přijíždí na vykládku a pak se rovnou nakládá pro další jízdu (PSA).

Zboží je děleno na FTL a LTL zásilky neboli již zmíněné celovozové a částečné zásilky, obsahující jen několik palet. Zboží lze dále dělit dle různých kategorií v závislosti na jeho

---

[1] *Gretl je volně dostupný počítačový statistický systém, užívaný především v ekonometrii. Název vznikl jako akronym výrazu „Gnu Regression, Econometrics and Time-series Library“, které vyjadřují určení tohoto systému. Ovládá se pomocí grafického rozhraní. Umožňuje výstup v LaTeX.* [21]

typu, složitosti při manipulaci, nutnosti kontroly stavu atd. Toto vše ovlivňuje čas obsluhy, který kamion stráví na obslužné rampě.

Důležitou částí procesu obsluhy před nakládkou nebo vykládkou je povinná zastávka řidičů na přepážce registrace, kde řidič hlásí svůj příjezd a odevzdává potřebné dokumenty (CMR, nákladní list, potvrzení objednávky atd.)

Celkově je v jažlovické pobočce GEFCO 24 obslužných ramp a jedna přepážka registrace (obrázek 29).

Obrázek 29. Schéma obsluhy kamionů v GEFCO. (Zdroj: autor)

Dřívější proces obsluhy kamionů

Před optimalizací probíhal proces obsluhy takovým způsobem, že kamion přijížděl do logistického areálu a nejdřív jel na přepážku registrace GEFCO. Tam řidič hlásil svůj příjezd a odevzdával dokumenty potvrzující přepravu a pracovník přepážky je následně ověřoval a informoval o příjezdu příslušného dispečera. Dispečer musel pracovníkovi přepážky potvrdit SPZ kamionu a údaje o zboží a až pak byli o příjezdu kamionu informováni pracovníci skladu, kteří po zjištění kapacity hlásili číslo volné rampy. Po komunikaci řidič – přepážka – dispečer – přepážka – skladník – přepážka a odsouhlasení všech údajů mohl řidič pokračovat k rampě. Poté skladník připravoval volnou rampu pro nakládku či vykládku a až po provedení těchto kroků byl kamion naložen nebo naopak vyložen, případně oboje.

Současný proces obsluhy kamionů

Předchozí organizace působila to, že v případě velkého počtu kamionů přijíždějících najednou, nestíhal pracovník přepážky vše vyřídit a pracovníci skladu poté nestíhali připravit rampy k manipulaci se zbožím. Ve výsledku musely některé kamiony čekat ve frontě kolem dvou hodin. Největším problémem však bylo to, že ve stejné frontě musely čekat i kamiony, které, ať již po vykládce, nebo ne, musely být hned naloženy a měly odjíždět v určitém časovém intervalu, aby splnily tzv. transit time a přijely včas do koncového bodu. Jedná se o PSA kamiony odjíždějící do Francie. Jsou to největší a nejdůležitější zákazníci, u kterých zpoždění není akceptovatelné. S rozšířením společnosti a růstem počtu nových zákazníků se tento problém zvětšoval. Proto bylo rozhodnuto o optimalizaci, jejímž výsledkem bylo zaprvé zavedení systému časových oken, která umožňují rezervaci určitých časových slotů, a zadruhé rozdělení ramp do 4 jednotlivých typů. 24 ramp bylo rozděleno následujícím způsobem:

1) 6 ramp OVL – kamiony se zbožím všech zákazníků přijíždějící na nakládku či vykládku, které nespadají do ostatních kategorií,
2) 14 ramp MAF – kamiony PSA Group, které používají sklad v Jažlovicích jako svůj vlastní konsignační sklad, přijíždějí na nakládku či vykládku a následnou nakládku,
3) 3 rampy vyhrazené pro vykládku vratných obalů,
4) 1 rampa TPCA[2] – kamiony dovážející automobilové díly výhradně pro továrnu TPCA v Kolíně.

