

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Disertační práce

2010

Ing. Petr Nachtigall

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Předpoklady vývoje intermodálních přepravních systémů

Ing. Petr Nachtigall

Disertační práce

2010

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše. Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 29. 3. 2010

Ing. Petr Nachtigall

Abstrakt

Disertační práce se zabývá matematickým modelováním variabilních nákladů vybraných druhů kombinované dopravy a přímé silniční dopravy. Pomocí aplikace matematického modelu je stanoven interval přípustných vzdáleností, kde doprovázená KD dosahuje nižších variabilních nákladů než přímá silniční doprava. Disertační práce se dále zabývá vytvořením nového autorem navrženého algoritmu pro výpočet optimální rozvozní vzdálenosti. Tento výpočet je založen na principu, že silniční vozidlo je najímáno za denní fixní částku. Součástí řešení je i vývojový diagram tohoto algoritmu.

Klíčová slova: kombinovaná doprava, nově navržený algoritmus, modal split, matematické modelování nákladů

Abstract

Dissertation thesis deals with mathematical modelling of costs of chosen kinds of intermodal transport and direct road transport. Using this modelling is found a distance interval, where variable costs of accompanied transport are lower than variable costs of direct road transport. Next goal is to set up a new algorithm for calculation of optimal hauling distance. This calculation is based on principle that a subject rents a goods vehicle for a lump sum (day lump sum). A flowchart of this algorithm is also part of this solution.

Keywords: intermodal transport, new algorithm, modal split, mathematic modelling of costs

Title: The Assumptions in Development of Intermodal Transport Systems

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi jakýmkoliv způsobem pomohli při psaní mé disertační práce.

Poděkování patří celému kolektivu školícího pracoviště katedry Technologie a řízení dopravy, speciálně pak mému školiteli **doc. Ing. Jaromíru Širokému, Ph.D.**, za jeho čas a energii při tvorbě této práce.

Disertační práce by nemohla vzniknout bez spolupráce a zpětné vazby s praxí. Z těch nejvýznamnějších jsou to pan Ing. Robert Procházka ze společnosti HANGARTNER AG, paní Lillia Krutonog se společnosti ČSKD Instrans, a.s. a pan Ing. Milan Kovář ze společnosti OSNADO, spol. s.r.o.

V neposlední řadě patří poděkování mé manželce, rodičům a bratrovi, bez jejichž podpory a důvěry bych tuto disertační práci nemohl dokončit.

Obsah

Úvod.....	7
1. Analýza současného stavu poznání v oblasti kombinované dopravy	8
1.1 Analýza kombinované dopravy v České republice.....	12
1.2 Analýza kombinované dopravy v zahraničí.....	15
1.3 Závěry z analýzy současného stavu vědeckého poznání	27
2. Cíl řešeného vědeckého úkolu	28
3. Zvolené metody zkoumání.....	29
3.1 Lokačně-alokační problém	29
3.2 Vehicle routing problem	34
3.3 Shluková analýza	35
3.3.1 MacQueenova metoda <i>k</i> -průměrů (<i>k</i> -means clustering).....	36
3.3.2 Ward – Wishhartova metoda.....	37
3.4 Modelování nákladů	38
4. Obecný návrh řešení.....	40
4.1 Cena a optimální rozvozní vzdálenost	41
4.1.1 Nově navržený algoritmus pro výpočet optimální rozvozní vzdálenosti.....	45
4.1.2 Doplnění algoritmu o shlukovou analýzu	49
4.2 Vytíženost	50
4.2.1 Cena za použití železniční dopravní cesty.....	51
4.2.2 Rentabilita uceleného vlaku	53
4.2.3 Porovnání koeficientů pro jednotlivé komodity	54
4.2.4 Dílčí závěr.....	56
4.3 Teoretický základ matematického modelování nákladů.....	57
5. Aplikace návrhů v podmínkách EU, s ohledem na ČR.....	63
5.1 Aplikace nově navrženého algoritmu pro výpočet optimální rozvozní vzdálenosti – Varianta 1	63
5.3 Aplikace nově navrženého algoritmu pro výpočet optimální rozvozní vzdálenosti – Varianta 2.....	69
5.3 Porovnání obou variant.....	72
5.4 Aplikace matematického modelování nákladů	73

Závěr	79
Summary	80
Seznam použitých informačních zdrojů	82
Seznam zkratk.....	86
Seznam tabulek.....	88
Seznam obrázků.....	89
Seznam příloh	90
Publikační činnost k tématu disertační práce.....	91
Ostatní publikační činnost	93
Ostatní aktivity doktoranda	95

Úvod

V publikacích ekonomie se uvádí, že dopravní výkon je neskladovatelný. K tomuto lze připojit také fakt, že doprava je nadčasová. Lidé i věci se budou přemisťovat za jakékoli ekonomické, hospodářské a politické situace. Je proto úkolem vědeckých pracovníků, aby přicházeli na možnosti, jak zvýšit ekonomickou efektivitu dopravy, jak snížit její energetickou náročnost a jak ji provozovat šetrněji k životnímu prostředí. Veliký pokrok v těchto otázkách udělali za posledních 10 let výrobci nákladních automobilů, kteří dokázali snížit emise motorů svých vozidel o desítky procent v intencích emisních norem EURO. Úkolem dopravního technologa je především zvýšit efektivitu dopravních prostředků a zařízení tak, aby docházelo k jejich optimálnímu využívání v rámci celého logistického procesu.

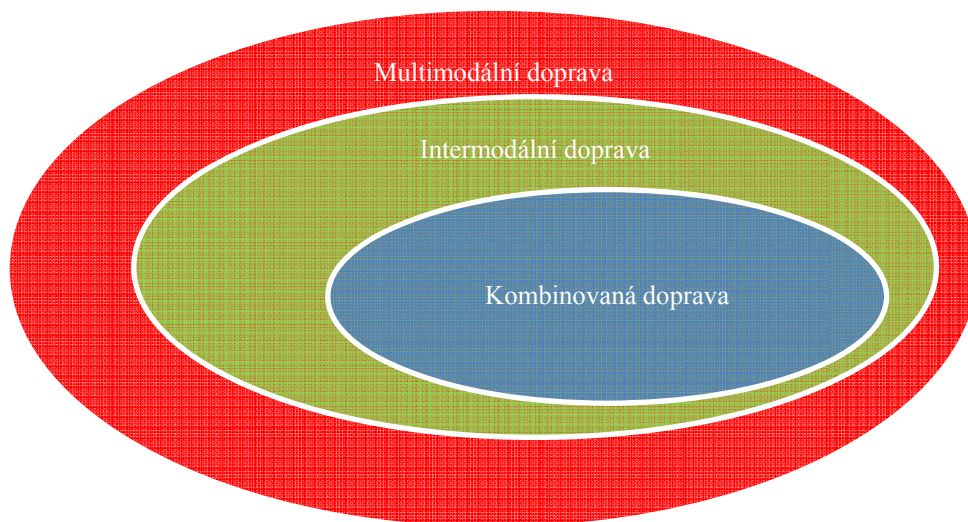
Předpoklad pozitivního vývoje kombinované dopravy (KD) spočívá v převodu zátěže z přímé silniční dopravy na KD, tedy k tzv. **modal shiftu**. Disertační práce nabídne provozovatelům silniční dopravy v podobě KD ekonomicky opodstatněnou alternativu v nahrazení části jejich trasy železniční dopravou a tím následně vytvořit systém KD. Tato inovace bude mít kromě ekonomicky vyjádřitelných efektů také ty obtížněji kvantifikovatelné, jako jsou externality v podobě snížení kongescí, emisí či dopravních nehod a v neposlední řadě také posun **modal splitu** ve prospěch KD.

1 Analýza současného stavu vědeckého poznání v oblasti kombinované dopravy

Historický vývoj kombinované dopravy (KD) sahá do 2. světové války, kdy bylo pomocí unifikovaných přepravních jednotek řešeno zásobování amerických vojsk (1). Od té doby se charakter i význam KD výrazně změnil. Nejen že začala být používána k mírovým účelům, ale stala se nedílnou součástí dodavatelsko-odběratelských řetězců. Vzhledem k tomu, že technologie KD vznikaly na různých místech světa, byla používána i nejednotná terminologie. Proto si Spojené národy daly za cíl, vytvořit vícejazyčný slovník KD (2), aby byla zajištěna terminologická jednotnost. Sestavením tohoto slovníku byla pověřena Ekonomická komise pro Evropu (ECE), Evropská konference ministrů dopravy (CEMT) a Evropská komise (EC). Slovník byl vydán v roce 2001 a základní terminologie používaná v této disertační práci vychází z tohoto dokumentu. Mezi základní pojmy v oblasti KD patří:

- multimodální doprava,
- intermodální doprava,
- kombinovaná doprava.

Pokud bychom chtěli převést závislost těchto tří pojmů do podoby matematického zápisu, byla by KD podmnožinou intermodální dopravy a ta podmnožinou multimodální dopravy tak, jak to znázorňuje schéma na obrázku 1-1. Zajímavostí ovšem je, že z hlediska dokumentu Spojených národů (2) se kombinovanou rozumí doprava, při níž je hlavní část cesty **po Evropě** vykonána železniční, vnitrozemskou vodní či námořní dopravou. Pojem KD se tedy používá zejména na Evropském kontinentu. Zbylá část světa tedy používá pouze první dva pojmy.



Zdroj: autor

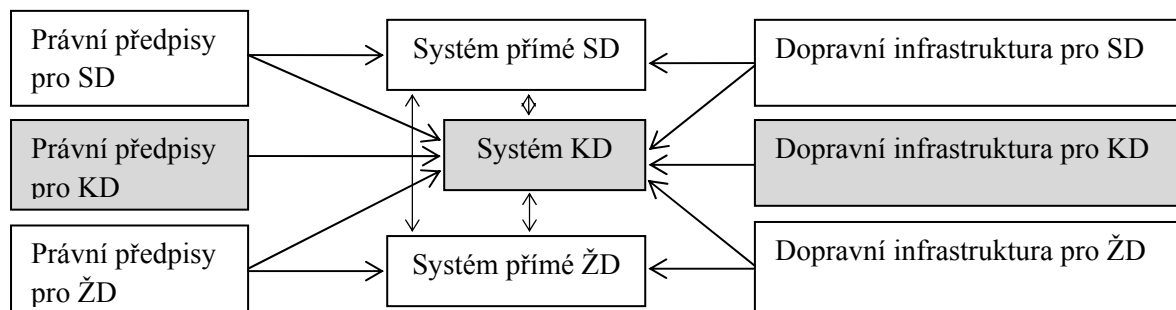
Obrázek 1-1: Schéma závislostí mezi základními pojmy

V této souvislosti uvedla Hansenová (3) do odborného povědomí nový pojem amodální doprava (amodalita). Tento pojem souvisí se vznikem dodavatelsko-odběratelských řetězců v systému „door-to-door“, kdy zákazníka zajímá pouze čas dodání a cena a je pouze na dopravci jakým způsobem (druhem dopravy či jejich kombinací) zboží z místa nakládky do místa vykládky dopraví. **Z hlediska přepravce v nákladní dopravě je tedy doprava amodálním procesem.**

V tržní ekonomice jsou pro zákazníka nejvýznamnějšími faktory pro výběr druhu dopravy (dopravce) cena, čas a spolehlivost. Každý zákazník si pak může z nabízených možností vybrat, dle jeho priorit, pro něj optimální možnost. Na tomto místě se opět nabízí pohled Hansenové (3) o amodalitě přepravního procesu z hlediska zákazníka. **Disertační práce proto není při zjišťování možností o rozvoji KD v podmínkách ČR orientována na přepravce (konečného zákazníka), ale na dopravce, kteří by v KD našli způsob jak zvýšit atraktivitu svých služeb z hlediska tří uvedených kritérií (cena, čas a spolehlivost).**

Každý subjekt, který podniká v KD, je v tržním hospodářství provázán s právními předpisy (jak evropskými, tak dané země), dopravní infrastrukturou a pochopitelně také s dalšími subjekty na trhu, ať už partnerskými či konkurenčními. Příklad takového systému s okolními vazbami je na obrázku 1-2. V tomto ohledu je z hlediska tématu disertační práce nejdůležitější jeden ze znaků podnikání dle živnostenského zákona, tedy podnikání za účelem zisku. Navíc lze říci, že snahou každého podnikatelského subjektu je

maximalizovat svůj zisk. Rozvoj intermodálních přepravních systémů je proto potřeba hledat ve snížení nákladů nebo času na přemístění či ve zvýšení spolehlivosti dodávek. Spolehlivostí se v tomto případě rozumí pravděpodobnost, že zásilka bude doručena nepoškozena, včas či na správné místo za jakýchkoli podmínek vyjma krizových stavů. Černý, Kluvánek (4) zavedli v kapitole „Abstraktný dopravný systém“ dva pojmy (D-spolehlivost a T-spolehlivost). Z jejich definic je zřejmé, že zákazník, který se rozhoduje jaký způsob dopravy či dopravce zvolí, zajímá především T-spolehlivost, tedy pravděpodobnost, že zásilka bude doručena na určené místo v daném čase. Naopak zákazníka, který již svou zásilku podal a také dopravce zajímá druhý typ spolehlivosti, tedy D-spolehlivost, což je pravděpodobnost, že zásilka bude do cílového místa doručena.



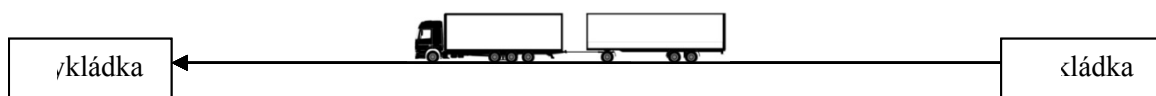
Zdroj: autor

Obrázek 1-2: Schéma vazeb mezi jednotlivými druhy dopravy a činiteli ovlivňujícími tyto druhy dopravy

Z obrázku 1-2 je patrné, že právní předpisy přímých druhů dopravy (silniční dopravy – SD a železniční dopravy – ŽD) ovlivňují také KD. Tato závislost vyplývá z toho, že pokud používáme systém KD v režimu silnice-železnice, musí být dodržovány právní předpisy obou použitých druhů dopravy. Navíc existují právní předpisy pouze pro KD. Obdobně je tomu u dopravní infrastruktury. Zde by se mezi důležité faktory přímých druhů dopravy řadila dopravní síť, kvalita a parametry dopravní infrastruktury, kapacita, či vybavení stanic. U KD by pak ještě přibýly překládací mechanismy, technické a technologické vybavení, úložná kapacita a provozní technologie terminálu KD.

Z technologického hlediska dochází při použití KD k určitému zkomplikování přepravního procesu. Do přepravního řetězce je totiž vložen další prvek, který má svou vlastní technologii (překládka, manipulace). Na druhou stranu zaváděním KD dochází k ekologizaci dopravy, protože jsou použity ekologičtější druhy dopravy. Moderní systémy

KD však musí k ekologickému hledisku přidávat také hledisko časové a ekonomické. Schéma přímé silniční dopravy je na obrázku 1-3.



Zdroj: autor

Obrázek 1-3: Schéma přímé silniční dopravy

Z obrázku 1-3 je patrné, že celková doba přepravy je v přímé silniční dopravě vyjádřena vztahem 1-1:

$$t = t_n + t_j + t_v \quad [\text{min}] \quad (1-1)$$

kde: t celková doba přepravy [min],
 t_n doba nakládky [min],
 t_j doba jízdy [min],
 t_v doba vykládky [min].

U KD pak dle obrázku 1-4 přibývají některé další časové složky, tak jak je uvedeno ve vztahu 1-2.

$$t = \sum_{i=1}^{p+1} t_{ni} + \sum_{i=1}^{p+1} t_{ji} + \sum_{i=1}^{p+1} t_{vi} + \sum_{i=1}^p t_{mi} \quad [\text{min}] \quad (1-2)$$

kde: t celková doba přepravy [min],
 t_{ni} i -tá doba nakládky [min],
 t_{ji} i -tá doba jízdy [min],
 t_{vi} i -tá doba vykládky [min],
 t_{mi} i -tá doba manipulace [min],
 p počet překládek [-].

Mezi každými dvěma časy je u vztahů 1-1 a 1-2 navíc vždy nutno počítat s možností zdržení a tím k prodloužení celkové doby přepravy. Toto zdržení může být například čekání na odjezd vlaku nebo čekání na nakládku či vykládku.



Zdroj: autor

Obrázek 1-4: Schéma KD

1.1 Analýza kombinované dopravy v České republice

Komplexní přehled českých právních předpisů, které se vztahují ke KD, podávají internetové stránky Ministerstva dopravy (5) v podsekcí KD. Zde jsou odkazy rozděleny do čtyř částí. Základní předpisy týkající se technických podmínek KD, právní úprava pro KD, základní předpisy týkající se finanční podpory KD a statistika v KD. Přehled **neobsahuje bližší určení**, které pasáže daných právních předpisů se týkají KD.

Ze základních předpisů jsou nejvýznamnější zákony č. 111/1994 Sb., o silniční dopravě, č. 266/1994 Sb., o dráhách a č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích, všechny ve znění pozdějších předpisů. Tyto zákony jsou závazné pro všechny uživatele silniční či železniční dopravy. Cílem disertační práce není tato zákonná ustanovení měnit, bude jejich ustanovení respektovat.

V oblasti právních úprav jsou to dále vyhlášky a sdělení Ministerstva zahraničních věcí, které navazují na uzavřené mezinárodní dohody, mezi které patří například **AGTC** (*Accord Européen Sur Les Grandes Lignes de Transport International Combiné et Les Installations Connexes*), Dohoda o zavedení jednotného kontejnerového dopravního systému a řada bilaterálních či multilaterálních dohod o spolupráci v mezinárodní KD.

V rámci základních předpisů týkajících se **finanční podpory KD** je tato podpora zakotvena v literatuře (6). Zde je v §12 (Sleva na dani) uvedeno, že u vozidla používaného **výlučně** k přepravě v počátečním nebo konečném úseku KD činí sleva na silniční dani podle zákona o silniční dani 100 %. U vozidel, která jsou používána, i k jiným přepravám je tato sleva vyjádřena v tabulce 1-1. Pokud je vzdálenost ujetá po území ČR delší než 250 km, započítává se tato jízda pro výpočet slevy na dani jako dvě jízdy. Nárok na tuto slevu musí být pochopitelně patřičně doložen a uplatňuje se na zdaňovací období, kterým je kalendářní rok. Výše této daně je stanovena § 6 (Sazby daně) tohoto zákona. Typické vozidlo pro dálkovou nákladní silniční dopravu tak zaplatí ročně na silniční dani cca 30 000 Kč. Z této částky lze ročně ušetřit částečným používáním v režimu KD až 90 %, tedy okolo 27 000 Kč. Tato pobídka je pro dopravce jistě zajímavá, ale vzhledem k systémům KD, které jsou na našem území provozovány, se tato sleva týká pouze malé části souprav, které jsou schopny nést kontejner ISO řady 1. **K širšímu využití této subvence by vedlo provozovat na našem území takový systém KD, který umožňuje přepravu širšího spektra silničních souprav.** Mezi takové se řadí například Ro-La či

systém ModaLohr, protože nevyžadují žádné speciální úpravy na silničním vozidle a umožňují horizontální manipulaci.

Tabulka 1-1: Sleva na silniční dani pro vozidla jezdící v režimu KD

Počet jízd	Sleva na silniční dani
31 – 60	25 %
61 – 90	50 %
91 – 120	75 %
121 a více	90 %

Zdroj: (6), autor

Další zvýhodnění KD je v literatuře (7), kde se uvádí, že omezení jízd vozidel o maximální přípustné hmotnosti převyšující 7 500 kg nebo převyšující 3 500 kg s připojeným přípojným vozidlem se nevztahuje na vozidla, která jsou využita v KD zboží po železnici nebo po vnitrozemské vodní cestě a pozemní komunikaci od zasilatele až k nejbližšímu překladišti KD nebo z nejbližšího překladiště KD k příjemci. **Také toto zvýhodnění se týká pouze úzké skupiny jízdních souprav, které jsou uzpůsobeny pro přepravu kontejnerů ISO řady 1.** Tato pobídka je nejvíce využívána firmami, které používají bezzásobové technologie.