Rezervace časových oken umožnila pravidelnější příjezd kamionů do skladu v určitých časových intervalech, což zkrátilo dobu na vyřízení registrace a přípravu rampy. V důsledku rozdělení kamionů na jednotlivé fronty došlo ke snížení a často i úplnému odstranění zpoždění u nejdůležitějších zákazníků, k zrychlení při přípravě zboží na výdej a zjednodušení procesu příjmu zboží ve skladu. Celkově způsobila optimalizace efektivnější využití skladových ploch a časových intervalů.

[2] TPCA – Toyota Peugeot Citroën Automobile, joint venture projekt Toyota Motor Corporation a PSA Peugeot Citroën, provozujících automobilovou továrnu v Kolíně.

4.2.2 Popis simulačního modelu a simulace

Popis modelu pro současný stav

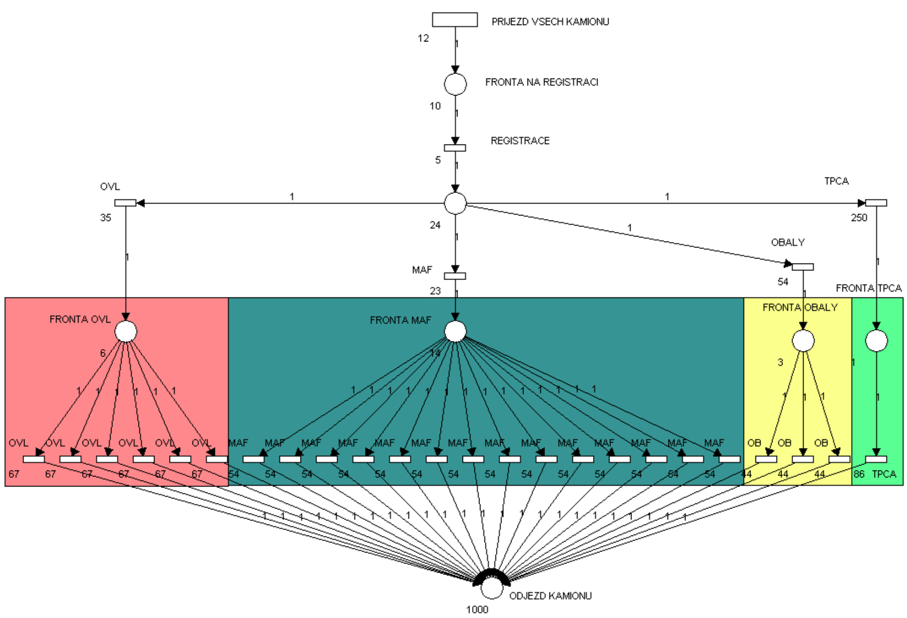
Data o současném stavu byla získána z interního programu firmy na základě informací pro několik pracovních dnů. Sklad je otevřen každý pracovní den od 6:00 do 23:00 hodin, pro každý z těchto dnů byl proveden průzkum a následně stanoveny průměrné hodnoty. Tak bylo zjištěno, že během běžného pracovního dne přijíždí do skladu v intervalu 12 minut přibližně 82 kamionů, které se dělí:

1) OVL: 25 kamionů s intervalem 40 minut a dobou obsluhy 67 minut,
2) MAF: 36 kamionů s intervalem 28 minut a dobou obsluhy 54 minut,
3) OBALY: 17 kamionů s intervalem 59 minut a dobou obsluhy 44 minut,
4) TPCA: 4 kamiony s intervalem 255 minut a dobou obsluhy 86 minut.

Každý kamion také stráví čas ve frontě na registraci, která trvá přibližně 5 minut.

- Vstupní proud:
  - zdroj požadavků: nekonečný,
  - vstupní proud: Poissonův tok,
  - tok vstupu: složený (4 nezávislé toky – OVL, MAF, Obaly a TPCA).
- Fronta:
  - délka fronty (registrace/rampy): 10 z důvodu omezené parkovací plochy/24 dle počtu ramp,
  - disciplína čekání: FIFO.
- Uzel obsluhy:
  - počet kanálů (registrace/rampy): 1/24,
  - doba obsluhy: (registrace/OVL/MAF/Obaly/TPCA): 5/67/54/44/86 minut.

Model simulace současného stavu můžeme vidět na obrázku 30. Vzhledem k tomu, že se nejdříve každý řidič kamionu musí zastavit na přepážce za účelem předání dokumentů a oznámení o příjezdu, jsem v modelu nejdříve vytvořila jedinou společnou frontu, která byla nato rozdělena do dalších jednotlivých front (OVL, MAF, Vratné obaly, TPCA).



Obrázek 30. Model simulace současného stavu. Snímek z HPSimu. (Zdroj: autor)

Důležitou podmínkou je skutečnost, že ve společnosti nesmí žádný kamion zůstat neobsloužen, proto není v modelu počet odcházejících řidičů. Kamiony, které nebudou obslouženy během otevírací doby, zůstanou ve frontě. Tyto kamiony musí být stejně obslouženy, avšak se zpožděním.

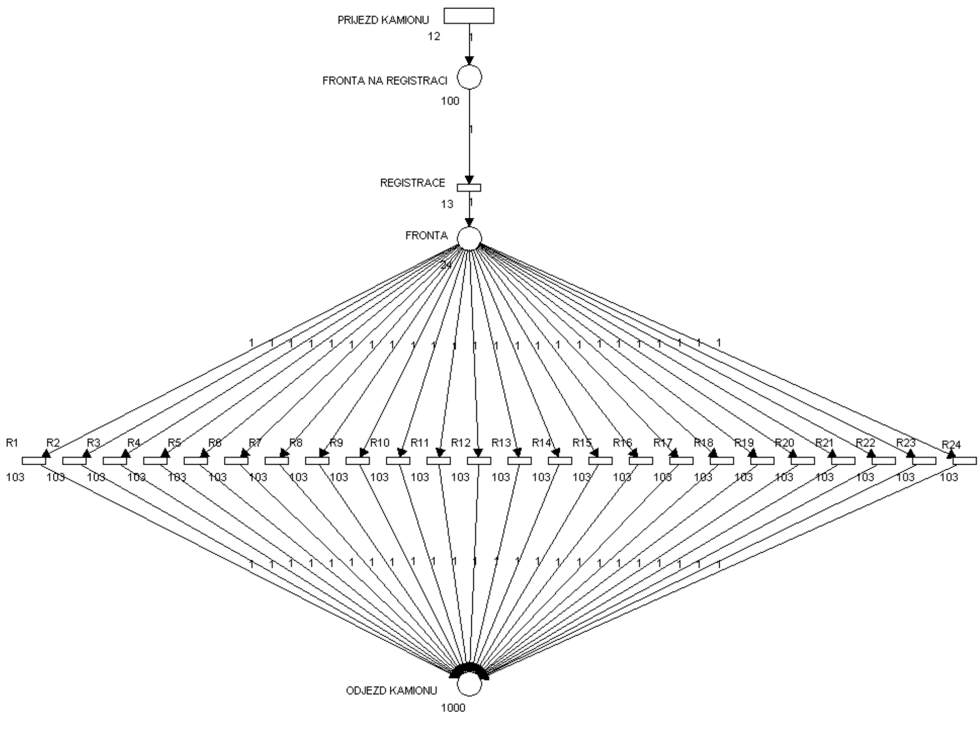
Simulace probíhala po dobu 1020 ms, což při volbě 1 milisekunda = 1 minuta odpovídá otevírací době skladu, tj. 17 hodin. Celkově bylo provedeno 30 simulací.

Popis modelu pro dřívější stav

Pro popis modelu dřívějšího stavu je počet vozidel přijíždějících do skladu stejný jako v současné době. Nyní se ale bude tvořit jediná fronta, a to jak před, tak i po registraci. Vzhledem k tomu, že časové okno nebylo předem rezervováno, kamiony přijíždějí zcela náhodně a registrace trvá mnohem déle kvůli dlouhé komunikaci a ověřování všech údajů. Následná doba obsluhy na rampě se z důvodu přípravy též zvyšuje. Doba a počet simulací jsou stejné jako pro předchozí model.