Významnou publikaci vydal v roce 2010 Novák (8). Tato monografie komplexně popisuje stav KD na území ČR. Jsou zde uvedeny veškeré systémy KD, které jsou či byly provozovány na území ČR, dále jsou zde uvedeny terminály, překládací mechanismy a operátoři KD. Nechybí ani oblast jak národních, tak evropských právních předpisů vztahujících se ke KD. V tomto smyslu došlo pochopitelně od roku 2009 k drobným změnám například ve slevách na silniční dani pro vozidla jezdící v režimu KD (6). Celkově však dává ucelený přehled o historii a současném stavu KD v ČR. **Chybí zde však analýza životaschopnosti jednotlivých systémů či prognózy vývoje KD na území ČR,** což ovšem nebylo předmětem této publikace. **V disertační práci jsou zkoumány možnosti rozvoje intermodálních přepravních systémů včetně konkrétních návrhů rozvoje KD** na národní a evropské úrovni včetně poskytnutí možných subvencí.

Jak totiž uvádí Cempírek (9), tak důvody pro zavedení systémů KD by se měly rekrutovat z ekonomických efektů pro zákazníka a ne pouze z důvodů ekologických.

V ČR bylo v roce 2009 provozováno několik systémů KD. Jsou to přepravy:

- kontejnerů ISO řady 1,
- výměnných nástaveb a návěsů umožňujících vertikální překládku,
- odvalovacích kontejnerů ACTS (Abroll Container Transport System).

Objem přepravených kontejnerů se velmi dynamicky vyvíjí. Vývoj těchto počtů je v příloze Nováka (8), kde jsou léta 1992 – 2008. V roce 2008 to bylo dle internetových stránek největších českých operátorů kombinované dopravy (Maersk (10), ČSKD Intrans (11), Metrans (12) a Bohemiakombi (13)) až 197 vlaků za týden, což představuje více než 10 000 vlaků za rok. V roce 2005 byl tento počet cca 6 000 vlaků. **Za rok 2008 jde tedy o téměř 75% nárůst oproti roku 2005.** I z těchto čísel je vidět, že systém přepravy kontejnerů KD je v ČR na vzestupu.

Systém ACTS v ČR provozuje výhradně firma OKD Doprava, a.s. a je velmi vhodný pro přepravy „door-to-door“, protože k vyložení kontejneru ze silničního vozidla u zákazníka není zapotřebí žádné přídavné překládací zařízení. Vše je již součástí silničního vozidla. Je tak **eliminována jedna z nevýhod** většiny systémů KD, které pro nakládku, vykládku či změnu druhu dopravy potřebují **speciální mechanismy**. Nevýhodou je pak potřeba speciálních či speciálně upravených dopravních prostředků, které lze využívat pouze pro přepravy odvalovacích kontejnerů.

Nakladatelství JERID vydalo v roce 2000 pro tehdejší ČD, s.o. průvodce (14), ve kterém je zobrazen přehled železničních vozů pro KD. Jsou zde však uvedeny pouze vozy, které se používají pro KD na území ČR.

Významným aspektem v rozvoji KD je problematika externích nákladů v dopravě. Tato je řešena na národní, ale především na Evropské úrovni již řadu let. Byla o ní napsána řada odborně vědeckých článků, jako například **Říhův** (15), který na konkrétních příkladech z ČR **ukazuje složitost** této problematiky. Autor provádí jejich rozdělení na náklady infrastruktury, náklady emisí, kongescí a nehod a na tzv. ostatní náklady, které vznikají financováním opatření na podporu veřejné dopravy a omezení individuálního motorizmu z veřejných rozpočtů. Doporučuje, aby tyto náklady byly převedeny do interních nákladů uživatelů dopravy. I když od vydání tohoto článku uplynulo již osm let, není tato problematika stále uspokojivě vyřešena. Snaží se o to například Operační program EU Marco Polo, o kterém je blíže pojednáno v kapitole 1.2.

Významnou publikací je také **Pernicův** Logistický management (16). Ten se zmiňuje v kapitole „Poskytovatelé logistických služeb“ v exkurzu: Logistika a životní prostředí, o problematice externích nákladů. Stejně jako řada jiných autorů uvádí, že kvantifikovat externí náklady je velkým problémem. Oproti jiným však uvádí, že nejschůdnější cestou je **zavedení principu PPP** (*Pollutant Pays Principle*), tedy ten kdo je původce škodlivin, platí za jejich odstranění a připojuje také jednu z možností, kterou je zvýšit cenu pohonných hmot o 200 – 300 %. Dle Pernici by toto zvýšení cen vyvolalo zvýšení maloobchodního obrátu pouze o necelých 0,5 % a dalším efektem by byla redukce růstu výkonů v silniční nákladní dopravě v Evropě. Neuvádí však, jak by toto zvýšení cen pohonných hmot zapůsobilo na běžné uživatele silničního provozu, kteří jezdí na naftu a i závěry ve své knize opírá pouze o studii z Velké Británie, kde prováděli průzkum u dopravců přepravujících na dlouhé vzdálenosti. Otázkou tedy je, jak by toto zvýšení zapůsobilo na dopravce přepravující na malé a střední vzdálenosti. **Stejně tak není jasné**, jaký by to mělo vliv na ceny výrobků, protože v kalkulaci této knihy je zmínka pouze o ročním růstu obrátu a nikoli o růstu cen výrobků.

Problematikou KD v režimu silnice/železnice, tedy v kontinentálním režimu, se zabývala také úloha Grantové agentury ČR, kterou na Univerzitě Pardubice, Dopravní fakultě Jana Pernera, Katedře technologie a řízení dopravy řešil tým pod vedením Mojžíše (17). Tato úloha se zabývala tehdy, ale i v současnosti, aktuální problematikou zavádění KD. Již tehdy byla během řešení odhalena klíčová technologická témata, která postupem času nabrala na intenzitě a důležitosti. Mezi tato témata patří energetická náročnost dopravy, bezpečnost dopravy, vztah dopravy k životnímu prostředí a s tím související internalizace externích nákladů. Tyto otázky jsou již 12 let řešeny na nejrůznějších úrovních a stále se některé z nich nepodařilo uspokojivě vyřešit. **Disertační práce** proto odpoví nejen na otázku, jak zvýšit podíl KD na celkovém objemu dopravy v ČR, ale především **jak efektivně snížit podíl dopravy silniční**.

1.2 Analýza kombinované dopravy v zahraničí

Otázkami budoucnosti a konkurenceschopnosti KD se zabývala studie EU (18), která měla za úkol analyzovat nabídku a poptávku v KD, zapojení jednotlivých druhů dopravy a představit dostupné technologie pro KD a pro překládku přepravních jednotek. Studie dále u každého z uvedených systémů uvádí příklady, za jakých podmínek je možno každý ze systémů využít, aby byl životaschopný. **Neuvádí ale ekonomické srovnání**

těchto systémů s přímou silniční dopravou. Tato studie je součástí rozsáhlého dokumentu EUTP (*European Transfer Points*), kde byla oblast KD řešena týmem pod vedením Wiezorkeho v sekci ITIP (*Intermodal Technologies for Intermodal Transfer Points*). V rámci této sekce vznikla kromě studie ITIP (18) také studie IFTR (*Intermodal Freight Transport Research*) (19) pod vedením Peterliniho, která měla za úkol zanalyzovat současný stav železničních dopravních prostředků určených pro KD. Obsahuje ale pouze železniční vozy pro kombinovanou dopravu a nikoli silniční návěsy.

Dalším významným mezinárodním dokumentem, který se **dotýká oblasti řešení tématu disertační práce** je nařízení Evropského parlamentu a rady č. 561/2006 (20). Toto nařízení **stanovuje pravidla** pro doby řízení, přestávky v řízení a doby odpočinků řidičů zajišťujících silniční dopravu zboží a přepravu cestujících. Nařízení č. 561/2006 nahradilo mezinárodní dohodu AETR (*Accord Européen Relatif au Travail des Equipages des Véhicules Effectuant des Transports Internationaux Par Route*) pro ty přepravy, které se konají v rámci ES nebo mezi zeměmi ES, Švýcarskem a státy, které patří do Evropského hospodářského prostoru (EHP), tj. Norsko, Island a Lichtenštejnsko. V podobě nařízení je tento dokument velmi nepřehledný, ale Machačka vydal publikaci (21), která osvětluje problematiku tohoto nařízení v podobě **přehledného manuálu do kabiny pro řidiče**. Nařízení č. 561/2006 svým obsahem vychází z dohody AETR, ale dochází v něm k některým odlišnostem, které mohou usnadnit a také zlepšit práci řidiče. Z těch méně významných je to například možnost rozdělení přestávky v době řízení na dvě části, z nichž však první musí být v délce minimálně 15 minut a druhá pak minimálně 30 minut. Obrácené pořadí přestávek není možné. Možnost rozložit přestávky řidičů na delší časový úsek může vést k rovnoměrnějšímu rozložení silničních souprav na odpočinková stání. Častější přestávky mohou také vést ke zvýšení bezpečnosti. Pozitivní je také to, že takto rozdělenou přestávku není potřeba prodlužovat.

Daleko významnější odchylkou od původních předpisů, která může významným způsobem **zatraktivnit** KD, je možnost **přerušit řádnou denní dobu odpočinku** v případě, že řidič doprovází vozidlo přepravované na trajektu (Ro-Ro¹) či železnici

¹ Ro-Ro (Roll-on, Roll-off): způsob přepravy, kdy vozidlo horizontálně najede na vlak či loď a stejným způsobem opět z lodi či vlaku sjíždí

(Ro-La²). K tomuto přerušení může dojít nejvýše dvakrát na celkem ne více než jednu hodinu během jedné řádné denní doby odpočinku. Během takto přerušené řádné denní doby odpočinku musí být řidiči poskytnuto lůžko nebo lehátko na trajektu či ve vlaku. Zde se nabízí možnost využití doprovázené KD v ČR v režimu silnice–železnice za předpokladu, že řidiči by při jízdě vlakem **čerpali řádnou denní dobu odpočinku**. Nedošlo by tak k přerušení přepravy ani během jinak neproduktivního času. **Tato alternativa zatím není v žádné literatuře zohledněna**. Z této skutečnosti vychází **jeden z cílů disertační práce**, který má za úkol **zjistit optimální vzdálenost terminálů KD** pro nakládku a vykládku jízdních souprav. Toto optimum se nachází v intervalu mezi vzdálenostmi, která je ekonomicky nevýhodná, protože nepřeveze během čerpání denní doby odpočinku silniční vozidlo na významnou vzdálenost, a mezi vzdálenostmi, která je příliš velká, takže by doba pobytu vozidla na vlaku KD výrazně přesáhla denní dobu odpočinku. Tím nabíhá řidiči neproduktivní čas, ve kterém již mohl řídit, ale byl stále vázán na vlak KD. Je tedy potřeba precizně identifikovat a analyzovat všechny náklady obou druhů dopravy. Touto problematikou se zabývala také dvojice **Radunica&Wynter** (22), která předpokládá, že vývoj nákladů přímé silniční dopravy je lineární a vývoj nákladů KD má přibližný tvar funkce $\arctan x$. Zde ovšem autoři uvažují, že KD je využita přesně dle své definice, tedy na počátku svoz silniční dopravou, pak přeprava po železnici a následný rozvoz silniční dopravou. Je tedy opět vidět uvažování ze strany přepravce.

Disertační práce matematicky prověří možnost, jak nabídnout provozovatelům silniční dopravy, kteří tranzitují přes ČR, jak mohou pomocí železniční dopravy zkrátit čas a náklady potřebné na přejezd ČR. Zavedení KD bude tedy jakýmsi „vedlejším produktem“, který vyplyne z tržní poptávky po železniční dopravě. V takovém případě, ale nelze souhlasit s průběhem funkce nákladů KD ve tvaru $\arctan x$. V disertační práci autor **zkoumá průběh těchto nákladů**. Je předpokládána možnost abstrahovat průběh těchto nákladů na tvar kvadratické funkce. Obecně můžeme říci, že náklady přímé silniční dopravy jsou dány vztahem 1-3.

$$y_1 = ax + b \tag{1-3}$$

² Ro-La (Rollende Landstraße): systém pro doprovázenou KD, kdy silniční souprava najede na speciální železniční vůz, kde jej řidič řádně zajistí. Po dobu přepravy je řidiči poskytnuto místo v lehátkovém či lůžkovém voze, který je součástí soupravy vlaku. Po příjezdu do cílové stanice může řidič ihned po sjetí z železničního vozu pokračovat v cestě.

Náklady KD jsou očekávány ve tvaru vztahu 1-4:

$$y_2 = cx^2 + dx + e \quad (1-4)$$

kde x je vzdálenost mezi uvažovanými změnami druhů dopravy ujetá v případě vztahu 1-3 po silnici a v případě vztahu 1-4 po železnici. Tyto dvě rovnice mohou mít obecně dva, jeden nebo žádný společný bod. Aby celý systém fungoval a byl pro provozovatele silniční dopravy výhodný, je potřeba, aby tyto nákladové funkce měly dva společné body. Dále předpokládáme, že fixní náklady přímé silniční dopravy jsou v místě změny druhu dopravy rovny nule, tedy $b = 0$. Tato lineární funkce bude mít kladnou směrnici, tedy $a > 0$. Naproti tomu je zřejmé, že budou existovat fixní náklady KD, tedy $e > 0$. Poslední zřejmou skutečností je, že kvadratická funkce bude konvexní, tedy $c > 0$. Tímto dojde ke zjednodušení funkce y_1 na vztah 1-5:

$$y_1 = ax \quad (1-5)$$

Za předpokladu, že oba vztahy 1-3 a 1-4 mají dva společné body, bude optimální vzdálenost umístění terminálů KD ležet tam, kde $f(y_2) < f(y_1)$.

Průsečík těchto dvou rovnic určí také krajní body intervalu, ve kterém se bude nacházet optimální vzdálenost. Tento interval bude dán vztahem 1-6:

$$x_{opt} \in \left\langle \frac{-(d-a) - \sqrt{(d-a)^2 - 4ce}}{2c}; \frac{-(d-a) + \sqrt{(d-a)^2 - 4ce}}{2c} \right\rangle \text{ [km]} \quad (1-6)$$

Pak optimální vzdálenost se bude nacházet v bodě, kde je maximalizován rozdíl funkčních hodnot mezi y_1 a y_2 podle vztahu 1-7:

$$x_{opt} = \max (f(y_1) - f(y_2)) \quad \text{[km]} \quad (1-7)$$

Maxima bude dosaženo v bodě, kde **první derivace funkce** se rovná nule (dle vztahů 1-8 a 1-9).

$$y_3 = y_1 - y_2 \quad \text{[km]} \quad (1-8)$$

$$\frac{dy_3}{dx} = 0 \quad \text{[km]} \quad (1-9)$$

Po dosazení do vztahu 1-9 bude hodnota x_{opt} dána vztahem 1-10:

$$x_{opt} = \frac{a - d}{2c} \quad [\text{km}] \quad (1-10)$$

V aplikační části disertační práce jsou tyto koeficienty funkcí 1-4 a 1-5 podrobeny dalšímu zkoumání, aby mohla být následně vypočtena optimální vzdálenost x_{opt} .

Již v Evropské dopravní politice (23), která je jednou z Bílých knih, tedy jedním ze základních dokumentů EU, je pevně zakotvena podpora KD. Tato podpora byla v minulosti uskutečňována pomocí operačního programu PACT (*Pilot Action for Combinied Transport*), který byl v roce 2001 nahrazen operačním programem Marco Polo, který probíhal v letech 2001 – 2006. V roce 2008 byly přijímány projekty do jeho nové podoby pod názvem Marco Polo II (24), která má svou operační dobu od roku 2007 do roku 2013. Posláním tohoto programu je podpora KD finančními dotacemi pro společnosti nebo uskupení společností, které požádají o dotaci v jedné ze tří oblastí. Těmito oblastmi jsou:

- **Modal shift action** – převedení přeprav ze silniční dopravy na dopravu železniční či vodní. Tento způsob je využíván nejčastěji,
- **Catalyst action** – použití vysoce inovativního přístupu nebo průlom bariér na Evropském dopravním trhu. Tento způsob je naopak nejméně využíván,
- **Motorways of the sea** – převedení silničních přeprav na dlouhé vzdálenosti na vodní dopravu (příbřežní námořní či po vnitrozemských vodních cestách) a svoz a rozvoz do přístavu je pak zajištěn silniční či železniční dopravou.

Dotace lze čerpat až po dobu 3 let. Pro rok 2008 byla v tomto programu celkem k dispozici částka 59 mil. €, která bude rozdělena mezi až 35 projektů. Minimální dotace je 500 000 €, což odpovídá převodu 250 mil. tkm ze silnice na železnici. Celková dotace do tohoto programu za roky 2007 – 2013 je předpokládána ve výši 400 mil. €. Součástí hodnocení programu Marco Polo byla i informace, že každé 1 € dotace v tomto projektu vyvolalo účinek 6 € v oblasti životního prostředí a doprovodných služeb. V roce 2006 byl v rámci Marca Pola podpořen například **projekt Lorry Rail** (25), který provozuje z Luxemburgu do Perpignanu systém nedoprovázené KD Moda-Lohr. Operační program **Marco Polo II** také řeší problematiku **internalizace externích nákladů** dopravy, zatím

však pouze formou vyjádření externích nákladů v €·tkm⁻¹ či v €·VEU³⁾, kdy je po výpočtu objemu převedených tkm přidělena dotace na konkrétní projekt. Tyto částky byly stanoveny pro každý druh dopravy. Výše těchto nákladů je uvedena v tabulce 1-2. Tímto tak dochází k **částečnému naplnění jednoho ze závěrů Bílé knihy (26)**, které ve svém článku sumarizoval Mojžíš (27). **Naplnění není úplné**, protože sice došlo k finančnímu vyjádření externích nákladů, ale **nebyla naplněna druhá část** tohoto bodu, tedy **internalizovat environmentální náklady** do infrastrukturních poplatků. Dokud nebudou tyto náklady vypočteny, bude jednodušší dotovat KD než nepodloženě nastavovat poplatky externích nákladů pro jednotlivé druhy dopravy. Zpoplatnění dopravní infrastruktury je navíc plně v kompetenci vlád jednotlivých států a bylo by velmi obtížné nalézt jednotnou taxu pro celou EU.

Tabulka 1-2: Externí náklady v dopravě

Druh dopravy	Externí náklady [€·tkm ⁻¹ , €·VEU ⁻¹]
Silniční	0,035
Železniční	0,015
Vnitrozemská vodní doprava (IWW ⁴⁾)	0,010
Příbřežní námořní plavba (SSS ⁵⁾)	0,009

Zdroj: (24), autor

Program Marco Polo by se dal využít pro podporu KD na území ČR. Finance z EU by mohly sloužit jako dotace do KD, kterými by se snižovala ekonomická náročnost železniční dopravy oproti dopravě silniční. Otázkou zůstává, jak by byl tento systém konkurenceschopný po skončení dotačního období z EU. Pak by muselo následovat buď zvýšení ceny nebo jiná dotace ať už státní nebo z EU. **Mnohem akceschopnější** se tak jeví model, kdy by **KD byla finančně konkurenceschopná** v porovnání se silniční dopravou a dotace z EU by sloužila pouze k zaplacení **vstupních investic** (dopravní infrastruktura, terminál, informační systém, apod.).