- Vstupní proud:
    - zdroj požadavků: nekonečný,
    - vstupní proud: Poissonův tok,
    - tok vstupu: 1 tok.
- Fronta:
    - délka fronty: neomezená (uvažujeme tady možnost využití externích parkovacích ploch nebo odjezd řidiče a vrácení se znovu k času uvolnění rampy, avšak rozumíme, že kritická hodnota pro nás je 10 pro registrace a 24 pro frontu na rampy),
    - disciplína čekání: FIFO.
- Uzel obsluhy:
    - počet kanálů (registrace/obsluha): 1/24,
    - doba obsluhy: (registrace/rampy): 13/103 minut.

Model simulace dřívějšího stavu je znázorněn na obrázku níže.



Obrázek 31. Model simulace dřívějšího stavu. Snímek z HPSimu. (Zdroj: autor)

4.2.3 Výsledky simulace

Výsledky simulace současného stavu

Výsledky simulace pro současný stav jsou uvedeny v tabulce číslo 6. V průměru je obslouženo 85 kamionů, z nich přibližně 3 % se zpožděním. Zpoždění je rozděleno do dvou skupin:

1) zpoždění při registraci,
2) následné zpoždění při obsluze.

Pro rychlejší obsluhu je důležitější, aby řidič nahlásil svůj příjezd nejdřív na přepážce – jakmile je v systému zarezervováno časové okno a řidič skutečně přijel a potvrdil to na registrační přepážce, ihned najíždí na předem připravenou rampu, kde bude obsloužen. Složitější je to v případě, že řidič zatím není registrován a není známo, jestli ve zvoleném časovém okně dorazí nebo ne (z důvodu kongesce, havárie apod.). Navíc, pokud nedodrží podmínku příjezdu ve stanoveném čase, způsobí další zpoždění a následné komplikace v celém časovém systému. Z tabulky je vidět, že téměř žádné zpoždění nenastává při registraci a většina čekajících automobilů se již nachází ve frontě na obsluhu. Červeně jsou označeny nejhorší hodnoty, zeleně nejlepší případ.

Tabulka 6. Výsledky simulace pro současný model obsluhy. (Zdroj: autor)

4 FRONTY							
Simulace	Celkem kamionů	Počet obsloužených kamionů	Počet čekajících kamionů celkově	Počet kamionů čekajících na obsluhu	Počet kamionů čekajících na registraci	% obsloužených se zpožděním celkově	% obsloužených se zpožděním na registraci
1	85	82	3	2	1	3,53 %	1,18 %
2	83	80	3	3	0	3,61 %	0,00 %
3	83	79	4	4	0	4,82 %	0,00 %
4	86	84	2	2	0	2,33 %	0,00 %
5	92	88	4	3	1	4,35 %	1,09 %
6	84	82	2	2	0	2,38 %	0,00 %
7	84	82	2	1	1	2,38 %	1,19 %
8	84	82	2	2	0	2,38 %	0,00 %
9	84	81	3	3	0	3,57 %	0,00 %
10	84	81	3	3	0	3,57 %	0,00 %
11	85	84	1	1	0	1,18 %	0,00 %
12	89	87	2	2	0	2,25 %	0,00 %
13	84	81	3	2	1	3,57 %	1,19 %
14	82	79	3	3	0	3,66 %	0,00 %
15	82	80	2	1	1	2,44 %	1,22 %
16	82	80	2	1	1	2,44 %	1,22 %
17	83	80	3	3	0	3,61 %	0,00 %
18	83	79	4	4	0	4,82 %	0,00 %
19	86	84	2	2	0	2,33 %	0,00 %
20	85	83	2	2	0	2,35 %	0,00 %
21	84	80	4	4	0	4,76 %	0,00 %
22	82	79	3	3	0	3,66 %	0,00 %
23	91	89	2	2	0	2,20 %	0,00 %
24	82	80	2	2	0	2,44 %	0,00 %
25	91	88	3	3	0	3,30 %	0,00 %
26	87	82	5	5	0	5,75 %	0,00 %
27	87	83	4	3	1	4,60 %	1,15 %
28	82	77	5	4	1	6,10 %	1,22 %
29	86	84	2	2	0	2,33 %	0,00 %
30	89	86	3	3	0	3,37 %	0,00 %
Průměr	**85,03**	**82,20**	**2,83**	**2,57**	**0,27**	**3,34 %**	**0,32 %**

Výsledky simulace pro dřívější stav

Pro dřívější stav ukázala simulace, že je z 84 kamionů 10 % obslouženo se zpožděním, přičemž zpoždění nastává hned po příjezdu na registrační přepážku. V některých případech dosahovala fronta na registraci hodnoty 14 kamionů, největším počtem bylo dokonce 17 kamionů, což tvoří skoro 20 % obsloužených se zpožděním z celkového počtu denně přijíždějících kamionů. Daná skutečnost je pro funkčnost skladu a dodržování pracovní doby absolutně neakceptovatelná. Výsledky simulace jsou v tabulce níže.

Tabulka 7. Výsledky simulace pro dřívější model obsluhy. (Zdroj: autor)

1 SPOLEČNÁ FRONTA							
Simulace	Celkem kamionů	Počet obsloužených kamionů	Počet čekajících kamionů celkově	Počet kamionů čekajících na obsluhu	Počet kamionů čekajících na registraci	% obsloužených se zpožděním celkově	% obsloužených se zpožděním na registraci
1	85	78	7	0	7	8,24 %	8,24 %
2	84	80	4	0	4	4,76 %	4,76 %
3	84	76	8	0	8	9,52 %	9,52 %
4	82	76	6	0	6	7,32 %	7,32 %
5	87	76	11	1	10	12,64 %	11,49 %
6	83	78	5	0	5	6,02 %	6,02 %
7	87	78	9	0	9	10,34 %	10,34 %
8	83	79	4	0	4	4,82 %	4,82 %
9	85	72	13	0	13	15,29 %	15,29 %
10	81	74	7	0	7	8,64 %	8,64 %
11	85	77	8	0	8	9,41 %	9,41 %
12	85	75	10	0	10	11,76 %	11,76 %
13	86	72	14	0	14	16,28 %	16,28 %
14	83	73	10	0	10	12,05 %	12,05 %
15	86	75	11	0	11	12,79 %	12,79 %
16	83	75	8	0	8	9,64 %	9,64 %
17	86	75	11	0	11	12,79 %	12,79 %
18	85	71	14	0	14	16,47 %	16,47 %
19	81	75	6	1	5	7,41 %	6,17 %
20	80	74	6	0	6	7,50 %	7,50 %
21	82	73	9	0	9	10,98 %	10,98 %
22	85	78	7	0	7	8,24 %	8,24 %
23	78	76	2	1	1	2,56 %	1,28 %
24	83	80	3	0	3	3,61 %	3,61 %
25	84	77	7	0	7	8,33 %	8,33 %
26	83	72	11	0	11	13,25 %	13,25 %
27	88	75	13	0	13	14,77 %	14,77 %
28	87	73	14	0	14	16,09 %	16,09 %
29	90	73	17	0	17	18,89 %	18,89 %
30	81	75	6	0	6	7,41 %	7,41 %
Průměr	**84,07**	**75,37**	**8,70**	**0,10**	**8,60**	**10,26 %**	**10,14 %**

4.2.4 Testy hypotéz a regresní analýza

Pro ověření výsledků a potvrzení předpokladu, že nové schéma fungování procesů ve skladu je lepší a efektivnější, byly provedeny následující testy:

1) test dvou středních hodnot,
2) regresní analýza.