Další zahraniční publikací, která byla vydána na téma KD, je kniha autorského kolektivu vedeného Voleským (28). Tato kniha je navíc obohacena o problematiku uložení

³⁾ VEU: Volume equivalent unit – m³km, 1 tkm = 4 m³km

⁴⁾ IWW: Inland Waterway Shipping – plavba po vnitrozemských vodních cestách

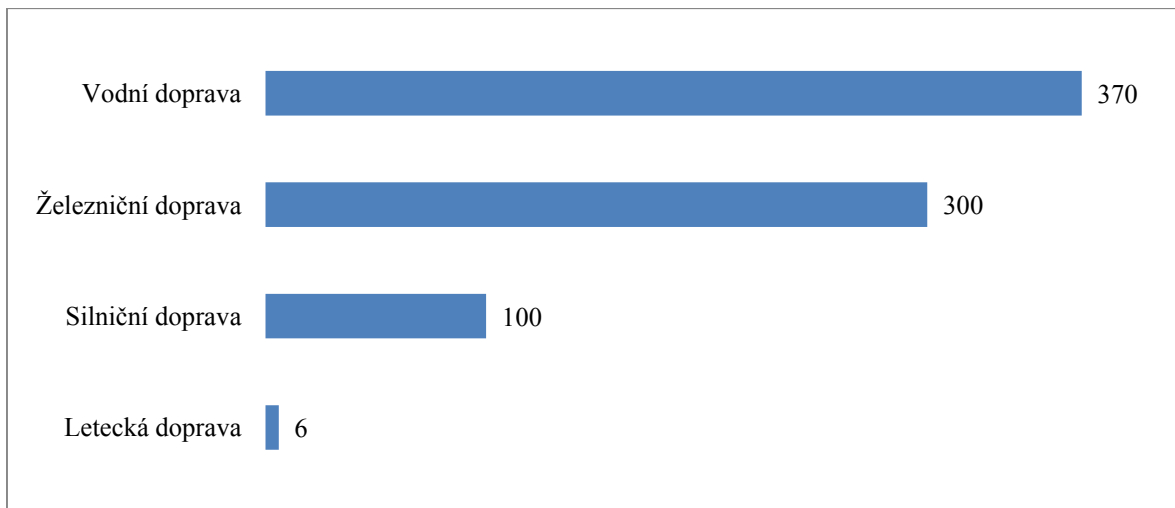
⁵⁾ SSS: Short Sea Shipping – námořní plavba na krátké vzdálenosti

nákladu v přepravní jednotce, jakož i uložení samotné přepravní jednotky na železničním vozu. V jedné z kapitol je velice zajímavý výpočet při jakém využití portálového jeřábu se vyplatí vytvořit vnitřní okruh tahačů na překladišti. Tento výpočet vychází z úpravy **Chinčín-Pollatzekovy formule** 1-11 a jejím převodem na kvadratickou rovnici. Řešením je pak kladný kořen této rovnice.

$$\bar{\gamma} = \frac{\lambda \cdot (\tau^2 + \sigma^2)}{2 \cdot (1 - \lambda \cdot \tau)} \quad [\text{min}] \quad (1-11)$$

kde: $\bar{\gamma}$ střední čas prostoje připadající na jeden požadavek čekající ve frontě [min],
 λ střední počet požadavků vstupujících do systému za jednotku času [počet],
 τ střední doba obsluhy [min],
 σ^2 rozptyl doby manipulace [min].

Nevýhodou tohoto výpočtu je, že se dá použít pouze pro nedoprovázené přepravy, protože je určen pro portálové jeřáby a vykládku kontejnerových lodí. Otázka potřeby ekologizace dopravy, podle Bílé knihy (26), je znázorněna na obrázku 1-5, který ukazuje, vzdálenost na jakou lze přepravit 1 tunu zboží při stejné spotřebě energie různými druhy dopravy. Je z něj patrné, že vodní a železniční doprava je 3 krát resp. 3,7 krát méně náročná na spotřebu energie. Obrázek 1-5 také podporuje celoevropskou myšlenku převádění přímých silničních přeprav na systémy KD. Od doby vydání této knihy (1995) se sice výrazně snížily například hodnoty emisí, které produkují nákladní vozidla, rozdíl mezi EURO I a EURO IV je cca 10 g·kWh⁻¹, ale energetická náročnost neklesá. V době zvyšování cen pohonných hmot pocházejících z neobnovitelných zdrojů se stává KD stále více ekonomicky zajímavou alternativou přímé silniční dopravy. Podpořena subvencemi EU je pak přímé silniční dopravě konkurenceschopná. Tato publikace (28) **neřeší problematiku** zavádění nových systémů KD ani **neposkytuje návod** k ekonomické kalkulaci zavedení nových systémů. Pro ekonomickou analýzu jsou v této knize důležité pasáže o podmínkách, za jakých může být projekt zavedení linky KD úspěšný. Mezi ty nejvýznamnější patří existence potenciálních zdrojů zásilek pro zásobení linky KD, dále pak kalkulace nákladů na přepravní jednotku v KD, která musí být nižší než u přímé silniční nákladní dopravy.

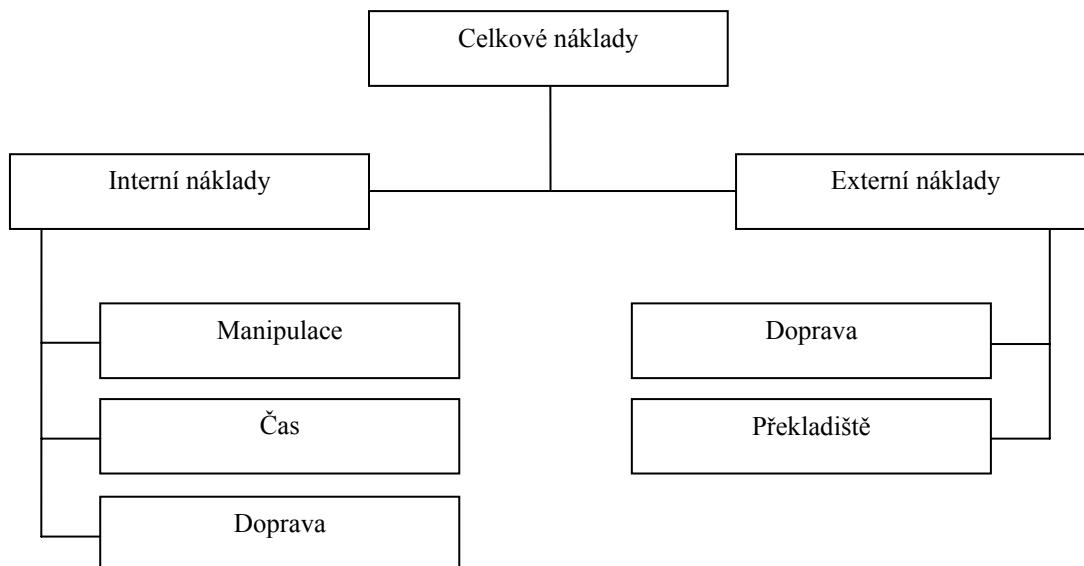


Zdroj: (28), autor

Obrázek 1-5: Grafické znázornění porovnání jednotlivých druhů dopravy z hlediska přepravní vzdálenosti 1 tuny zboží při stejné spotřebě energie [km]

Voleský (28) se svým kolektivem také vypočítal **mezní přepravní vzdálenost** pro použití přímé silniční dopravy, KD, železniční dopravy a kontejnerového systému. Tato kalkulace však opět počítá s využitím KD v režimu “door-to-door“, tedy z pohledu odesilatele. V disertační práci je tento pohled nahrazen pohledem dopravce, jehož cílem je pomocí KD ušetřit čas a peníze a zvýšit spolehlivost svých přeprav, to bude mít ve svém důsledku pozitivní efekt také na zákazníka. Voleského výpočet používá modelovou soupravu o hmotnosti 40 tun a se 4 nápravami. Z tohoto pohledu bylo vhodnější v disertační práci zvolit, jako referenční, vozidlo o stejné hmotnosti, ale s 5 nápravami. Takové vozidlo lépe koresponduje s vozidly, která jsou používána pro silniční dálkovou nákladní dopravu.

Otázkou úplných nákladů KD a přímé silniční dopravy se zabýval také Janic (29), který ve svém příspěvku matematicky porovnává náklady kombinované a přímé silniční dopravy. Rozdělení nákladů pro oba druhy dopravy je na obrázku 1-6.



Zdroj: (29), autor

Obrázek 1-6: Schéma rozdělení nákladů v dopravě

Součástí **interních** nákladů je **manipulace** se zbožím (ať už v terminálu či na místě nakládky/vykládky), náklady **času**, který stráví zásilka v terminálech a náklady na vlastní **dopravu** nákladu. **Externí** náklady lze pak uvažovat při **dopravě** a také při **manipulacích** v terminálech. **Chybí zde konkrétní výpočty těchto nákladů.** Dalším významným přínosem tohoto článku pro disertační práci je sestavení grafu mezní přepravní vzdálenosti při měnícím se počtu vlaků KD týdně. Tato mezní přepravní vzdálenost se při pěti vlacích týdně pohybuje kolem 1000 km. U počtu 10 resp. 20 vlaků je to 800 resp. 675 km. Hodnota mezní přepravní vzdálenosti se tedy limitně blíží hodnotě l . Vztah mezi počtem vlaků KD týdně a mezní přepravní vzdáleností je uveden ve vztahu 1-12. Tato hodnota se blíží vzdálenosti 600 km při $0,046 \text{ €} \cdot \text{tkm}^{-1}$.

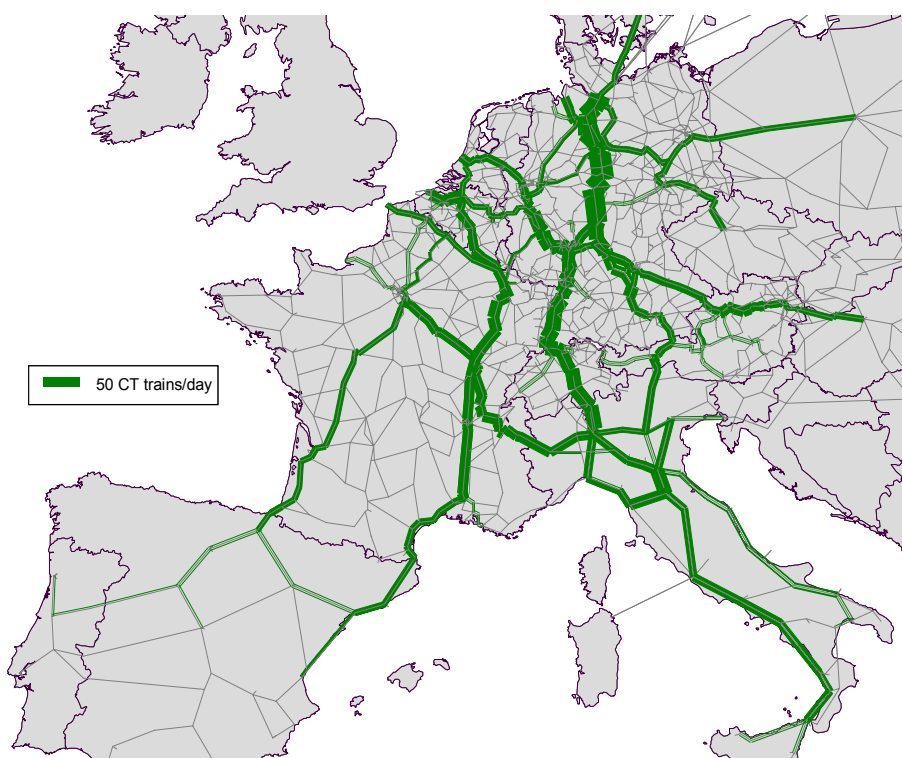
$$l = \lim_{n \rightarrow \infty} f(n) \quad [\text{km}] \quad (1-12)$$

kde: l mezní přepravní vzdálenost [km],
 n počet vlaků KD týdně [počet].

Vzhledem k velikosti ČR je tato hodnota v našich podmínkách dosažitelná a reálná. **Janic**, ale vzhledem k charakteru výpočtů **uvažuje při svých výpočtech** systém KD, který vyžaduje v terminálech manipulaci pomocí speciálních překládacích mechanismů. **V kapitole 3.4 této disertační práce jsou tyto náklady identifikovány pro další systémy KD, které nejsou tak náročné na dobu manipulace a na přítomnost speciálních překládacích mechanismů.** Tím dojde k dalšímu snížení nákladů KD. K dalšímu snížení

těchto nákladů pak mohou sloužit státní subvence (sleva na dani, výjimky ze zákazů jízdy) či podpora EU (Marco Polo II).

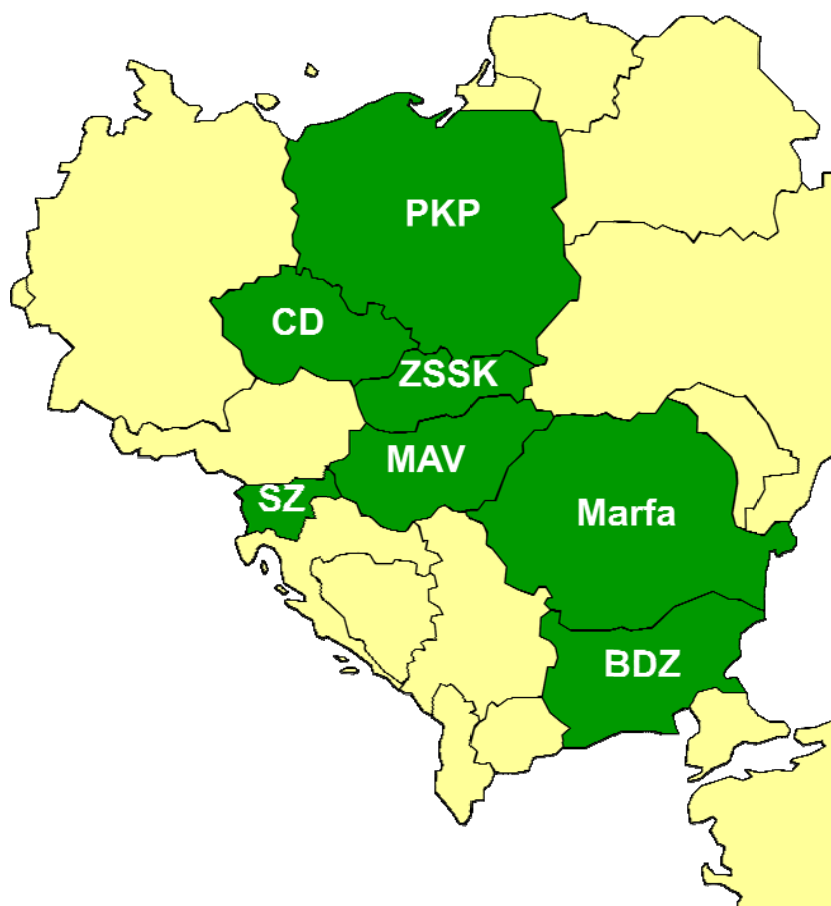
Nejnovějšími dokumenty, které byly v souvislosti s tématem disertační práce vydány, jsou zprávy a závěry z projektů DIOMIS I a II (*Developing Infrastructure & Operating Models for Intermodal Transport*) (30), které vydává UIC (*L'Union internationale des chemins de fer*). Průvodním posláním projektu DIOMIS I bylo to, aby do roku 2015 došlo ke **zdvojnásobení** objemu zboží přepraveného KD. Tento nárůst byl očekáván jak v mezinárodní, tak i ve vnitrostátní dopravě. Chybí zde však jakékoli srovnání s ostatními druhy doprav ve směru vývoje jejich objemů přepraveného zboží. Z tohoto dokumentu **není jasné, zda se změní** ve prospěch KD také **modal split**. Během řešení projektu DIOMIS I, který byl zaměřen na země západní Evropy včetně ČR, se ukázalo, že pokud dojde k uvažovaným nárůstům KD, nebudou na některých místech dostatečné kapacity železničních tratí. V ČR je to například otázka I. tranzitního koridoru. To evokovalo vznik projektu DIOMIS II (30), který rozšířil pole působnosti o země východní a jihovýchodní Evropy.



Zdroj: (31)

Obrázek 1-7: Mapa počtu vlaků KD v Evropě za den

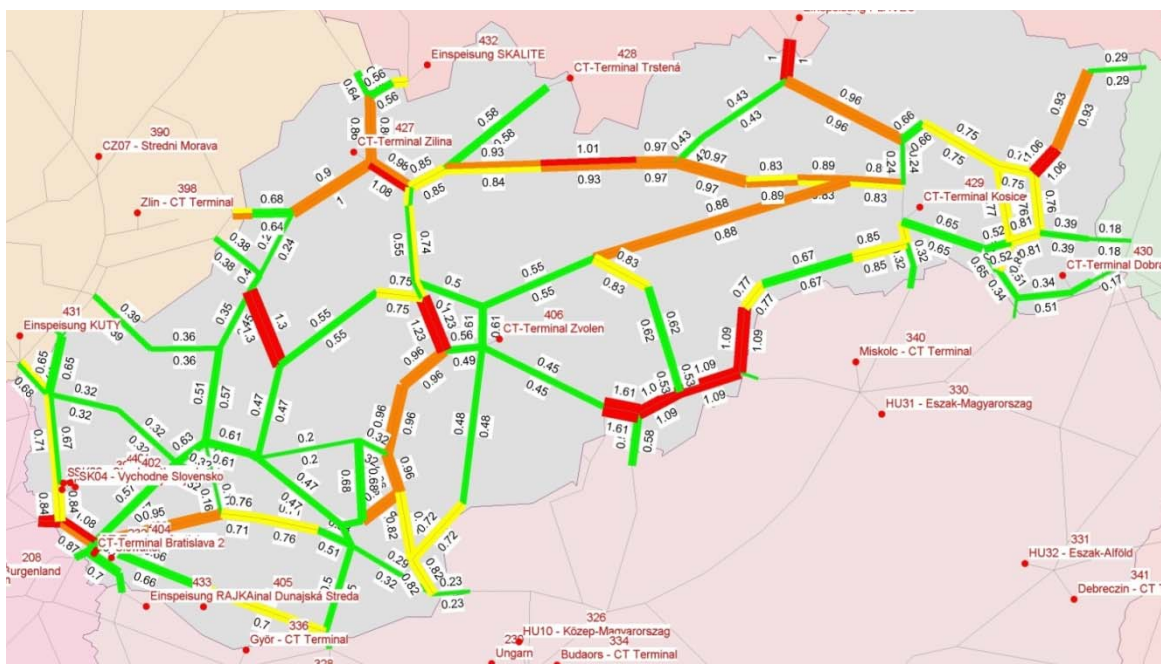
Z obrázku 1-7 je patrné, že počty vlaků KD v Západní Evropě jsou daleko vyšší než v Evropě Střední a Jihovýchodní. Oblasti ČR se týká modul 3 projektu DIOMIS II. Celá oblast modulu 3 je na obrázku 1-8.



Zdroj: (31)

Obrázek 1-8: Oblast řešení projektu DIOMIS II modulu 3

Také u těchto zemí se ale potvrzuje, že zásadní nárůst KD je limitován kapacitními možnostmi železnice. Například na Slovensku jsou to oblasti kolem Bratislavy, tah na Zwardoň, případně oblast jihovýchodního Slovenska. Tyto kapacitní problémy jsou patrné z obrázku 1-9. Dalšími cíli projektu DIOMIS II jsou např. převést teoretická řešení z DIOMIS I do konkrétních projektů pro praxi, integrovat strategie a koncepce provozovatelů KD do tohoto projektu, rozšířit povědomí o KD v zemích Střední a Východní Evropy. Do řešení projektů DIOMIS I resp. II bohužel zasáhla také celosvětová ekonomická krize, která oddálí plnění jejich cílů v nárůstu KD. Nicméně odborníci v oblasti KD (např. Ing. Kinzle, prof. Cempírek) se shodují, že i přes krizi je potřeba investovat do rozvoje KD.



Zdroj: (31)

Obrázek 1-9: Mapa využití kapacity železniční sítě na Slovensku v roce 2008

Autor disertační práce hledá v návrhové a aplikační části cestu, jak převést přepravu ze silnice na železnici za vzniku systému KD. **Nebude v ní tedy řešen pouze nárůst absolutních objemů KD, ale především změna modal splitu ve prospěch KD.** Užitečnou informací je také uvedený fakt, že zlepšením vytěžování vlaků KD o 10 %, lze dosáhnout až 15% úspory tras těchto vlaků.

Na jaře 2010 byl přijat projekt, který bude řešen při EU s názvem FLAVIA (Freight and Logistics Advancement in Central/South-East Europe - Validation of trade and transport processes, Implementation of improvement actions, Application of co-ordinated structures). Cílem projektu je analýza úzkých míst v dopravním spojení mezi severoněmeckými přístavy a oblastí u Černého moře s návazností na Blízký Východ a podpora vzniku systémů KD v této oblasti. Nezastupitelnou roli v tomto projektu bude hrát také železniční doprava, resp. KD a vodní doprava. Projekt je dále orientován na vytváření možností zvýšení objemů KD namísto výstavby nové infrastruktury. Na tomto projektu, participuje také Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra Technologie a řízení dopravy pod vedením prof. Cempírka. Aktuálnost tématu disertační práce je podpořena mimo jiné tím, že myšlenky a návrhy, které jsou uvedeny v disertační práci, korespondují s cíli tohoto projektu.

1.3 Závěr z analýzy současného stavu vědeckého poznání

Z prostudovaných informačních zdrojů je patrné, že význam KD roste. K tomuto rozvoji přispívá nejen dotační politika EU a ČR, ale také specifické vlastnosti KD.