Test dvou středních hodnot

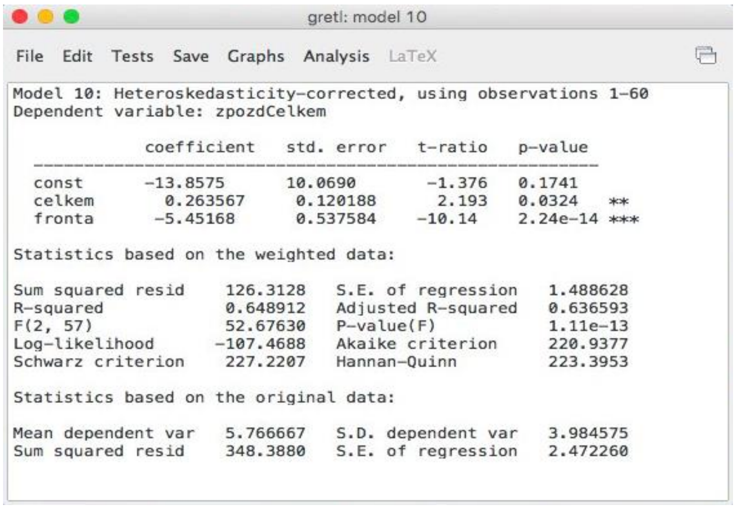
Test dvou středních hodnot pro počet kamionů obsloužených včas byl proveden v programu Matlab pomocí funkce ttest2. Za nulovou hypotézu byl použit předpoklad, že počet kamionů obsloužených včas je v současném stavu větší než v předchozím případě. Hladina významnosti je zvolena jako α=0,05 a test je pravostranný.

```
>> x = [78   80   76   76   76   78   78   79   72   74   77   75
        72   73   75   75   75   71   75   74   73   78   76   80
        77   72   75   73   73   75];

>> y = [82   80   79   84   88   82   82   82   81   81   84   87
        81   79   80   80   80   79   84   83   80   79   89   80
        88   82   83   77   84   86];

>> alpha = 0,05;

>> [h,significance,ci] = ttest2(x,y,alpha,’right’)
```

Výsledná hodnota významnosti se rovná 0.9967, což znamená, že více než v 99 % případů platí nulová hypotéza, tedy že počet včas obsloužených kamionů je v dnešní době větší, než počet včas obsloužených kamionů před optimalizaci systému obsluhy v jažlovickém skladu.

Regresní analýza

Dále byla v programu Gretl (viz obrázek 32) provedena regresní analýza, a to pro zjištění závislosti obsloužených se zpožděním na dvou proměnných: na celkovém počtu přijíždějících kamionů, kde společná fronta = 0 a rozdělená fronta = 1 a zároveň na typu fronty (společná či rozdělená).




```
Model 10: Heteroskedasticity-corrected, using observations 1-60
Dependent variable: zpozdCelkem

             coefficient   std. error   t-ratio   p-value
  ---------------------------------------------------------
  const      -13.8575      10.0690       -1.376   0.1741
  celkem       0.263567     0.120188      2.193   0.0324    **
  fronta      -5.45168      0.537584    -10.14    2.24e-14  ***

Statistics based on the weighted data:

Sum squared resid    126.3128   S.E. of regression   1.488628
R-squared            0.648912   Adjusted R-squared   0.636593
F(2, 57)             52.67630   P-value(F)           1.11e-13
Log-likelihood      -107.4688   Akaike criterion     220.9377
Schwarz criterion    227.2207   Hannan-Quinn         223.3953

Statistics based on the original data:

Mean dependent var   5.766667   S.D. dependent var   3.984575
Sum squared resid    348.3880   S.E. of regression   2.472260
```

Obrázek 32. Výsledky regresní analýzy v Gretl. (Zdroj: autor)

Výsledky analýzy ukazují, že při zvýšení celkového počtu přijíždějících kamionů o 1, se počet kamionů obsloužených se zpožděním také zvýší o 0,263567. To znamená, že v případě nadprůměrného počtu kamionů, které přijedou během dne se zpožděním (například 10 vozidel – z důvodu větší objednávky kvůli sezónním výkyvům), se počet se zpožděním obsloužených vozidel zvětší přibližně o 3 kamiony.

Další hodnota -5,45168 nám říká, že při volbě rozdělené fronty se počet vozidel obsloužených se zpožděním zkrátí o 5,5 kamionů, což zase potvrzuje předpoklad, že proces obsluhy kamionů po optimalizaci je lepší.