Z analýzy vyplynulo, že problematikou KD se zabývá řada konkrétních autorů. Bylo zjištěno, že existuje mnoho příspěvků a projektů o zavádění systémů KD v režimu „door-to-door“. **Chybí zde však pohled na zavádění těchto systémů z pohledu provozovatele silniční dopravy, který by použitím „vložené“ železniční dopravy ušetřil finanční prostředky a čas, čímž by došlo k zavedení systému KD. Z toho vyplývá potřeba, vytvořit matematický model takového systému, který by dokázal ekonomicky motivovat dopravce k jejich využívání při měnící se přepravní vzdálenosti.**

Existuje také řada publikací, které pomocí algoritmů operační analýzy řeší optimální umístění depa na síti. **Tyto algoritmy budou popsány a modifikovány pro použití v KD z hlediska přepravce. Tedy před vlastní algoritmus lokačně-alokačního problému bude vložen nově navržený algoritmus pro určení optimální rozvozní vzdálenosti podpořený shlukovou analýzou.**

Stále se také nepodařilo vyčíslit externí náklady jednotlivých druhů dopravy. Tato problematika je zatím suplována finančními subvencemi do KD. Úkolem KD budoucnosti je odlehčit přetížené silniční síti a nabídnout dopravcům ekonomičtější, spolehlivější a ekologičtější způsob přemístění jejich zásilek po našem území s přihlédnutím k tomu, že kapacity železniční dopravní cesty také nejsou nevyčerpatelné.

2 Cíl řešeného vědeckého úkolu

V analytické části byly odhaleny nedostatky a neúplně řešené i neřešené problémy v oblasti zavádění systémů KD, ze kterých vyplynuly následující cíle disertační práce.

Hlavním cílem disertační práce je vytvořit nový algoritmus pro určení optimální rozvozní vzdálenosti, včetně vývojového diagramu tohoto algoritmu. Hlavní cíl bude dále doplněn o shlukovou analýzu, která umožní vytvoření předem definovaného počtu intervalů v závislosti na délce manipulačních prací.

Druhý cíl je založen na hypotéze, že doprovázená KD může dosáhnout nižších variabilních nákladů než přímá silniční doprava. Pro její potvrzení či vyvrácení bude navržen matematický model maximalizace finanční úspory při měnící se přepravní vzdálenosti. Jednou z podmínek optimálního umístění koncových terminálů bude vzdálenost těchto terminálů. Ta bude vycházet z navrženého matematického modelu maximalizace finanční úspory při měnící se délce linky KD. Hledání této vzdálenosti bude předmětem matematického modelu, který bude maximalizovat finanční úsporu při měnící se délce linky KD.

Na základě těchto dvou cílů, budou autorem disertační práce vytvořena schémata rozhodovacích procesů a kritérií, za jakých podmínek zavést linku KD.

3 Zvolené metody zkoumání

Autor disertační práce zmiňuje, případně přímo používá celou řadou běžně používaných metod operačního výzkumu a matematické statistiky. Uvádí známé a již používané metody, včetně jejich významu pro naplnění cílů disertační práce. Studium těchto metod také poskytlo autorovi četné podněty pro vlastní řešení. K tomu ale bylo potřeba některé metody modifikovat, případně vytvořit nové. Tato tvůrčí část je v kapitole 4.

Mezi metody využitě při řešení disertační práce patří **lokačně-alokační problém**, soubor metod souhrnně označovaný jako **vehicle routing problem (VRP)** a **shluková analýza**.

3.1 Lokačně-alokační problém (32)

Lokačně-alokační úloha se v praxi vyskytuje velmi často. Řeší se pomocí ní případy, kdy na zadané dopravní síti obsluhujeme vrcholy z více dep. Při tom vzniká problém, kam umístit depa na síti tak, aby obsluha vrcholů probíhala co nejefektivněji (tedy s nejmenšími náklady, případně v nejkratším čase).

Název těchto úloh se skládá ze dvou slov, které charakterizují jejich použití. Lokační, tedy rozmisťovací a alokační, tedy rajonizační úlohy. Úkolem lokační úlohy je rozmístit daný počet dep na dopravní síti tak, aby byla splněna příslušná podmínka. Úkolem alokační úlohy je stanovit atrakční (obslužné) obvody jednotlivých dep. Velmi vysoká korelace těchto dvou úloh vedla k tomu, že se v současné literatuře objevují právě pod označením lokačně-alokační úlohy.

Řešení těchto úloh vyžaduje splnění určitých předpokladů:

- dopravní síť je hranově (délka jednotlivých komunikací) a vrcholově (počet obsluh vrcholu v daném období) ohodnocená,
- depo může být umístěno pouze ve vrcholu,
- počet dep bude vždy dopředu známé přirozené číslo menší než počet vrcholů sítě n ,
- všechna depa mají stejné provozní parametry, jsou tedy vzájemně zastupitelná,
- obsluhou uzlu rozumíme kyvadlovou jízdu typu depo – vrchol – depo,
- počet obsluh v jednotlivých vrcholech nebude v průběhu výpočtu měněn,

- kapacita dep je dostatečná pro provedení obsluhy.

Pro jejich řešení jsou definovány zvláštní pojmy a matematický aparát. Tyto pojmy jsou definovány takto:

Atrakční obvod $A(u_j)$ depa umístěného ve vrcholu $u_j \in D_k$ je množina vrcholů sítě, pro které platí: uzel $u_i \in A(u_j)$ tehdy, neexistuje-li středisko $u_l \in D_k$ takové, pro které by platilo $d(u_l, u_i) < d(u_j, u_i)$. Vrchol u_i náleží do atrakčního obvodu depa v uzlu u_j právě tehdy, když neexistuje žádné jiné středisko umístěné v uzlu u_l , ze kterého by bylo do uzlu u_i blíže.

Primární atrakční obvod $A'(u_j)$ depa umístěného ve vrcholu $u_j \in D_k$ je množina vrcholů sítě, pro které platí: uzel $u_i \in A'(u_j)$ tehdy, neexistuje-li středisko $u_l \in D_k$ takové, pro které by platilo $d(u_l, u_i) \leq d(u_j, u_i)$. Vrchol u_i náleží do atrakčního obvodu depa v uzlu u_j právě tehdy, když neexistuje žádné jiné středisko umístěné v uzlu u_l , ze kterého by bylo do uzlu u_i blíže, resp. které by se nacházelo ve stejné vzdálenosti jako depo u_j .

Přidělený atrakční obvod $A''(u_j)$ depa umístěného ve vrcholu $u_j \in D_k$ je množina vrcholů sítě, pro které platí:

- $A'(u_j) \subseteq A''(u_j) \subseteq A(u_j)$ pro každé depo u_j z množiny dep D_k ,
- $\bigcup_{u_j \in D_k} A''(u_j) = U$, kde U je množina všech vrcholů sítě,
- $A''(u_j) \cap A''(u_l) = \{ \}$ pro každou dvojici různých dep $u_j, u_l \in D_k$.

Dopravní práce - udává objem přepravy, kterou je nutné vykonat při obsluze vrcholu $v \in V$ resp. hrany $h \in X$ obsluhované z depa $v \in D_k$. Při výpočtu dopravní práce vycházíme z úvahy, ve které se obsluhovací vozidlo musí přemístit z depa do obsluhovaného místa a po obsluze se opět po téže nejkratší cestě vrátí do depa. Projetou vzdálenost násobíme vahou obsluhovaného vrcholu resp. hrany.

Excentricita (výstřednost) vrcholu v - $e(v)$ je číslo, které udává maximum ze vzdáleností vrcholu $v \in V$ k vrcholu $u \in V$ v síti $G = (V, X)$ a je dána vztahem 3-1.

$$e(v) = \max_{u \in V} \{d(u, v)\} \quad [-] \quad (3-1)$$

Vážená excentricita vrcholu v - $ec(v)$ - udává maximum ze vzdáleností vrcholu $v \in V$ k vrcholu $u \in V$ v síti $G = (V, X)$ váženou (násobenou) ohodnocením vrcholu u a je dána vztahem 3-2.

$$ec(v) = \max_{u \in V} \{d(u, v) \times w(u)\} \quad [-] \quad (3-2)$$

kde $w(u)$ je váha vrcholu $u \in V$.

Vzdálenostně optimální umístění depa na síti $G = (V, X)$ - nazýváme vrchol $v^* \in V$, ve kterém je hodnota vážené excentricity vrcholu $v \in V$ minimální. Toto minimum se vypočítá podle vztahu 3-3.

$$ec(v) = \max_{u \in V} \{d(u, v) \times w(u)\} \quad [-] \quad (3-3)$$

Vážená excentricita bodu y hrany (v_i, v_j) - je definována jako maximum ze vzdáleností bodu y k vrcholu $u \in V$ v síti $G = (V, X)$ váženou ohodnocením vrcholu u tzn.:

$$ec(y) = \max_{u \in V} \{d(u, v) \times w(u)\} \\ \text{kde } d(y, u) = \min_{u \in V} \{[e(v_i, y) + d(v_i, u)], [e(v_j, y) + d(v_j, u)]\} \\ c_{ij} = e(v_i, y) + e(v_j, y) \quad [-] \quad (3-4)$$

Absolutní depo (úplné depo) - je bod $y^* \in G$, který je úplně vzdálenostně optimálním umístěním depa na síti a pro tento bod platí, že vážená excentricita bodu y hrany (v_i, v_j) je minimální a je dána vztahem 3-5.

$$ec(y^*) = \min_{y \in G} \{ec(y)\} \quad [-] \quad (3-5)$$

Hakimiho věta - pro libovolnou množinu bodů Y_k sítě $G = (V, X)$ jsou funkce $f(Y_k)$, $g(Y_k)$ definovány stejně jako $f(D_k)$, $g(D_k)$. Potom existuje alespoň jedna množina k vrcholů D_k sítě $G = (V, X)$, pro kterou je hodnota funkce $f(D_k)$ resp. $g(D_k)$ menší nebo shodná s hodnotou funkce $f(Y_k)$ resp. $g(Y_k)$ pro množinu bodů. Platí tedy, že $f(D_k) \leq f(Y_k)$, resp. $g(D_k) \leq g(Y_k)$.

Vážená excentricita množiny dep D_k – jestliže v síti $G = (V, X)$ určíme množinu $D_k \subset V$, vážená excentricita této množiny je dána vztahem 3-6.

$$ec(D_k) = \max_{v \in V} \{w(v) \times d(D_k, v)\} \quad [-] \quad (3-6)$$

$$kde \quad d(D_k, v) = \min_{v_i \in D_k} \{d(v_i, v)\}$$

Vzdálenostně optimální umístění k dep na síti – je množina vrcholů $D_k^* \subset V$, pro kterou platí vztah 3-7.

$$ec(D_k^*) = \min_{D_k \subset V} \{ec(D_k)\} \quad [-] \quad (3-7)$$

kde D_k jsou všechny k prvkové podmnožiny množiny V .

Vzdálenost vrcholu v k hraně h – je $d(v, h) = \min \{d(v, r), d(v, s)\}$, kde incidence hrany $h \in X$ je $p(h) = (r, s)$.

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

Takto jsou definovány základní pojmy. Další potřebnou definicí je definice optimalizačního kritéria. Optimalizačním kritériem při obsluze vrcholů sítě s k depy bude dopravní práce $f(D_k)$. Pokud ohodnocení $w(u_i)$ vrcholu u_i vyjadřuje počet obsluh vrcholu u_i z depa umístěného ve vrcholu u_j , potom při obsluze vrcholu u_i vykonáme dopravní práci ve výši $2 \cdot d(u_j, u_i) \cdot w(u_i)$. Provedeme-li součet těchto dílčích hodnot dopravní práce pro všechny obsluhované vrcholy množinou dep D_k , potom dostaneme vztah 3-8.

$$f(D_k) = \sum_{u_j \in D_k} \sum_{u_i \in A^+(u_j)} 2 \cdot d(u_j, u_i) \cdot w(u_i) \quad [-] \quad (3-8)$$

V případě nesymetrické matice vzdáleností (v grafu se nacházejí orientované hrany), je vztah 3-1 upraven na vztah ve tvaru 3-9.

$$f(D_k) = \sum_{u_j \in D_k} \sum_{u_i \in A^+(u_j)} [d(u_j, u_i) + d(u_i, u_j)] \cdot w(u_i) \quad [-] \quad (3-9)$$

Vzhledem k tomu, že dosud není znám jiný principiální postup pro vyhledání optimálního řešení umístění dep v síti než je propočítání všech možných způsobů umístění, musíme se spokojit v praxi s lokálním optimálním řešením.

Algoritmus pro získání lokálně optimálního řešení lokačně-alokační úlohy se skládá z jedenácti kroků, pomocí nichž je sestaveno lokálně optimální umístění k dep na síti.

Krok 1: Sestava výchozího řešení – tvorba podmnožiny množiny všech vrcholů $U \subset D_k$ (množina dep) a $N = U - D_k$ (množina neprozkoumaných vrcholů), vytvoření přidělených atrakčních obvodů jednotlivých dep, následuje krok 2.

Krok 2: Stanovení hodnoty dopravní práce $f(D_k)$ pro výchozí řešení, zavedení pomocné proměnné $z = 0$ (signalizuje, zda v průběhu výpočtu došlo k nějaké změně množiny dep D_k), následuje krok 3.

Krok 3: Je-li $N = \{ \}$, následuje krok 10, v opačném případě krok 4.

Krok 4: Z množiny N je vybrán libovolný vrchol u_l a podle pravidla $D_k^{u_l} = D_k - \{u_j\} + \{u_l\}$ sestavena modifikovaná množina dep, následuje krok 5.

Krok 5: Tvorba přidělených atrakčních obvodů odpovídající množinám dep a stanovení odpovídajících hodnot dopravní práce $f(D_k^{u_l})$, následuje krok 6.

Krok 6: Položíme $\min_{u_j} \{f(D_k^{u_j})\} = f(D_k^{u_r})$ (je-li více těchto minimálních hodnot, potom je zvolena libovolná z nich), následuje krok 7.

Krok 7: Porovnání $f(D_k^{u_r})$ s hodnotou $f(D_k)$, pokud je $f(D_k^{u_r}) < f(D_k)$, následuje krok 8, pokud platí $f(D_k^{u_r}) \geq f(D_k)$, následuje krok 9.

Krok 8: Je provedena změna množiny dep podle pravidla $D_k = D_k - \{u_r\} + \{u_l\}$ (tedy původní depo ve vrcholu u_r je nahrazeno depem ve vrcholu u_l , protože dojde ke snížení hodnoty dopravní práce), položíme $f(D_k) = f(D_k^{u_r})$ a $z = z + 1$ (došlo ke změně v množině dep) a následuje krok 9.

Krok 9: Množina N je upravena podle pravidla $N = N - \{u_l\}$ a návrat na krok 3.

Krok 10: Je-li $z > 0$, potom opět položíme $N = U - D_k$ (pracuje se změněnou množinou D_k , $z = 0$ a návrat na krok 3, pokud je $z = 0$, potom následuje krok 11.

Krok 11: Aktuální množina dep D_k tvoří lokálně optimální umístění k dep na zadané dopravní síti.

Tento algoritmus tedy dokáže umístit na zadanou síť určený počet dep. Čím více dep na síť umístíme, tím menší bude průměrná rozvozní vzdálenost každého z nich. Kritérium optimality u těchto úloh je postaveno tak, aby rozvozní vzdálenost, případně přepravní práce, byla minimální. Tento postup by ad absurdum vedl k situaci, že optimálním stavem by byla obsluha každého vrcholu ze svého vlastního depa, tedy, že počet vrcholů V , by se rovnal počtu dep k . Takový postup, je z praktického hlediska nepoužitelný. **Proto je potřeba před tento algoritmus vložit nový, autorem navržený, postup, kterým bude nejprve určena tato optimální rozvozní vzdálenost. Z ní pak lze zjistit potřebný počet k dep na síti, určit lokaci těchto dep a určit jejich atrakční obvody.**

3.2 Vehicle routing problem

Vehicle routing problem (dále jen VRP), resp. soubor takto označovaných metod patří do oblasti metod řešených pomocí optimalizace a lineárního programování. Takto jsou řešeny převážně dopravní úlohy pro různý počet zákazníků a nehomogenní vozový park. Původ těchto metod pochází od Dantziga a Ramsera z roku 1959. V současné době je v mnoha modifikacích používán pro řešení dopravních a distribučních úloh, úloh v logistických řetězcích, případně pro řešení svozně-rozvozních úloh. Jak již bylo uvedeno, tak VRP má celou řadu modifikací. V následujícím přehledu jsou tyto modifikace vypsány včetně stručné charakteristiky každé z nich:

- **travelling salesman problem (TSP)** – problém obchodního cestujícího,
- **capacitated vehicle routing problem (CVRP)** – obsluha jedním vozidlem, které má danou kapacitu,
- **split delivery vehicle routing problems (SDVRP)** – obsluha je provedena více vozidly, s různými kapacitami,
- **vehicle routing problem with time windows (VRPTW)** – některé nebo všechny zásilky je potřeba naložit či vyložit v určitém časovém okně,
- **multi-depot vehicle routing problem (MDVRP)** – je k dispozici více center obsluhy,

- **periodic vehicle routing problem (PVRP)** – dodávka musí být provedena určitý den v cyklu,
- **stochastic vehicle routing problem (SVRP)** – stochastický VRP,
- **vehicle routing problem with backhauls (VRPB)** – nejprve je nutno vše vyložit, pak teprve nakládat,
- **vehicle routing problem with pickup and delivery (VRPPD)** – nakládat i vykládat lze kdykoliv,
- **vehicle routing problem with satellite facilities (VRPSF)** – vozidlo může zbrojit i mimo centrum obsluhy.

Použití všech těchto algoritmů je možné buď ručním výpočtem, nebo použitím vhodného softwarového vybavení. Druhá možnost je pochopitelně rychlejší, přesnější a jednodušší. Na druhou stranu také náročnější na vstupní investici. Jedním z těchto softwarů je např. ArcLogistic⁶⁾, který poskytuje kompletní desktopové řešení pro fleet management⁷⁾. Tento produkt umožňuje optimalizovat nejen svoz a rozvoz zboží, ale i dopravu osob. ArcLogistics je použitelný jak pro dopravce s malým počtem vozidel, tak pro velké dopravce.

I přes vysokou sofistikovanost současných softwarových produktů **neexistuje žádná aplikace, která by umožňovala určení optimální rozvozní vzdálenosti. Tento nedostatek bude odstraněn návrhem v kapitole 4 disertační práce.**

3.3 Shluková analýza (33), (34)

Původní definice pojmu shluková analýza pochází z roku 1939 od Van Rijsbergenova a zní „*Shluková analýza je obecný logický postup formulovaný jako procedura, pomocí níž seskupujeme objektivně jedince do skupin na základě jejich podobnosti a rozdílnosti*“. Základním pojmem shlukové analýzy je **shluk**. Ten byl poprvé definován Van Rijsbergenovem takto: „*Je dána množina objektů $X = \{x_1; x_2; \dots; x_n\}$ a libovolný koeficient D nepodobnosti objektů. Shlukem nazveme takovou podmnožinu a množiny objektů X , pro niž platí vztah 3-10*“. Tuto podmínku nazýváme L_1 -podmínkou.

⁶⁾ ArcLogistics využívá základní technologii ArcGIS Engine a komponenty nadstavby pro síťové analýzy Network Analyst, což je výhodné zejména z důvodu možného propojení tohoto software na další části GIS software.

⁷⁾ Řízení vozového parku. Vhodný je obvykle pro park 50 vozidel a více.

$$\max D(x_i; x_j) < \min D(x_i; x_j) \quad [-] \quad (3-10)$$

kde: $x_i, x_j, x_l \in D$
 $x_k \notin D$

Každý z typů shlukové analýzy lze popsat pomocí definovaných cílů, k nimž každá z metod směřuje. V podstatě však rozlišujeme dvě základní skupiny těchto metod. Jsou to metody hierarchické a nehierarchické případně metody monothetické a polythetické:

- **Hierarchické metody** – společným znakem těchto metod je, že shlukovací proces je posloupností rozkladů množin objektů. Je možné je dále členit na metody **aglomerativní** (každý shluk je na začátku tvořen právě jedním objektem a postupně jsou shlukovány nejpodobnější objekty) a **divizivní** (na počátku je jeden shluk obsahující všechny prvky, který je následně rozkládán na vzájemně disjunktí množiny),
- **Nehierarchické metody** – rozkládají výchozí množinu do podmnožin tak, aby bylo splněno určité kritérium. Prvotní rozklad není konstantní a mění se až k dosažení optima. Nehierarchické metody lze rozdělit na optimalizační metody a metody analýzy bodů.