4.2.5 Hodnocení výsledků simulací a doporučení

Po provedení simulace a ověření výsledků lze říci, že provedená optimalizace opravdu vede ke snížení celkového počtu kamionů obsloužených se zpožděním a výrazně snižuje počet zpoždění, způsobených dlouhou registrací. Avšak ani v současné době není situace úplně ideální – některé kamiony stále musí nějakou dobu čekat ve frontě. Jak ukázala regresní analýza, při zvětšení celkového počtu přijíždějících kamionů se bude snižovat počet obsloužených včas. Ve společnosti GEFCO neustále přibývají noví zákazníci, což v budoucnu může způsobit větší fronty. Možným řešením by bylo zavedení další registrační přepážky a vybavení všech vozidel GPS systémem pro zjištění a kontrolu jejich polohy.

ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zaměřila na optimalizaci distribučních tras ve společnosti GEFCO. Nejdřív jsem logistickou společnost GEFCO popsala a poté se soustředila na nejdůležitější body, především na srovnání dřívějšího a současného modelu distribuce automobilových dílů.

Následně jsem pomocí lokační analýzy, která je jednou z nejpoužívanějších metod operačního výzkumu sloužících pro řešení dopravních problémů, ověřila efektivitu aktuálního řešení o rozmístění centrálního skladu. Kromě ověření již existujícího výsledku, jsem se podívala na alternativní možnosti umístění skladů a rozpracovali několik variant pro jejich různý počet. Výsledky výpočtů byly znázorněný pomocí grafů a obrázků.

Vzhledem k tomu, že lokační analýza pro řešení úlohy, kde počet skladů je větší než jedna, je velmi náročná a pracná při manuálním výpočtu, bylo rozhodnuto o implementaci iterativního algoritmu, který umožní úlohu spočítat hned po zadání vstupních údajů. Dalším důvodem pro implementaci iterativního algoritmu v jazyce Python se stala skutečnost, že podobný algoritmus není volně dostupný, a proto nelze program pro výpočet lokačních úloh najít na internetu a následně použít. Krom toho je úloha částečně odlišná od typických úloh lokační analýzy: zaprvé se obslužná vozidla (kamiony se zbožím) nevracejí zpět po vykonání dopravní práce (po vykládce zboží na skladě), ale pokračují v jízdě dále dle vlastních přání (odjíždějí pro další libovolnou objednávku) a zadruhé proces obsluhy (distribuce automobilových dílů) nekončí ve vybraném vrcholu (při vykládce v centrálním skladě GEFCO), ale výrobky jsou následně distribuovány do dalších destinací (do příslušných PSA automobilových továren ve Francii). Právě proto, i v případě, že by nějaký program vycházející z iterativního algoritmu existoval a byl dostupný, bychom ho nedokázali použít vzhledem ke specifice popsané úlohy.

Výsledkem je funkční algoritmus, umožňující spočítat lokační úlohu pro libovolný počet vrcholů a kandidátů pro umístění depa. Po drobné úpravě kódu lze algoritmus použít i pro řešení standardních lokačních úloh, kde se vozidla po odbavení požadavků vracejí zpět do výchozího vrcholu a následující dopravní práce při přepravě do dalšího externího vrcholu není zohledněna.

Pro společnost GEFCO jsem pomocí lokační analýzy zjistila, že provedená optimalizace distribučních tras je skutečně nejlepším možným řešením a sklad v Jažlovicích je ve všech případech nejlepším kandidátem pro umístění střediska pro „cross-docking“. Jako důvod posloužilo několik faktorů: zaprvé vrchol v Jažlovicích má největší sílu vzhledem k velkému soustředění dodavatelů automobilových dílů ve spádové oblasti, zadruhé se tento vrchol nachází nejblíž k francouzským továrnám a zatřetí je tento sklad největší ze všech a nejlépe vybavený pro konsolidaci výrobků a jejich následnou distribuci.