Mezi konkrétní metody shlukové analýzy patří metoda nejbližšího souseda (Simple linkage), metoda nejvzdálenějšího souseda (Complete linkage), Centroidní metoda (Weighted group method), metoda průměrné vazby (Average linkage method), Mediánová metoda (Unweighted group average), Wardova-Wishartova metoda (Ward's error sum of squares method), MacQueenova metoda k -průměrů (k -means method), PAM (Partition around centroid), Bagged clustering (Bootstrap aggregating clustering).

Pro potřeby řešení disertační práce byla vybrána Ward-Wishartova metoda, která byla řešena v softwarovém produktu STATISTICA 8.0 tak, aby mohly být stanoveny intervaly pro nově navrhovaný algoritmus výpočtu optimální rozvozní vzdálenosti.

3.3.1 MacQueenova metoda k -průměrů (k -means clustering) (33), (34)

Tato metoda je jednou z nejnámějších nehierarchických metod, které se používají při shlukové analýze. Poprvé byla publikována MacQueenem v roce 1967. Metoda rozkládá zadanou matici hodnot na předem definovaný (očekávaný) počet shluků pomocí

minimalizace zadaného kritéria tak, že minimalizuje střední odchylku mezi zadanou množinou dat a pomyslným středem shluku pomocí tzv. Euklidovské vzdálenosti. Jako nejčastější kritérium se používá hodnota stopy matice vnitroskupinové variability $st(T)$. Toto kritérium je vyjádřeno vztahem 3-11.

$$T = \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_h} (x_{hi} - \bar{x}_h) \cdot (x_{hi} - \bar{x}_h)^T \quad [-] \quad (3-11)$$

kde: k celkový počet shluků [počet],
 n_h počet objektů v h -tém shluku [počet],
 x_{hi} i -tý objekt v h -tém shluku,
 \bar{x}_h vektor průměrů h -tého shluku.

Problém této metody je v tom, že pokud požadujeme optimální řešení, je počet možností, které musíme projít roven $\binom{n-1}{k-1}$, kde n je počet bodů matice a k je počet shluků. Kvantitativní problém řeší algoritmy, které jsou založeny na postupném zlepšování jednotlivých shluků pomocí přesunu objektů. Postup přináší nevýhodu v podobě nalezení pouze suboptimálního řešení, tedy lokálního minima optimalizovaného kritéria.

MacQueenův algoritmus lze obecně rozepsat do čtyř kroků:

1. Nalezení počátečního rozkladu⁸⁾ o požadovaném počtu shluků.
2. Stanovení změny hodnoty kritéria, které je dosaženo přesunutím jednoho z objektů do jiného shluku.
3. Provedení takové změny, která přinese největší kladnou změnu optimalizovaného kritéria.
4. Opakování kroku 2 a 3 dokud dochází ke zlepšování optimalizačního kritéria.

MacQueenovu metodu lze využít při stanovení jednotlivých intervalů rozvozních vzdáleností. Autor musí vyřešit otázku, jaký počet hledaných shluků, resp. intervalů je z hlediska řešení vhodný. Proto bude pro vlastní řešení použita metoda jiná.

3.3.2 Ward – Wishhartova metoda (33),(34)

Jak již bylo uvedeno v úvodu této podkapitoly, tato metoda se v originále jmenuje „Ward’s error sum of squares method“. Základem metody je ztráta informace, která plyne ze seskupování objektů do shluků na základě jejich celkového součtu čtverců odchylek každé z hodnot od vektoru průměrů. Tento průměr se nazývá centroidem shluku. Metoda

⁸⁾ Nejčastěji pomocí některé z hierarchických metod

používá jako kritérium kvality přírůstek celkového součtu čtverců odchylek hodnot od vektoru průměru příslušného shluku. Přírůstek je vyjádřen jako součet čtverců odchylek hodnot od vektoru průměrů v nově vznikajícím shluku S ($S = A \cup B$), od kterého jsou odečteny součty čtverců odchylek v obou zanikajících shlucích A a B . Matematicky je postup vyjádřen vztahem 3-12.

$$\Delta C = \sum_{i=1}^{n_S} \sum_{j=1}^p (x_{sij} - \bar{x}_{sj})^2 - \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^p (x_{aij} - \bar{x}_{aj})^2 - \sum_{i=1}^{n_B} \sum_{j=1}^p (x_{bij} - \bar{x}_{bj})^2 \quad (3-12)$$

kde: x_{sij} hodnota j -té proměné i -tého shluku ve shluku S ,
 n_S počet objektů ve shluku S ,
 \bar{x}_{sj} průměrná hodnota ve shluku S ,
 \bar{x}_{aj} průměrná hodnota ve shluku A ,
 \bar{x}_{bj} průměrná hodnota ve shluku B .

Uvedený postup spojuje shluky, jejichž sloučením je minimalizováno kritérium ΔC . Takto jsou odstraňovány malé shluky a jsou vytvářeny shluky přibližně stejné velikosti. Kritérium ΔC lze vyjádřit i pomocí vztahu 3-13.

$$\Delta C = \frac{n_A n_B}{n_A + n_B} \sum_{j=1}^p (\bar{x}_{aj} - \bar{x}_{bj})^2 \quad [-] \quad (3-13)$$

kde: n_A počet objektů ve shluku A ,
 n_B počet objektů ve shluku B ,
 \bar{x}_{aj} průměrná hodnota ve shluku A ,
 \bar{x}_{bj} průměrná hodnota ve shluku B .

Vztahem 3-13 jsou vyjádřeny součiny Euklidovských vzdáleností mezi centroidy jednotlivých shluků, ze kterých je vytvářen jeden shluk a koeficient závisící na velikosti shluků, resp. počtu objektů v obou shlucích.

3.4 Modelování nákladů

Druhý cíl disertační práce vyžaduje kromě precizní analýzy nákladů všech uvažovaných druhů KD a přímé silniční dopravy především matematické modelování pro stanovení vývoje nákladů na dopravu při měnící se přepravní vzdálenosti tak, aby byla nalezena ekonomicky optimální přepravní vzdálenost. Pomocí tohoto modelování bude možno stanovit rozmezí (a také optimum), v jakém se musí pohybovat vzdálenost mezi terminály KD, aby byl model ekonomicky výhodný. Teoretický základ průběhu modelování je v kapitole 4.3. Jeho praktická aplikace pak v kapitole 5.4.

Z druhů KD byly vybrány ty, které jsou v Evropě využívány nejvíce. Mezi ně patří kontejnery ISO řady 1 (případně výměnné nástavby), sedlové návěsy a systém Ro-La. Náklady těchto druhů KD jsou porovnávány s přímou silniční dopravou. Při identifikaci jednotlivých nákladů byly vybrány ty, jejichž výše se přímo projevuje ve variabilních nákladech daného druhu dopravy, což koresponduje s předpoklady uvedenými v kapitole 1.2 na straně 20 disertační práce. Přehled nákladů pro jednotlivé zkoumané druhy dopravy je v tabulce 3-1. Modelováním nákladů bude hledána odpověď na otázku, který z těchto systémů je, z hlediska variabilních nákladů, konkurenceschopný přímé silniční dopravě, případně za jakých podmínek.

Tabulka 3-1: Přehled nákladů jednotlivých zkoumaných druhů dopravy

Druh nákladu	Kontejnery ISO řady 1	Sedlové návěsy	Ro-La	Přímá silniční doprava
Povinné ručení	Ne	Ano	Ano	Ano
Silniční daň	Ne	Ano	Ano	Ano
Odpisy	Ne	Ano	Ano	Ano
PHM	Ne	Ne	Ano	Ano
Mýto	Ne	Ne	Ano	Ano
Mzda řidiče	Ne	Ne	Ano	Ano
Pneumatiky	Ne	Ne	Ano	Ano
Pronájem přepravní jednotky	Ano	Ne	Ne	Ne
Přeprava po železnici	Ano	Ano	Ano	Ne

Zdroj: autor

Na základě analýzy a modelu z vyřešeného druhého cíle pak bude možno vytvořit schémata rozhodovacích procesů, tedy třetí cíl disertační práce, za jakých podmínek bude ekonomicky výhodné zavést linku KD a pro jaký systém KD je daná linka výhodná.

4 Obecný návrh řešení

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1, převládá v současné době ve vědeckých člancích názor (9), (35), že zavádění systémů KD musí nacházet své opodstatnění zejména v oblasti ekonomických kalkulací a nikoli pouze ekologie. To také potvrzují poznatky, které přicházejí z praxe, tedy od provozovatelů linek KD či operátorů, kteří disponují oběma systémy, tedy vypravují vlaky KD a zároveň podnikají v oblasti přímé silniční dopravy. Z jejich názorů vyplývá, že zákazníka nezajímá druh dopravy, kterým je jeho náklad přepraven, ale pouze cena, dodržení termínu dodávky a také schopnost dopravce uspokojit celou poptávku zákazníka. Zákazník tak má smlouvu pouze s jedním dopravcem, který mu zajišťuje komplexní servis. Z cenového hlediska dochází v současné době k přesunu části zátěže zpět na přímou silniční dopravu. Tento trend je důsledkem celosvětové finanční krize z roku 2008, která přinesla snížení či dokonce zastavení výroby řady podniků, čímž také klesl zájem o přepravu věcí. Dle základních ekonomických pravidel tak došlo vlivem snížení poptávky ke snížení ceny. Stejně destinace jsou tedy silniční dopravci ochotni v současné době jezdit za nižší ceny než dříve. To zapříčinilo také odliv přeprav z KD na přímou silniční dopravu. Řada linek KD se tak dostala do výrazných, až existenčních potíží.

Z tohoto vývoje je ale možné odvodit nové, dosud neuvažované vlastnosti, které musí mít linka KD v případě, že chce být rentabilní i v dobách, kdy ekonomická situace nahrává spíše jiným druhům dopravy.

Rentabilní linka KD musí, dle autora disertační práce, splňovat vhodný mix následujících vlastností:

- **cena,**
- **vytíženost,**
- **pravidelnost,**
- **vyrovnávka.**

Vzhledem k orientaci a rozsahu disertační práce se autor zaměřil pouze na dvě vlastnosti, které považuje za nejvýznamnější, a to **cena** a **vytíženost**. Těmito dvěma vlastnostem je věnována vlastní kapitola 4.1 a 4.2. Obě tyto vlastnosti se pak prolínají v kapitole 4.3, která pojednává o modelování nákladů.

Pro splnění druhého cíle, kterým je navržení matematického modelu maximalizace finanční úspory při měnící se přepravní vzdálenosti, je totiž zapotřebí analyzovat náklady, které jsou spojeny s provozem jednotlivých systémů KD. Vzhledem k technologické orientaci disertační práce budou porovnávány pouze variabilní náklady jednotlivých systémů KD a přímé silniční dopravy.

4.1 Cena a optimální rozvozní vzdálenost

Cena je jednou z nejdůležitějších vlastností při výběru druhu dopravy. Jak již bylo uvedeno, je KD schopna nabídnout při kolísavé ekonomické situaci konstantní cenu. Tato vlastnost se v současné době projevuje jako spíše negativní, ale její význam roste se zlepšováním ekonomické situace, s rostoucí poptávkou a s tím související rostoucí cenou za přímou silniční dopravu.

Problematikou umístění center hromadné obsluhy se již zabývalo ve svých publikacích mnoho autorů např. (36), (37). Tato centra hromadné obsluhy mohou představovat celou řadu konkrétních staveb s obrovskou škálou průmyslového i jiného využití jako jsou logistická centra, stanice vozidel složek integrovaného záchranného systému (dále jen IZS), úložiště posypového materiálu pro plánovanou zimní údržbu či distribučních centra různých typů firem (zasílatelské firmy, pojišťovny, aj.). V minulosti již také bylo dokázáno, že k řešení těchto úloh lze velmi úspěšně využít metody operační analýzy, zejména pak lokačně-alokační problém. Příklady těchto důkazů jsou od Tilmann-Cainova (38) a Hakimiho algoritmu (39) až po v současné době používané genetické algoritmy (40), (41). Všechny tyto metody ovšem počítají s umístěním těchto center z pohledu optimalizace rozvozní vzdálenosti. Pokud budeme zvyšovat počet center, bude se také snižovat tato průměrná přepravní vzdálenost v rámci každého atrakčního obvodu. Ne vždy ale musí být zákonitě toto snižování průměrné přepravní vzdálenosti žádoucí z hlediska dopravce. Problémem těchto metod je jejich založení na minimalizaci nákladů za ujetý kilometr. Tuto vlastnost lze vyjádřit pomocí vzdálenostně optimálního umístění množiny D_k na síti s vrcholy V v rámci lokační úlohy vztahem 4-1 (42).

$$D_k \subset V; ec(D_k) = \min_{D_k \subset V} \{ec(D_k)\} \quad [\text{počet}] \quad (4-1)$$

kde: D_k všechny k prvkové podmnožiny množiny V .

Jsou odvětví, ve kterých není tato minimalizace obvyklá a výhodná. Takovým příkladem jsou nejrůznější typy pracovních mechanismů, které si zákazník pro své účely

půjčuje v rámci „*Smlouvy o nájmu dopravního prostředku*“ dle Obchodního zákoníku, případně, které firma provozuje za hodinovou sazbu. U těchto mechanismů by bylo zavádějící hovořit o sazbě za kilometr, protože takové vozidlo má schopnost vlastního pohybu pouze jako doplňkový produkt. Jeho hlavní činností je ale horizontální nebo vertikální přemísťování hmotných předmětů. Taková vozidla mají zpravidla také dva typy pohonu. Jeden, který slouží k vlastnímu pohybu vozidla a druhý, kterým je vykonávána pracovní činnost. Ten je uváděn například v motohodinách. A právě náklady na provoz tohoto druhého pohonu by se velmi obtížně vyjadřovaly do tradiční sazby v peněžních jednotkách za kilometr. S funkcí druhého pohonu velmi často souvisí, kromě vlastní spotřeby, také další náklady, mezi které může patřit např. mzda obsluhy zařízení, jeho profesní způsobilost, opotřebení pracovního mechanismu, apod. U těchto zařízení je obvyklé vyjadřovat tuto sazbu v peněžních jednotkách za jednotku času.

Právě v tom se nachází podstata nového navrženého výpočtu pro určení optimálního rozmístění koncových terminálů KD. Základním předpokladem tedy je obrácený způsob výpočtu umístění těchto koncových terminálů, než je tomu doposud. V prvním kroku bude určena optimální rozvozní vzdálenost, na jejímž základě bude, pomocí řešení lokačně-alokačního problému, možno určit počet a umístění koncových terminálů KD. Tento počet a jejich umístění již ale není předmětem této disertační práce.

Jak již bylo uvedeno, nově navržený způsob určení optimální rozvozní vzdálenosti vychází z myšlenky, že i vozidlo schopné přepravovat jednotky KD je také najímáno za hodinovou sazbu označovanou jako denní fixní částka. Pod pojmem vozidlo schopné přepravovat jednotky KD se rozumí jednotka složená ze silničního tahače, návěsu vybaveného pro přepravu jednotek KD a řidiče. Tato premisa vychází ze známého předpokladu neskladovatelnosti přepravního výkonu. Dopravci tak, na základě požadavků a rizika, poptávají určité rozsahy přepravního výkonu, který předpokládají, že budou potřebovat. Část z něho může být pokryta z vlastních zdrojů, zbytek pak ze zdrojů cizích. Pokud ale nedojde k naplnění těchto předpokladů, je dopravce nucen u cizích zdrojů zaplatit i nevyužitou část přepravního výkonu. U zdrojů vlastních pak dochází ke snížení zisku. V praxi totiž velmi často dochází k tomu, že větší společnosti si najímají jednotlivé menší dopravce, kterým pak platí denní paušál za použití jejich přepravní jednotky. Tento systém se dá chápat jako určitá forma outsourcingu. Konečná sazba za kilometr se tak může díky paušálu u každého z vozidel významně lišit, ale celková částka zaplacená

za disponibilitu vozidla je konstantní. Je tedy pouze na objednateli, jak dokáže přepravní a časovou kapacitu každé pronajímané jednotky využít.

Tímto je tedy potvrzen fakt, že i dopravní prostředky se mohou chovat jako mechanismy, jejichž sazba je vyjádřena ve finančních jednotkách za jednotku času a nikoli za kilometr. V kapitole 4.1.1 je provedeno teoretické odvození nově navrženého algoritmu pro výpočet optimální svozové vzdálenosti pomocí sazby za kilometr p při měnícím se počtu obrátů n_o a době manipulací T_{NV} . Na první pohled by se tedy zdálo, že výpočet je nadále stanoven ve finančních jednotkách za kilometr. Tato tradiční sazba je ale pouze mezičlánkem při určení intervalu optimálních hodnot rozvozních vzdáleností.

Celý autorem této práce **nově navržený algoritmus je založen na postupném výpočtu pomocí kontingenčních tabulek A – E**. Na obrázku 4-1 je provedena abstrakce těchto kontingenčních tabulek (**modré orámování**) o hlavní řádek a sloupec (černá přerušovaná) můžeme provést výpočet pomocí **matic** (**červené orámování**) A – E (význam jednotlivých matic je uveden v kapitole 4.1.1), pomocí nichž se postupně dochází ke konečnému řešení. Tento výsledek lze při vhodném použití tabulkového editoru (např. MS EXCEL) velmi snadno upravovat dle měnících se vstupních údajů a podmínek. Dále je tak používán pouze termín **matice**.

Základem všech matic je dvojrozměrná analýza vstupů při měnícím se počtu obrátů n_o (sloupec) a dobou ložných operací T_{NV} (řádek). Tyto dvě proměnné jsou všem maticím společné.

n_o / T_{NV}	T_{NV_1}	T_{NV_2}	T_{NV_3}	...	T_{NV_j}
n_{o1}$	...	...	...	...	n_{o1} \cdot T_{NV_j}$
n_{o2}$	...	...	...	...	n_{o2} \cdot T_{NV_j}$
n_{o3}$	...	...	...	...	n_{o3} \cdot T_{NV_j}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
n_{oi}	$n_{oi} \cdot T_{NV_1}$	$n_{oi} \cdot T_{NV_2}$	$n_{oi} \cdot T_{NV_3}$	...	$n_{oi} \cdot T_{NV_j}$

Zdroj: autor

Obrázek 4-1: Principiální ukázka výpočtové kontingenční tabulky a matice

Některé ze vstupních údajů jsou z hlediska algoritmu konstantní. Mezi ně patří:

- denní fixní částka za jedno vozidlo P [€],
- průměrná rychlost vozidla v_{pr} [$\text{km}\cdot\text{min}^{-1}$], tato jednotka byla zvolena vzhledem k ostatním veličinám, ve kterých se obvykle uvádí ostatní hodnoty tedy kilometry a minuty,
- maximální denní doba práce T_{max} [min],
- maximální denní doba strávená řízením včetně přestávek v době řízení $T_{\check{r}max}$ [min].

Poslední dvě zmíněné doby T_{max} a $T_{\check{r}max}$ se skládají z více složek, které vychází z nařízení č. 561/2006 a zákoníku práce č. 262/2006 Sb., proto je nutné si uvést i tyto složky a vymežit si pojmy:

Pracovní doba: celkový čas strávený zaměstnancem v pracovním procesu. Celková doba nesmí přesáhnout 720 minut za 24 hodin. V rámci pracovní doby musí být zaměstnanci poskytnuta přestávka v délce trvání 30 minut po každých 360 minutách práce (v algoritmu je tato přestávka označována jako **přestávka na jídlo a oddech** či **PJO**).

Doba řízení: je doba, po kterou řidič řídí vozidlo. Její maximální délka je stanovena na 540 minut za den, přičemž dvakrát v týdnu může být prodloužena až na 600 minut.

Jiná práce: tato doba se započítává do **pracovní doby**, ale ne do **doby řízení** (nakládka, vykládka, neproduktivní prostoj, aj).

Přestávka v době řízení (v algoritmu a dříve označovaná jako **bezpečnostní přestávka** (dále jen **BP**)): musí být poskytnuta řidiči nejdéle po 270 minutách řízení v délce minimálně 45 minut. Tato přestávka může být rozložena do dvou částí o minimálních délkách 15 a 30 minut. Velikost BP je tak přímo závislá na době jízdy, a to způsobem, který je uveden ve vztahu 4-2.

$$\begin{aligned} T_{BP} &\sim T_j \\ \forall T_j \in (0; 270); T_{BP} &= 0 \text{ min} \\ \forall T_j \in \langle 270; 540 \rangle; T_{BP} &= 45 \text{ min} \\ \forall T_j \in \langle 540; 600 \rangle; T_{BP} &= 90 \text{ min} \end{aligned} \quad [\text{min}] \quad (4-2)$$

kde: T_{BP} doba bezpečnostních přestávek [min],

T_j doba řízení [min].

S pracovním režimem řidiče souvisí řada dalších omezujících časových limitů (denní a týdenní doba odpočinku), které ale nejsou omezujícími podmínkami tohoto algoritmu, proto nejsou dále zohledněny při výpočtu.

4.1.1 Nově navržený algoritmus pro výpočet optimální rozvozní vzdálenosti

V této podkapitole je popsán autorem navržený nový algoritmus výpočtu optimální rozvozní vzdálenosti při měnícím se počtu obrátů vozidla a délce manipulačních operací. Navržený algoritmus se skládá ze vstupních údajů, **matic A – E** a matematického aparátu spojujícího jednotlivé matice. Pro lepší přehlednost je nejprve uveden stručný verbální popis jednotlivých matic:

Matice A – po zadání vstupních hodnot jsou odfiltrována nepřipustná řešení pro dobu řízení a upraveny takové hodnoty dob řízení, které překračují další omezující podmínky (maximální denní doba řízení).

Matice B – hodnoty dob řízení jsou sníženy o zákonné přestávky.

Matice C – na základě znalosti hodnot z matice B jsou vypočteny průměrné přepravní vzdálenosti.

Matice D – vychází také z matice B a obsahuje výpočet jednotlivých sazeb v peněžních jednotkách za kilometr pro různé doby řízení.

Matice E – nastavením požadovaného **intervalu přípustných sazeb** odfiltruje matice řešení o další hodnoty, tak aby zůstaly pouze hodnoty z přípustného intervalu řešení.

Podrobný popis celého nově navrženého algoritmu je uveden v příloze 1 formou vývojového diagramu.

Vlastní algoritmus

Matice A vypočítává v prvním kroku dobu řízení včetně povinných přestávek (BP a PJO) $t_{\tilde{R}BP}$ pro jednotkové vozidlo bez ohledu na omezující podmínky. Tato doba je stanovena pro i obrátů vozidla a pro stálé manipulace při jednom obrátu vozidla v délce j minut. Z hlediska počtu obrátů n_o jsou uvažovány diskrétní celočíselné hodnoty. Pro dobu stálých manipulací T_{NVj} pak jsou spojitě použitelné hodnoty kladných reálných čísel.

Vzhledem k tomu, že z hlediska průběhu času je nemožné, aby čas běžel proti směru, je zvolen druhý krok při tvorbě **prvotní matice A**, a sice odfiltrování všech hodnot

menších nebo rovných nule, které jsou pro řešení nepřijatelné. Pro výpočet těchto dob platí vztah 4-3.

$$t_{\check{R}BP_{i,j}} = T_{\max} - (n_{oi} \cdot T_{NV_j}) \quad [\text{min}] \quad (4-3)$$

kde: $t_{\check{R}BP}$ doba řízení včetně bezpečnostních přestávek [min],
 $i: 1, \dots, n; j: 1, \dots, m$, počet řádků a sloupců matice [počet],
 T_{\max} maximální denní pracovní doba [min],
 n_{oi} počet obrátů v hlavním sloupci [počet],
 T_{NV_j} doba manipulací při jednom obratu v hlavním řádku [min].

Tyto dva kroky tvorby **výsledné matice A** jsou doplněny třetím krokem, ve kterém jsou vypočtené kladné hodnoty $t_{\check{R}BP}$ ještě upraveny o takové hodnoty $t_{\check{R}BP}$, které svou velikostí přesahují hodnotu $T_{\check{R}max}$, což je maximální denní doba řízení vozidla. Pro její výpočet platí vztahy 4-4 a 4-5.

$$\forall t_{\check{R}BP_{i,j}} > T_{\check{R}max}; t_{\check{R}BP_{i,j}} = T_{\check{R}max} \quad [\text{min}] \quad (4-4)$$

$$\forall t_{\check{R}BP_{i,j}} \in (0; T_{\check{R}max}); t_{\check{R}BP_{i,j}} = T_{\max} - (n_{oi} \cdot T_{NV_j}) \quad [\text{min}] \quad (4-5)$$

kde: $t_{\check{R}BP}$ doba řízení včetně bezpečnostních přestávek [min],
 $i: 1, \dots, n; j: 1, \dots, m$, počet řádků a sloupců matice [počet],
 T_{\max} maximální denní pracovní doba [počet],
 $T_{\check{R}max}$ maximální denní doba řízení [min],
 n_{oi} počet obrátů [počet],
 T_{NV} doba manipulací (jiné práce) při jednom obratu [min].

V **matici B** jsou hodnoty doby řízení a bezpečnostních přestávek $t_{\check{R}BP}$ z **výsledné matice A** sníženy o velikost těchto bezpečnostních přestávek, případně ve speciálních případech o přestávku na jídlo a oddech. Výsledkem **matice B** jsou hodnoty doby řízení $t_{\check{R}}$. Velikost hodnot závisí na výši $t_{\check{R}BP}$ dle nařízení č. 561/2006. Přehled těchto závislostí je v tabulce 4-1. U $t_{\check{R}BP}$ vyšší než 270 minut je irelevantní uvažovat o *PJO*, protože i když nastává, tak je pokryta z BP. Stanovení velikosti doby řízení je dáno vztahem 4-6.

Tabulka 4-1: Hodnota bezpečnostních přestávek pro různé intervaly doby řízení

Doba řízení, BP a PJO [min]	Doba řízení + JP [min]	Doba BP + PJO [min]
(0;270)	(0;360)	0 ⁹⁾
	> 360	PJO – 30 ¹⁰⁾
(270;585)		BP – 45 ¹¹⁾
> 585		2·BP – 90 ¹²⁾

Zdroj: autor

$$\begin{aligned}
 \forall t_{\check{R}BP_{i,j}} > 585; t_{\check{R}_{i,j}} &= t_{\check{R}BP_{i,j}} - 2 \cdot BP \\
 \forall t_{\check{R}BP_{i,j}} \in (270;585) >; t_{\check{R}_{i,j}} &= t_{\check{R}BP_{i,j}} - BP \\
 \forall t_{\check{R}BP_{i,j}} \in (0;270) \wedge (n_{o_i} \cdot T_{JP_i}) > 360; t_{\check{R}_{i,j}} &= t_{\check{R}BP_{i,j}} - PJO \quad [\text{min}] \quad (4-6) \\
 \forall t_{\check{R}BP_{i,j}} \in (0;270) \wedge (n_{o_i} \cdot T_{JP_i}) \leq 360; t_{\check{R}_{i,j}} &= t_{\check{R}BP_{i,j}}
 \end{aligned}$$

kde: $t_{\check{R}BP}$ doba řízení včetně bezpečnostních přestávek [min],
 $i: 1, \dots, n; j: 1, \dots, m$, počet řádků a sloupců matice [počet],
 T_{max} maximální denní pracovní doba [min],
 $t_{\check{R}}$ doba řízení [min],
 BP bezpečnostní přestávka [min],
 PJO přestávka na jídlo a oddech [min],
 n_{o_i} počet obrátů [počet],
 T_{JP} doba jiné práce při jednom obrátě [min].

Pomocí **matice C** jsou v závislosti na době řízení $t_{\check{R}}$ a na počtu obrátů n_o vypočteny průměrné přepravní vzdálenosti l_{pr} . Vzhledem k tomu, že při tvorbě **matice B** došlo v algoritmu k početní operaci odčítání, je při tvorbě **matice C** vhodné opět prověřit všechny prvky vstupující do této části algoritmu a neuvažovat s prvky, které jsou menší než 0, protože tyto hodnoty jsou z hlediska řešení nepřijatelné. Pro průměrnou přepravní vzdálenost pak tedy platí vztah 4-7.

$$\forall t_{\check{R}_{i,j}} > 0; l_{pr_{i,j}} = \frac{t_{\check{R}_{i,j}} \cdot v_{pr}}{2 \cdot n_{o_i}} \quad [\text{km}] \quad (4-7)$$

⁹⁾ Doba řízení ještě nedosáhla 270 minut a zároveň součet doby řízení a JP nedosáhl 360 minut.

¹⁰⁾ Doba řízení ještě nedosáhla 270 minut, ale součet doby řízení a JP přesáhl 360 minut → PJO – 30 minut.

¹¹⁾ Doba řízení přesáhla 240 minut, ale ještě nedosáhla 480 minut → BP – 45 minut, ve které je integrována i PJO.

¹²⁾ Doba řízení přesáhla 480 minut → BP – 90 minut, ve které je také integrována i PJO.

kde: l_{pr} průměrná přepravní vzdálenost [min],
 $i: 1, \dots, n; j: 1, \dots, m$, počet řádků a sloupců matice [počet],
 $t_{\tilde{R}}$ doba řízení [min],
 v_{pr} průměrná rychlost vozidla [$\text{km} \cdot \text{min}^{-1}$],
 n_o počet obrátů [počet].

Matice D je významnou maticí celého algoritmu a vychází také z **matice B**. Jsou v ní vypočteny sazby na kilometr při různých hodnotách doby řízení $t_{\tilde{R}}$, případně po dosažení vzorce z **matice C**, také jako závislost na počtu obrátů n_o a průměrné přepravní vzdálenosti l_{pr} . V tomto místě vstupují do navrženého algoritmu dvě velmi důležité veličiny. Jsou to denní fixní částka za jedno vozidlo P a průměrná rychlost v_{pr} . Jejich hodnota je z hlediska průběhu navrženého algoritmu považována za konstantní, navržený algoritmus je ale univerzálně připraven také pro využití při zkoumání chování **matice C** a **D** v případě měnících se těchto dvou veličin. Pro velikosti sazeb tedy platí vztah 4-8.

$$p_{i,j} = \frac{P}{v_{pr} \cdot t_{\tilde{R}_{i,j}}} \text{ nebo také } p_{i,j} = \frac{P}{l_{pr_{i,j}} \cdot 2n_{o_i}} \quad [\text{€} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-8)$$

kde: p průměrná sazba na kilometr [$\text{€} \cdot \text{km}^{-1}$],
 l_{pr} průměrná přepravní vzdálenost [km],
 $i: 1, \dots, n; j: 1, \dots, m$, počet řádků a sloupců matice [počet],
 P denní paušál [€],
 $t_{\tilde{R}}$ doba řízení [min],
 v_{pr} průměrná rychlost vozidla [$\text{km} \cdot \text{min}^{-1}$],
 n_o počet obrátů [počet].

Z hlediska algoritmu je možné provést výpočet **matice C** a **D** v jednom průchodu všech hodnot i a j . Jejich výpočet je na sobě nezávislý.

Takto je popsán základní princip nově navrženého algoritmu pro výpočet matice sazeb p_{ij} . Výsledkem algoritmu je **matice D**, ve které jsou vypočteny hodnoty všech přípustných řešení sazeb, která vyhovují zadaným n_{oi} a T_{NVj} . Tato řešení je možné ještě dále filtrovat podle libovolných parametrů. Jedním z nich je například logická možnost zúžit přípustná řešení do předem definovaného intervalu (např. $0,6 - 0,7 \text{ €} \cdot \text{km}^{-1}$). Tento požadavek vychází ze vztahu, který existuje mezi nabídkou a poptávkou. Jedná se zde také o hledání rovnovážné ceny, tedy ceny, na které se v tržním prostředí shodnou oba subjekty,

tedy nabízející i poptávající. Tímto způsobem si může nabízející i poptávající definovat takové hodnoty přípustných řešení, které z jakýchkoli důvodů není ochoten akceptovat. Tento interval je možno nazvat **intervalem přípustných sazeb**, tak jak je vyjádřeno ve vztahu 4-9.

$$p_{ds} \leq p_{i,j} \leq p_{hs} \quad [€ \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-9)$$

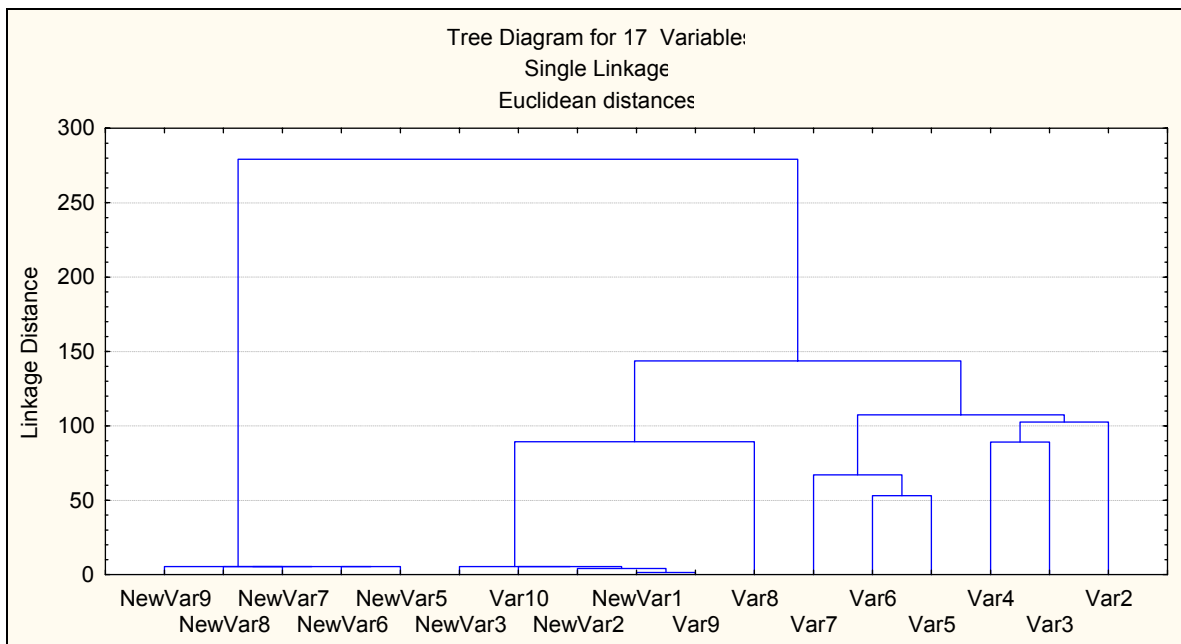
kde: p průměrná sazba za kilometr [$€ \cdot \text{km}^{-1}$],
 $i: 1, \dots, n; j: 1, \dots, m$, počet řádků a sloupců matice [počet],
 p_{ds} dolní ohraničení sazby [$€ \cdot \text{km}^{-1}$],
 p_{hs} horní ohraničení sazby [$€ \cdot \text{km}^{-1}$].

Takto vzniklou matici označme, jako **matici E**. Pomocí promítnutí **matice E** do **matice D** může dopravce zjistit, jaká vzdálenost je pro jeho typ rozvozu optimální z hlediska pracovního vytížení vozidla i řidiče a jak tedy musí nastavit podmínku pro výpočet atrakčního obvodu terminálu, aby tohoto optima bylo dosaženo.

Takto je provedeno teoretické rozšíření lokační úlohy o nově navržený algoritmus pro výpočet optimální rozvozové vzdálenosti, který zohledňuje použití nákladního vozidla jako paušální konstanty, jejíž náklady nejsou primárně vztaženy k ujetému kilometru, ale jsou považovány za konstantní. Rozdílnost sazeb za kilometr je pak dána rozvozovou vzdáleností a dobou manipulací u odesilatele i příjemce. Tento obecný výpočet je pochopitelně možné aplikovat v libovolných právních podmínkách.

4.1.2. Doplnění algoritmu o shlukovou analýzu

Řešení, které je v kapitole 4.1.1 je vhodné doplnit tak, aby výsledkem algoritmu nebyla pouze matice. Nejsou totiž prohledávány všechny hodnoty spojitě, ale pouze diskrétně. Vhodnějším výsledkem jsou tak intervaly dob manipulací, k nimž jsou následně přiřazeny hodnoty průměrných přepravních vzdáleností. Vhodným nástrojem pro vytváření těchto intervalů je shluková analýza. Teoretický základ shlukové analýzy byl položen již v kapitole 3.3 Na základě některé z metod shlukové analýzy, pak mohou být vytvořeny zmiňované intervaly. Příklad shlukové analýzy provedené pomocí Ward – Wishhartovy metody v programu STATISTICA 8.0 je na obrázku 4-2.



Zdroj: autor

Obrázek 4-2: Příklad shlukové analýzy

Shluková analýza pomůže rozdělit oblast přípustných řešení do požadovaného počtu intervalů. Pokud na obrázek 4-2 nahlédneme od nejvyšších hodnot, pak lze tento obecný soubor dat rozdělit na dva, případně tři shluky. V levé i pravé části je patrná jedna velká izolovaná skupina proměnných, která se odděluje přibližně u hodnoty 280. V pravé části pak lze tuto velkou skupinu proměnných rozdělit na dvě podskupiny, dělicí se přibližně u hodnoty 150. Je možné také další členění, toto by ale vedlo ke zbytečné diverzifikaci hodnot a k příliš vysokému počtu intervalů. Této analýze budou v kapitole 5 podrobeny všechny výsledné aplikace řešení.

4.2 Vytíženost

Železniční doprava, jako součást KD, je kromě ceny také velmi citlivá na vytíženost souprav. Vlastní hmotnost jednotek (prázdných, ložených) není v porovnání s jinými druhy nákladu rozhodující složkou v ceně za použití železniční dopravní cesty či trakční energii.

V současné době převažuje v železniční nákladní dopravě trend vytváření ucelených vlaků jako neekonomičtější varianty přepravy nákladu po železnici. Tomuto faktu také nahrává vstup dalších subjektů na železniční trh v nákladní dopravě. Dopravci jako např. Unipetrol doprava, s.r.o., OKD Doprava, a.s., DB Schenker Rail Deutschland

AG (Railion), ale také ČD Cargo, a.s. provozují ucelené vlaky hromadných substrátů. Mezi nejčastější takto přepravované komodity patří kontejnery, uhlí, cement případně různé látky v cisternových vozech. Pojem ucelený vlak je chápán jako vlak přepravující zásilky z jedné odesílací stanice od jednoho odesílatele do jedné cílové stanice pro jednoho příjemce. Pro potřeby ekonomické rentability je však potřeba chápat ucelený vlak jako pomyslnou jednu přepravní jednotku. Vzhledem k velmi rozdílným vlastnostem jednotlivých hromadných substrátů mají také tyto ucelené vlaky různou hmotnost a délku. Tyto parametry ovlivňují platbu za použití železniční dopravní cesty.

4.2.1 Cena za použití železniční dopravní cesty

Tato cena je každoročně stanovována Výměrem ministerstva financí ČR číslo 1 a určuje maximální ceny a určené podmínky za použití vnitrostátní železniční dopravní cesty při provozování drážní dopravy pro dráhu celostátní a regionální. Sazby se liší pro vlaky nákladní a osobní dopravy, vztah pro jejich výpočet je shodný. Skládá se z ceny za provozování dopravní cesty a z ceny za zajištění provozuschopnosti dopravní cesty. Pro potřeby výpočtu rentability ucelených vlaků vycházíme ze vztahu 4-10, do kterého jsou následně ve vztazích 4-11 a 4-12 dosazeny konstanty C_1 a C_2 .

$$C_m = C_1 + C_2 \quad [\text{Kč}] \quad (4-10)$$

kde: C_m ... maximální cena za použití vnitrostátní železniční dopravní cesty dráhy celostátní nebo drah regionálních jedním vlakem pro sjednanou dopravní trasu [Kč],

C_1 ... maximální cena za použití vnitrostátní železniční dopravní cesty dráhy celostátní nebo drah regionálních jedním vlakem pro sjednanou dopravní trasu vztážená k provozování dopravní cesty (řízení provozu) [Kč],

C_2 ... maximální cena za použití vnitrostátní železniční dopravní cesty dráhy celostátní nebo drah regionálních jedním vlakem pro sjednanou dopravní trasu vztážená k zajištění provozuschopnosti dopravní cesty (infrastruktura dopravní cesty) [Kč].

$$C_1 = S_{1E} \cdot L_E + S_{1C} \cdot L_C + S_{1R} \cdot L_R \quad [\text{Kč}] \quad (4-11)$$

kde: S_l cena za 1 vlkm nákladního vlaku jako podíl ceny za provozování dopravní cesty (řízení provozu) na jeden vlakový kilometr na tratích dráhy celostátní zařazené do evropského železničního systému ($S_{1E} = 42,65 \text{ Kč} \cdot \text{vlkm}^{-1}$), na ostatních tratích celostátní dráhy ($S_{1C} = 38,77 \text{ Kč} \cdot \text{vlkm}^{-1}$), na drahách regionálních ($S_{1R} = 34,89 \text{ Kč} \cdot \text{vlkm}^{-1}$),

S_2 cena za 1000 hrtkm nákladního vlaku daná jako podíl ceny za zajištění provozuschopnosti dopravní cesty (infrastruktura dopravní cesty) za tisíc hrubých tunových kilometrů na tratích dráhy celostátní zařazené do evropského železničního systému ($S_{2E} = 56,51 \text{ Kč} \cdot 1000 \text{ hrtkm}^{-1}$), na ostatních tratích celostátní dráhy ($S_{2C} = 47,09 \text{ Kč} \cdot 1000 \text{ hrtkm}^{-1}$), na drahách regionálních ($S_{2R} = 35,32 \text{ Kč} \cdot 1000 \text{ hrtkm}^{-1}$),
 L_E, L_C, L_R ... vzdálenost jízdy vlaku v kilometrech na tratích dráhy celostátní zařazené do evropského železničního systému (L_E), na ostatních tratích celostátní dráhy (L_C), na drahách regionálních (L_R) [Km].