Navíc byl před rokem v jažlovickém skladu zaveden systém časových oken, umožňující rezervaci časových slotů, čímž bylo dosaženo lepšího, efektivnějšího, a hlavně rychlejšího odbavení vozidel při nakládce a vykládce a odstranění dřívějších front. Pomocí teorie hromadné obsluhy byla ověřena efektivita nového systému. Výsledky simulace v programu HPSim potvrdily, že současná situace je lepší a počet kamionů, čekajících ve frontě na obsluhu je výrazně nižší. Avšak i tady je prostor pro zlepšení: pokud se společnost bude i nadále zvětšovat a nabízet své služby většímu počtu zákazníků, budou se při příjezdu vozidel na sklad opět vytvářet fronty. Vhodným řešením je otevření další registrační přepážky a kontrola všech přijíždějících vozidel pomocí GPS vybavení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ODBORNÝCH PRAMENŮ

[1] GEFCO ČESKÁ REPUBLIKA, S.R.O. *GEFCO 2017* [prezentace]. Interní zdroje společnosti GEFCO, 2017.

[2] FOUCHE, C. *PSA Inbound Flows. Cross-dock Eastern & Central Europe* [prezentace]. Interní zdroje společnosti GEFCO, 14.9.2015.

[3] CATALANOTTI, W.; DEJL, V.; IONITA, B.; ŠKODNÁ, V.; ZAJÍČEK, J.: *NATA DI Praha Project* [prezentace]. Interní zdroje společnosti GEFCO, 25.11.2015.

[4] PASTOR, O.; TUZAR, A. *Teorie dopravních systémů*. Praha: ASPI, 2007. ISBN 978-80-7357-285-3.

[5] BRÁZDOVÁ, M. Využití některých metod teorie grafů při řešení dopravních problémů. *Perner's contacts* [online]. 2007, č. 5. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/05_2007/Brazdova.pdf

[6] VOLEK, J.; LINDA, B. *Teorie grafů – aplikace v dopravě a veřejné správě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012. ISBN 978-80-7395-225-9.

[7] DUDORKIN, J. *Operační výzkum*. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02469-5.

[8] CLARKE, G; WRIGHT, J. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. In: *Operations research 12*, 1984.

[9] SVOBODA, V.; VOLEK, J.; MOCKOVÁ, D. *Teorie dopravy II*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02774-0.

[10] CHAROIT. Типы и габаритные размеры кузовов грузового транспорта. *Charoit.net* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://www.charoit.net/

[11] DREZNER, Z. HAMACHER, H.: *Facility Location. Applications and Theory.* New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. ISBN 3-540-21345-7.

[12] WEBER, A. *Theory of the Location of Industries*. English translation by Friedrich, C.J. Chicago: University of Chicago Press, 1929. ISBN 9333377476.

[13] WEISZFELD, E. Sur le Point Pour Lequel la Somme des Distances de n Points Donnes est Minimum. *The Tohoku Mathematical Journal*, 1936.

[14] MIEHLE, W. Link-Length Minimization In Networks. In: *Operations Research 6*, 1958.

[15] KUHN, H.; KUENNE, R. An Efficient Algorithm for the Numerical Solution of the Generalized Weber Problem in Spatial Economics. *Journal of Regional Science*, 1962.

[16] JUEL, H.; LOVE, R. A Geometrical Interpretation of the Existing Facility Solution Condition for the Weber Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 1986.

[17] COOPER, L. *Location-Allocation Problems*. In: *Operations Research 11*, 1963.

[18] DREZNER, Z.: A Note on Accelerating the Weiszfeld Procedure. In: *Location Science 3*, 1996.

[19] PYTHON. Download. *Python.org* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://www.python.org/download

[20] LUTZ, M. *Learning Python.* 5th ed. Beijing: O'Reilly, 2013. ISBN 978-1-449-35573-9.

[21] COTTRELL, Allin. Gretl. *Gretl.sourceforge.net* [online]. 2017 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://gretl.sourceforge.net/

SEZNAM OBRÁZKŮ

SEZNAM TABULEK

SEZNAM PŘÍLOH