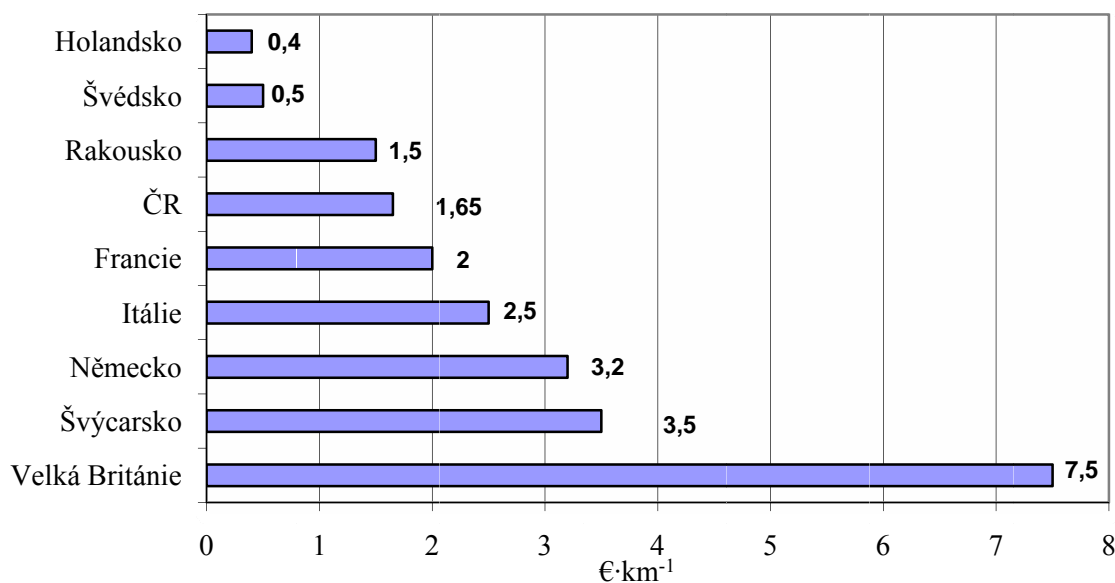
$$C_2 = \frac{Q}{1000} \cdot (S_{2E} \cdot L_E + S_{2C} \cdot L_C + S_{2R} \cdot L_R) \quad [\text{Kč}] \quad (4-12)$$

Pokud mezi sebou posuzujeme rentabilitu jednotlivých druhů ucelených vlaků, pak můžeme výpočet C_m vyjádřit na jeden kilometr celostátní tratě mezinárodního významu. To jsou totiž tratě, po kterých jsou trasy těchto vlaků nejčastěji vedeny. Po této úpravě a dosazení vztahů 4-11 a 4-12 do vztahu 4-10 dostáváme sumární vztah 4-13. Dosazením sazeb S_{IE} a S_{2E} do vztahu 4-13 byl odvozen vztah 4-14 závislosti celkové maximální ceny za použití železniční dopravní cesty na objemu přepravovaného zboží.

$$C_m = S_{IE} + \frac{Q}{1000} \cdot S_{2E} \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-13)$$

$$C_m = 42,65 + \frac{56,51}{1000} \cdot Q = 42,65 + 0,05651 \cdot Q \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-14)$$

Dosazením do rovnice 4-14 lze zjistit cenu za použití dopravní cesty na jeden kilometr celostátní tratě mezinárodního významu (43). Pokud dosadíme do tohoto vztahu za Q hodnotu 1, pak cena za použití dopravní cesty vychází $42,707 \text{ Kč} \cdot \text{t}^{-1}$. Po přepočtení této hodnoty na € vychází dle současného kurzu $25,87 \text{ Kč} \cdot \text{€}^{-1}$ (kurz ČNB ke dni 6. 11. 2009) cena za použití dopravní cesty $1,65 \text{ €} \cdot \text{km}^{-1}$. Jak je patrné z obrázku 4-3, patří tato hodnota k nižším evropským cenám za použití železniční dopravní cesty.



Zdroj:(44), autor

Obrázek 4-3: Srovnání cen za použití dopravní cesty ve vybraných zemích

Vztah 4-13 lze ještě dále rozšířit a zobecnit do podoby vztahu 4-15, ve kterém je výpočet rozšířen o proměnnou L , tedy vzdálenost.

$$C_m = (S_{1E} + \frac{Q}{1000} \cdot S_{2E}) \cdot L \quad [\text{Kč}] \quad (4-15)$$

4.2.2 Rentabilita uceleného vlaku

Otázka rentability uceleného vlaku je velmi úzce spojena s jeho vytížením. U všech výše uvedených komodit mimo kontejnerů je jejich provoz téměř výlučně v režimu ložený vlak ve směru A a prázdná souprava, tedy vyrovnávkový vlak (V_n) ve směru B . Právě paralela s touto skutečností poskytuje možnost ukázat, jak je kombinovaná doprava závislá na vytížení svých souprav.

K tomu, abychom mohli tuto paralelu vysvětlit, je potřeba vytvořit si nový koeficient, který vyjadřuje poměr mezi cenou, kterou za ucelený vlak dopravce zaplatí v případě, že je plně vytížen a mezi cenou za prázdný (vyrovnávkový) vlak. Tento koeficient označme jako k_R a jeho výpočet je uveden ve vztahu 4-16. Proměnnou, která je v cenovém výměru označována jako Q můžeme pro potřeby našeho výpočtu nahradit proměnnou m_{full} , resp. m_{empty} , tedy hrubou hmotností loženého resp. prázdného uceleného vlaku.

$$k_R = \frac{C_m^{full}}{C_m^{empty}} = \frac{S_{1E} + \frac{m^{full}}{1000} \cdot S_{2E}}{S_{1E} + \frac{m^{empty}}{1000} \cdot S_{2E}} \quad [-] \quad (4-16)$$

Výpočet indexu k_R lze ještě zjednodušit dosazením sazeb za použití dopravní cesty. Výsledný vztah je pak uveden ve vztahu 4-17.

$$k_R = \frac{42,65 + 0,05651 \cdot m^{full}}{42,65 + 0,05651 \cdot m^{empty}} \quad [-] \quad (4-17)$$

Takto byl teoreticky stanoven koeficient využití maximální ložné hmotnosti uceleného vlaku, zkráceně ho lze označit koeficientem rentability. Z krátkodobého hlediska můžeme uvažovat se vztahem ve tvaru 4-17. Obecný vztah 4-16 je vhodnější z dlouhodobého hlediska, tedy i při měnících se sazbách za použití vnitrostátní železniční dopravní cesty. Pokud porovnáme tento koeficient pro různé druhy komoditních ucelených vlaků, zjistíme, která komodita je nejcitlivější na vytížení soupravy, tedy která komodita má hodnotu tohoto indexu nejnižší. Hodnota tohoto koeficientu k_R je definována v intervalu $<1; \infty$), přičemž čím je tato hodnota vyšší, tím je komodita méně ekonomicky náchylná k nevytížení soupravy. V následující kapitole 4.2.3 bude tento nový koeficient k_R testován pro různé komoditní ucelené vlaky.

4.2.3 Porovnání koeficientů rentability pro různé komoditní ucelené vlaky

Pro porovnání byly vybrány nejčastější komodity, které se v podmínkách České republiky přepravují v ucelených vlacích. Mezi tyto komodity patří uhlí, cement, přeprava látek v cisternových vozech a kontejnery (45). Byla sestavena tabulka 4-2, ve které jsou uvedeny všechny potřebné parametry pro výpočet ceny za ucelený vlak a následně koeficientu rentability. Těmito parametry jsou typové označení vozu, délka vozu, hmotnost vozu a počet vozů v uceleném vlaku. Pro výpočet byla dále nutná znalost průměrných délek a hmotností ucelených souprav. Tyto jsou uvedeny v tabulce 4-2 a byly získány konzultacemi s odpovědnými pracovníky Správy železniční dopravní cesty, s.o. (SŽDC).

Tabulka 4-2 - Celková hmotnost a délka ucelených vlaků

Komodita	Typ vozu	Délka soupravy [m]	Celková hmotnost soupravy [t]
Kontejnery	Sggmrss	607,2	1958
Uhlí	Eas-u	350	2250
Cement	Uacs	246,5	1530
Tekuté látky	Zaes	289,8	2070

Zdroj: autor, SŽDC

Na základě těchto vstupních údajů, byly dle vztahů 4-13 a 4-14 v tabulce 4-3 vypočteny náklady na ložený a prázdný kilometr uceleného vlaku. Dle vztahu 4-17 jsou v posledním sloupci uvedeny hodnoty **koeficientu rentability** k_R .

Tabulka 4-3 - Vstupní hodnoty a výpočet hodnot koeficientů k_R

Komodita	Počet náprav [počet]	Typ vozu	Délka vozu [m]	Hmotnost vozu [t]	Počet vozů v uceleném vlaku [počet]	Cena za ucelený vlak [Kč · km ⁻¹]		Koeficient k_R
						Ložený	Prázdný	
Kontejnery	6	Sggmrss	27,6	29	22	153,28	78,70	1,95
Uhlí	4	Falls	14	22,7	25	169,78	74,71	2,27
Cement	4	Uacs	14,5	23	17	129,10	64,74	1,99
Tekuté látky	4	Zaes	12,6	26	23	159,61	76,44	2,09

Zdroj: autor

Z tabulky 4-3 je patrné, že nejnižší hodnotu koeficientu k_R vykazují právě kontejnery. Lze tedy konstatovat, že z hlediska rentability nákladů resp. citlivosti na vytížení soupravy vykazuje nejhorší vlastnosti právě KD. Tato skutečnost koresponduje také se zkušenostmi provozovatelů linek KD, kteří se shodují na tom, že rentabilita jejich vlaků rychle klesá se snižujícím se vytížením (46).

Správnost tohoto předpokladu je potvrzena také faktem, že kombinovaná doprava má z těchto čtyř druhů ucelených vlaků nejnižší poměr mezi celkovou hmotností loženého vlaku a celkovou hmotností prázdného vlaku. Tyto poměry jsou v tabulce 4-4.

Tabulka 4-4 - Poměr mezi celkovou hmotností ložených a prázdných vlaků

Komodita	Typ vozu	Celková hmotnost soupravy [t]		Poměr hmotnosti loženého a prázdného vlaku
		Ložené vozy	Prázdné vozy	
Kontejnery	Sggmrss	1958	638	3,06
Uhlí	Falls	2250	567,5	3,96
Cement	Uacs	1530	391	3,91
Tekuté látky	Zaes	2070	598	3,46

Zdroj: autor

Právě KD tak již z podstaty parametrů ucelených souprav disponuje nižší schopností využití ložného prostoru než ostatní druhy ucelených vlaků. Navíc je tato nevýhoda umocněna faktem, že u ucelených vlaků KD se oproti ostatním zkoumaným druhům nákladu nejedná o problematiku směru loženého a prázdného, ale oba směry je potřeba vytižit co možná nejvíce. Pokud by u ostatních druhů ucelených vlaků nedošlo k naplnění celého vlaku, tak by se prázdné vozy v loženém směru do soupravy nepřipojovaly. Vlak by byl tak zkrácen a jeho rentabilita by opět měla koeficient dle tabulky 4-4 resp. 4-3. U vlaku KD by se tímto nevytížením koeficient k_R ještě dále snížil, protože není možné prázdné vozy ze soupravy vyřadit z důvodu jejich možné potřeby v cílovém terminálu.

4.2.4 Dílčí závěr

Problematika rentability se v současné době více než kdy jindy dotýká všech odvětví hospodářství. Nejinak je na tom doprava a to zejména doprava nákladní. Produktem, který byl a je, zdrojem nejlepších příjmů v železniční nákladní dopravě, jsou ucelené vlaky. Také u nich však musíme sledovat jejich vytížení. Předložený koeficient k_R ukazuje, které komodity vykazují největší citlivost na vytížení soupravy uceleného vlaku.

Ovšem je potřeba uvést, že tento koeficient postihuje pouze problematiku z pohledu platby za dopravní cestu. Při důkladnější analýze rentability je nutné zkoumat také průměrnou cenu zboží v jednom uceleném vlaku. Tak bychom byli schopni tento koeficient určit pro každou z komodit ještě přesněji, protože se dostáváme z oblasti hmotnostní rentability do oblasti rentability finanční, která je důležitá pro ekonomické

řízení. Získat tato čísla je velmi náročné, navíc vysoká variabilita těchto hodnot by zatížila výpočet statisticky významnou chybou.

4.3 Teoretický základ matematického modelování nákladů

V kapitole 3.4 byl prezentován základní princip, na jehož základě bude provedeno modelování nákladů jednotlivých systémů KD a přímé silniční dopravy. Dále byly identifikovány jednotlivé druhy nákladů každého zkoumaného systému KD a přímé silniční dopravy. V této kapitole budou postupně všechny náklady z tabulky 3-1 rozklíčovány pomocí matematických vztahů a převedeny na jednotkové náklady (peněžní jednotky na kilometr).

Náklady na **povinné ručení**, jeho výpočet je uveden vztahem 4-18.

$$c_{PR} = \frac{PR}{L_R} \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-18)$$

kde: c_{PR} náklady na povinné ručení na kilometr [$\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}$],
 PR sazba povinného ručení na rok [Kč],
 L_R počet kilometrů ujetých za rok [km].

Sazba **silniční daně** podle vztahu 4-19. U tohoto nákladového ukazatele je důležité zohlednit tabulku 1-1, která uvádí výše slev na silniční dani při zapojení do KD.

$$c_{SD} = \frac{(1 - k_{SD}) \cdot SD}{L_R} \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-19)$$

kde: c_{SD} náklady na silniční daň na kilometr [$\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}$],
 SD sazba silniční daně na rok [Kč],
 L_R počet kilometrů ujetých za rok [km],
 k_{SD} koeficient silniční daně dle tabulky 1-1 [-].

Významnou položkou kalkulace nákladů je položka **odpisů**. Jejich výše je závislá na pořizovací ceně, počtu ujetých kilometrů za rok a na způsobu odepisování. Vztah pro výpočet ročních odpisů je ve vztahu 4-20.

$$c_{odp} = \frac{PC}{L_R \cdot t_{odp}} \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}] \quad (4-20)$$

kde: c_{odp} náklady na odpisy na kilometr [Kč·km⁻¹·rok⁻¹],
 PC pořizovací cena [Kč],
 L_R počet kilometrů ujetých za rok [km],
 t_{odp} doba odepisování¹³⁾ [roky].

Náklady na **pohonné hmoty** (dále jen PHM). Do kalkulace jsou započítány náklady na motorovou naftu a tekutinu AdBlue¹⁴⁾. Výpočet nákladů na PHM upravuje vztah 4-21, doplněný o spotřebu AdBlue (obvykle se uvádí jako 5 % spotřeby motorové nafty).

$$c_{PHM} = \frac{P_{nafta} \cdot S_{nafta} + P_{AdBlue} \cdot S_{AdBlue}}{100} = \frac{1,05 \cdot (P_{nafta} + P_{AdBlue})}{100} \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-21)$$

kde: c_{PHM} náklady na PHM na kilometr [Kč·km⁻¹],
 P_{nafta} cena nafty [Kč·l⁻¹],
 S_{nafta} spotřeba nafty na 100 km [l·100km⁻¹],
 P_{AdBlue} cena AdBlue [Kč·l⁻¹],
 S_{AdBlue} spotřeba AdBlue na 100 km [l·100km⁻¹].

Významným, ale těžko přesně kvantifikovatelnou nákladovou položkou je **mýto**. Sazby mýtného jsou velmi přesně stanoveny, ale kvantifikovat obecný koeficient, který by stanovil průměrnou část cesty vozidla po zpoplatněných komunikacích je velmi obtížné. Autor disertační práce se o tento výpočet pokusil a publikoval jej v článku (47). Vzhledem k omezeným možnostem internetového mýtného kalkulátoru a s rozšířením zpoplatněných úseků však tento výpočet ztratil na aktuálnosti i přesnosti. Ve vztahu 4-22 je tak uveden pouze obecný vztah pro výpočet nákladů na mýtné a ve výpočtu bude koeficient vyjadřující poměr vzdáleností ujetých po zpoplatněných komunikacích roven jedné.

¹³⁾ Doba odepisování je závislá na zařazení do odepisové skupiny a na způsobu odepisování. Pro výpočet bylo zvoleno rovnoměrné odepisování. Automobily pro přepravu nákladu kategorií N2 a N3 jsou zařazeny do 2. odepisové skupiny (položka 2-57) s dobou odepisování 5 let.

¹⁴⁾ vodný roztok močoviny, více na http://www.irk-diesel.cz/ad_blue.html

$$c_{mýto} = C_{mýto}^{dálnice} \cdot \frac{l_{dálnice}}{l_{celkem}} + C_{mýto}^{I.třída} \cdot \frac{l_{I.třída}}{l_{celkem}} = \frac{(C_{mýto}^{dálnice} \cdot l_{dálnice} + C_{mýto}^{I.třída} \cdot l_{I.třída})}{l_{celkem}} \text{ [Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-22)$$

kde: $c_{mýto}$ náklady na mýtné na kilometr [Kč·km⁻¹],

$C_{mýto}^{dálnice}$ sazba mýtného na dálnici [Kč·km⁻¹],

$C_{mýto}^{I.třída}$ sazba mýtného na dálnici [Kč·km⁻¹],

$l_{dálnice}$ vzdálenost ujetá po zpoplatněných dálnicích [km],

$l_{I.třída}$ vzdálenost ujetá po zpoplatněných silnicích I. třídy [km],

l_{celkem} celková ujetá vzdálenost [km].

Náklady na **mzdu řidiče** jsou vyjádřeny vztahem 4-23, zohledňuje pouze hodinovou mzdu řidiče a průměrnou rychlost vozidla.

$$c_{mzda} = \frac{HS}{V_{NA}} \text{ [Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-23)$$

kde: c_{mzda} náklady na plat řidiče na kilometr [Kč·km⁻¹],

HS hodinová sazba řidiče [Kč],

V_{NA} průměrná rychlost nákladního auta [km·h⁻¹].

Náklady na **pneumatiky** lze stanovit obtížně. Z hlediska kalkulace je přiřazena proměnná c_{pneu} . Její hodnota pak je stanovena na základě konzultací s firmou DACHSER Czech Republic. Obdobně je tomu u **pronájmu přepravní jednotky**. Také hodnota proměnné c_{ISO} byla stanovena na základě zkušeností z praxe podle údajů společnosti Hangartner AG a ČSKD Intrans. Poslední nákladová položka, **cena za přepravu po železnici** a její vyjádření na kilometr v podobě proměnné $c_{ŽD}$, je dále předmětem matematického modelování. Na základě modelu lze stanovit, při jakých hodnotách $c_{ŽD}$, je ekonomicky výhodné provozovat KD. Uvedené modelování má významné uplatnění pro doprovázenou KD.

Stanovené proměnné vstupují do výpočtu nákladů pro jednotlivé druhy dopravy. V tabulce 3-1 jsou v každé z buněk uvedeny hodnoty buď *ano*, nebo *ne*, což značí, zda se daná nákladová položka v kalkulaci vyskytuje nebo nevyskytuje. Uvedený zápis lze nahradit binární proměnnou b_{ij} , která bude nabývat hodnotu 1 v případě, že je v buňce uvedeno *ano* a 0 v případě, že je v buňce uvedeno *ne*. Pro obecný výpočet nákladů jednotlivých zkoumaných druhů dopravy lze použít obecný a jednotný vztah 4-24.

$$C_j = \sum_i c_{i,j} \cdot b_{i,j} \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-24)$$

kde: C_j celkové náklady j -tého druhu dopravy [$\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}$],
 c_{ij} i -tý náklad j -tého druhu dopravy [$\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}$],
 b_{ij} binární proměnná pro i -tý náklad j -tého druhu dopravy.

Po provedení stanovení základních položek nákladových funkcí lze přistoupit k matematickému modelu nákladů jednotlivých druhů dopravy. Proces je jednoduchý u třech ze čtyř zkoumaných druhů dopravy (kontejnery ISO řady 1, sedlové návěsy a přímá silniční doprava). Jejich náklady, po zohlednění binární proměnné, jsou uvedeny ve vztazích 4-25 (C_{ISO} – kontejnery ISO řady 1), 4-26 (C_{SN} – sedlové návěsy) a 4-27 (C_{PSD} – přímá silniční doprava).

$$C_{ISO} = (c_{ISO} + c_{\check{Z}D}) \cdot l \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-25)$$

$$C_{SN} = (c_{PR} + c_{SD} + c_{odp} + c_{\check{Z}D}) \cdot l \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-26)$$

$$C_{PSD} = (c_{PR} + c_{SD} + c_{odp} + c_{PHM} + c_{m\check{y}to} + c_{mzda} + c_{pneu}) \cdot l \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-27)$$

Složitější situace je při určení nákladové funkce pro doprovázenou KD. Zde vstupuje do hry faktor optimality délky linky. Tento faktor¹⁵⁾ byl zmíněn již v kapitole 1.2 disertační práce. Výpočet nákladů na linku doprovázené KD má dvě části, z nichž jedna je konstantní (C^{fix}) a druhá se mění v závislosti na denní době odpočinku (C^{var}), rychlosti vlaku KD a délce linky KD. Výsledná nákladová funkce má tvar 4-28.

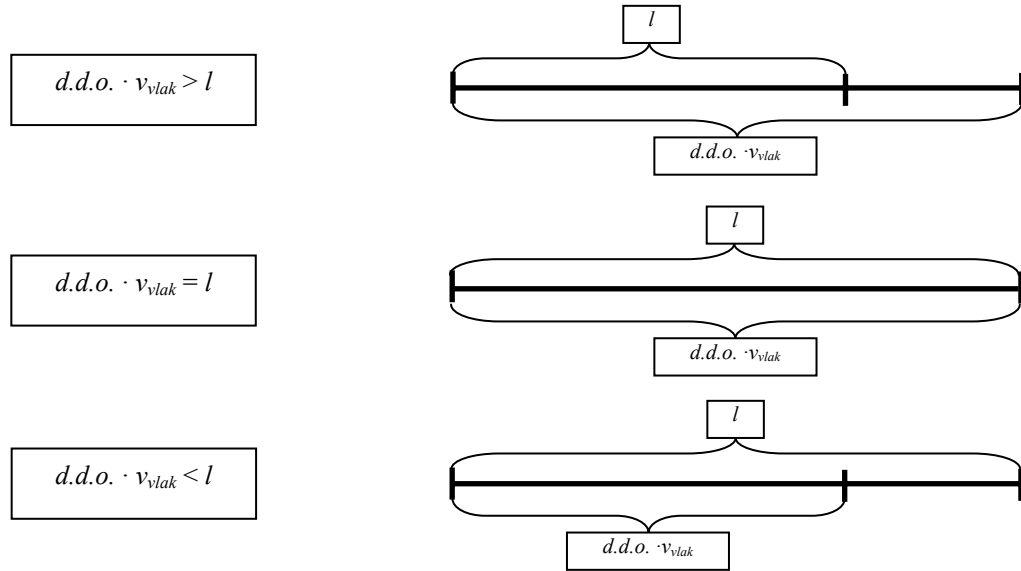
$$C_{RoLa} = C_{RoLa}^{fix} + C_{RoLa}^{var} \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-28)$$

Konstantní část nákladové funkce vyjadřuje vztah 4-29 a tato část je shodná s funkcí 4-26, která popisuje průběh nákladů při přepravě sedlových návěsů.

$$C_{RoLa}^{fix} = (c_{PR} + c_{SD} + c_{odp} + c_{\check{Z}D}) \cdot l \quad [\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-29)$$

¹⁵⁾ Toto optimum se nachází v intervalu mezi vzdáleností, která je ekonomicky nevýhodná, protože nepřeveze během čerpání denní doby odpočinku silniční vozidlo na významnou vzdálenost a mezi vzdáleností, která je příliš velká, takže by doba pobytu vozidla na vlaku KD výrazně přesáhla denní dobu odpočinku. Tím nabíhá řidiči neproduktivní čas, ve kterém již mohl řídit, ale je stále vázán na vlak KD.

Variabilní část nákladové funkce je závislá na vztahu součinu denní doby odpočinku ($d.d.o.$) s rychlostí vlaku (v_{vlak}) doprovázené KD a délky linky KD (l). Prakticky mohou nastat tři možné případy, které jsou znázorněny na obrázku 4-4.



Zdroj: autor

Obrázek 4-4: Variabilní složka pro doprovázenou KD

Pokud převedeme obrázek 4-4 do podoby matematického zápisu, pak bude velikost variabilní složky nákladů pro doprovázenou KD dána vztahem 4-30.

$$\forall l \in \begin{cases} (0; d.d.o. \cdot v_{vlak}) \\ \langle d.d.o. \cdot v_{vlak} \rangle \\ (d.d.o. \cdot v_{vlak}; \infty) \end{cases} \quad C_{RoLa}^{var} = \begin{cases} (c_{mjto} + c_{mzda} + c_{PHM} + c_{pneu}) \cdot (d.d.o. - l) \\ 0 \\ c_{mzda} \cdot (l - d.d.o. \cdot v_{vlak}) \end{cases} \text{ [Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-30)$$

Provedením dosazení proměnných c_i do vztahů 4-29 a 4-30 vzniká modifikovaný vztah 4-31 pro jednotlivé intervaly délky linky l , který vychází ze vztahu 4-28.

$$\forall l \in \begin{cases} (0; d.d.o. \cdot v_{vlak}) \\ \langle d.d.o. \cdot v_{vlak} \rangle \\ (d.d.o. \cdot v_{vlak}; \infty) \end{cases} \quad C_{RoLa} = \begin{cases} (c_{zD} + c_{PR} + c_{SD} + c_{odp} - c_{mjto} - c_{mzda} - c_{PHM} - c_{pneu}) \cdot l + (d.d.o. \cdot v_{vlak}) \cdot (c_{mjto} + c_{mzda} + c_{PHM} + c_{pneu}) \\ (c_{zD} + c_{PR} + c_{SD} + c_{odp}) \cdot l \\ (c_{zD} + c_{PR} + c_{SD} + c_{odp} + c_{mzda}) \cdot l - d.d.o. \cdot v_{vlak} \cdot c_{mzda} \end{cases} \text{ [Kč} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (4-31)$$

Modelování nákladů s konkrétními hodnotami se v praktické aplikaci věnuje kapitola 5.4. V kapitole 1.2 bylo dále uvedeno, že bude hledán interval přípustných délek linky doprovázené KD a také jeho optimum¹⁶⁾.

Na základě matematických výpočtů bylo teoreticky zjištěno, že lze naplnit výše zmíněný předpoklad z analytické kapitoly 1.2. Byly vypočteny vzdálenosti, které ohraničují oblast přípustných řešení včetně optimální vzdálenosti jsou uvedeny ve vztazích 4-32 až 4-34. Tyto vztahy také pomohly odhalit, na čem závisí velikost těchto vzdáleností.

$$l_{\min} = \frac{c_{mýto} + c_{pneu} + c_{mzda} + c_{PHM}}{c_{SD} + 2 \cdot (c_{mýto} + c_{pneu} + c_{mzda} + c_{PHM}) - c_{\check{Z}D}} \cdot v_{vlak} \quad [\text{km}] \quad (4-32)$$

$$l_{opt} = d.d.o. \cdot v_{vlak} \quad [\text{km}] \quad (4-33)$$

$$l_{\max} = \frac{c_{mzda} \cdot d.d.o.}{c_{\check{Z}D} - c_{mýto} - c_{pneu} - c_{SD} - c_{PHM}} \cdot v_{vlak} \quad [\text{km}] \quad (4-34)$$

Na základě provedeného teoretického matematického modelování nákladů jsou v aplikační části do vztahů dosazeny reálné hodnoty z praktických sledování. Na jejich základě byla ověřena správnost a funkčnost navrženého matematického modelování nákladů.

¹⁶⁾ V aplikační části disertační práci jsou tyto koeficienty funkcí 1-4 a 1-5 podrobeny dalšímu zkoumání, aby mohla být následně vypočtena optimální vzdálenost x_{opt} .

5 Aplikace návrhů v podmínkách EU s ohledem na ČR

V kapitole 5 jsou obecné návrhy vycházející z kapitoly 4 aplikovány v podmínkách EU resp. ČR. Jako první je aplikován nový algoritmus pro určení optimální vzdálenosti z kapitoly 4.1 doplněný o shlukovou analýzu tak, aby bylo možno určit intervaly časů manipulací. Dále je provedeno matematické modelování nákladů a jsou uvedena doporučení, která by měla být dodržena při zavádění nových linek KD.

5.1 Aplikace nově navrženého algoritmu pro výpočet optimální rozvozní vzdálenosti – Varianta 1

V kapitole 4.1.1 je popsán nově navržený algoritmus pro určení optimální rozvozní vzdálenosti. Součástí kapitoly je praktický příklad užití tohoto algoritmu v podmínkách EU resp. ČR.

V aplikaci nově navrženého algoritmu je velmi důležitým a základním krokem stanovení vstupních parametrů, které pak ovlivňují celý průběh a také relevanci výsledku. Mezi vstupní údaje, které byly v popisu algoritmu označeny, jako konstantní patří:

- denní fixní částka za jedno vozidlo $P = 355 \text{ €}^{17)}$,
- průměrná rychlost vozidla $v_{pr} = 1,08 \text{ km} \cdot \text{min}^{-1}$,
- maximální denní doba práce $T_{max} = 720 \text{ min}$,
- maximální denní doba strávená řízením včetně přestávek v době řízení $T_{\check{r}max} = 600 \text{ min}$.

Ke konstantním hodnotám přibývají proměnné, které tvoří hlavní řádek a sloupec všech matic. V hlavním řádku jsou součty hodnot dob manipulací T_{NV} v terminálu a u zákazníka. Hodnoty byly stanoveny diskrétně a celočíselně v rozmezí od 20 do 190 minut, ve variantě 1 s diferencí 10 minut. V hlavním sloupci pak jsou počty obrátů n_o , které vozidlo během jednoho dne vykoná. Počet obrátů byl stanoven celočíselně v rozmezí od 1 do 25. Na základě stanovení těchto hodnot je pomocí vztahu 4-3 vypočtena **prvotní matice A**, kterou je pak dle vztahů 4-4 a 4-5 možné sestavit **výslednou matici A**. Výřez z této **matice A** je v tabulce 5-1, **prvotní i výsledná matice A** jsou v příloze 2-1. Nevyplněné buňky v tabulkách 5-1 – 5-5, stejně tak jako v příloze 2 znamenají, že v této buňce se nenachází přípustné řešení.

¹⁷⁾ hodnota paušálu byla stanovena na základě konzultací s firmou Hangartner AG

Tabulka 5-1: Výřez z výsledné matice A

n_o	T_{NV}	20	30	40	50	60	70	80
1		690	690	690	690	690	690	690
2		690	690	690	680	660	640	620
3		690	690	660	630	600	570	540
4		690	660	620	580	540	500	460
5		680	630	580	530	480	430	380
6		660	600	540	480	420	360	300
7		640	570	500	430	360	290	220
8		620	540	460	380	300	220	140
9		600	510	420	330	240	150	60
10		580	480	380	280	180	80	
11		560	450	340	230	120	10	
12		540	420	300	180	60		

Zdroj: autor

Dalším krokem je výpočet **matice B**, která je vypočtena na základě rozdělení hodnot dle tabulky 4-1, podle vztahu 4-6. Výřez z **matice B** je v tabulce 5-2 a celá **matice B** je v příloze 2-2.

Tabulka 5-2: Výřez z matice B

n_o	T_{NV}	20	30	40	50	60	70	80
1		600	600	600	600	600	600	600
2		600	600	600	590	570	550	530
3		600	600	570	540	510	525	495
4		600	570	530	535	495	455	415
5		590	540	535	485	435	385	335
6		570	510	495	435	375	315	255
7		550	525	455	385	315	245	220
8		530	495	415	335	255	220	140
9		510	465	375	285	240	150	60
10		535	435	335	235	180	80	
11		515	405	295	230	120	10	
12		495	375	255	180	60		

Zdroj: autor

Popis algoritmu doporučuje před vytvořením **matice C** zkontrolovat, zda při výpočtu **matice B** nevznikly prvky menší nebo rovné 0, které jsou pro řešení

nepřípustné. Kontrola stejně jako výpočet **matice C** je provedena pomocí vztahu 4-7. V tabulce 5-3 je opět uveden výřez z této **matice C**, úplná tabulka je v příloze 2-3.

Tabulka 5-3: Výřez z matice C

n_o	T_{NV}	20	30	40	50	60	70	80
1		325,00	325,00	325,00	325,00	325,00	325,00	325,00
2		162,50	162,50	162,50	159,79	154,38	148,96	143,54
3		108,33	108,33	102,92	97,50	92,08	94,79	89,38
4		81,25	77,19	71,77	72,45	67,03	61,61	56,20
5		63,92	58,50	57,96	52,54	47,13	41,71	36,29
6		51,46	46,04	44,69	39,27	33,85	28,44	23,02
7		42,56	40,63	35,21	29,79	24,38	18,96	17,02
8		35,89	33,52	28,10	22,68	17,27	14,90	9,48
9		30,69	27,99	22,57	17,15	14,44	9,03	3,61
10		28,98	23,56	18,15	12,73	9,75	4,33	
11		25,36	19,94	14,53	11,33	5,91	0,49	
12		22,34	16,93	11,51	8,13	2,71		

Zdroj: autor

Z hlediska aplikace nově navrženého algoritmu je nejvýznamnější **matice D**. V této matici jsou hodnoty z **matice B** přepočteny dle vztahu 4-8 na sazby p_{ij} . V tabulce 5-4 je výřez z **matice D**. Plná verze je v příloze 2-4.

Tabulka 5-4: Výřez z matice D

n_o	T_{NV}	20	30	40	50	60	70	80
1		0,55 €	0,55 €	0,55 €	0,55 €	0,55 €	0,55 €	0,55 €
2		0,55 €	0,55 €	0,55 €	0,56 €	0,57 €	0,60 €	0,62 €
3		0,55 €	0,55 €	0,57 €	0,61 €	0,64 €	0,62 €	0,66 €
4		0,55 €	0,57 €	0,62 €	0,61 €	0,66 €	0,72 €	0,79 €
5		0,56 €	0,61 €	0,61 €	0,68 €	0,75 €	0,85 €	0,98 €
6		0,57 €	0,64 €	0,66 €	0,75 €	0,87 €	1,04 €	1,29 €
7		0,60 €	0,62 €	0,72 €	0,85 €	1,04 €	1,34 €	1,49 €
8		0,62 €	0,66 €	0,79 €	0,98 €	1,29 €	1,49 €	2,34 €
9		0,64 €	0,70 €	0,87 €	1,15 €	1,37 €	2,18 €	5,46 €
10		0,61 €	0,75 €	0,98 €	1,39 €	1,82 €	4,10 €	
11		0,64 €	0,81 €	1,11 €	1,42 €	2,73 €	32,77 €	
12		0,66 €	0,87 €	1,29 €	1,82 €	5,46 €		

Zdroj: autor

Maticí D končí výpočtová část nově navrženého algoritmu. Tato je doplněna o možné zúžení přípustných řešení dle zadaného intervalu přípustných sazeb tak, jak je uvedeno ve vztahu 4-9. Na základě konzultací s podnikatelskými subjekty v dopravě bylo navrženo zúžení řešení do intervalu přípustných sazeb¹⁸⁾ 0,6 – 0,7 €·km⁻¹. Výsledkem zúžení a jeho promítnutí do **matice C** byla vypočtena **matice E**, jejíž výřez je v tabulce 5-5 a plná verze v příloze 2-5.

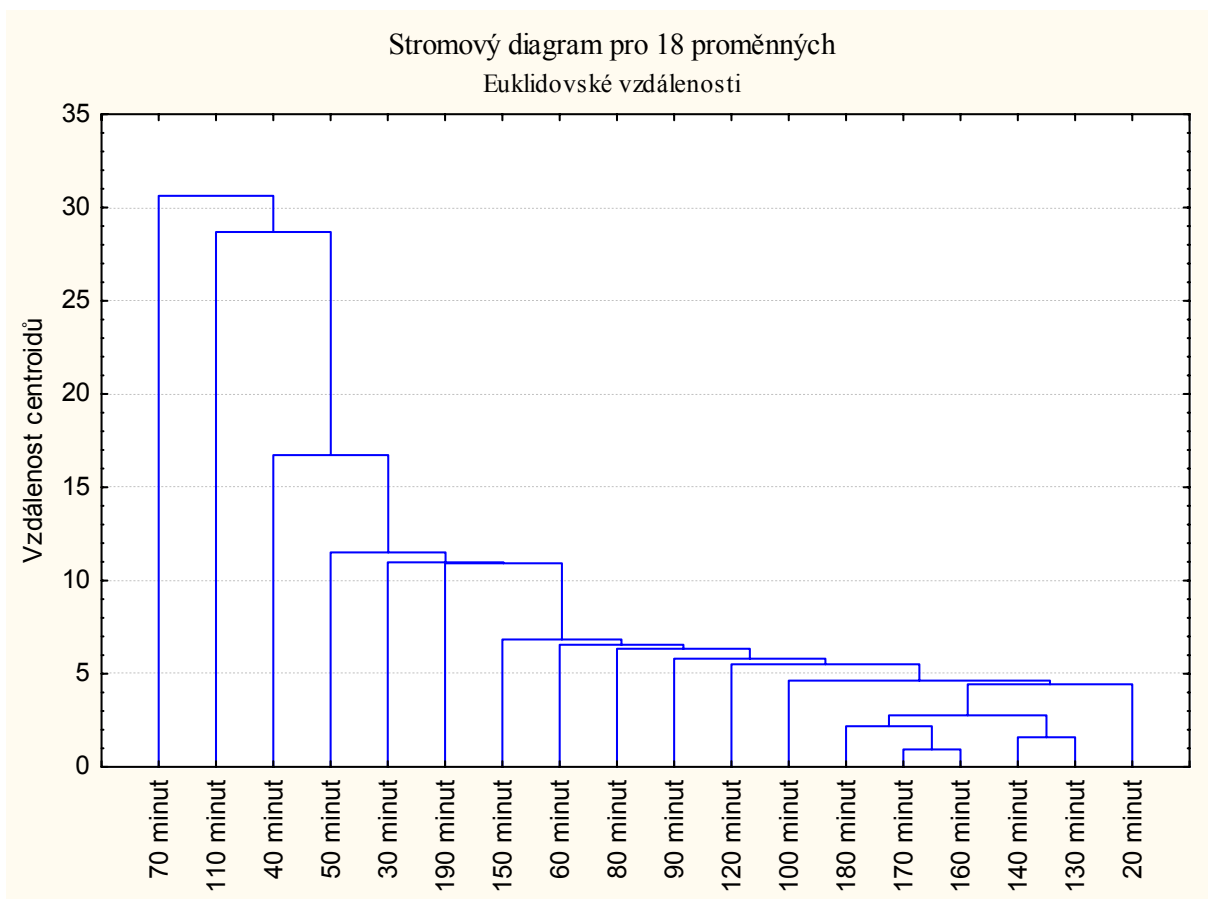
Tabulka 5-5: Výřez z matice E

n_o	T_{NV}	20	30	40	50	60	70	80
1								
2								143,54
3					97,50	92,08	94,79	89,38
4				71,77	72,45	67,03		
5			58,50	57,96	52,54			
6			46,04	44,69				
7			40,63					
8	35,89		33,52					
9	30,69							
10	28,98							
11	25,36							
12	22,34							

Zdroj: autor

V kapitole 4.1.2 je navrženo rozšíření algoritmu o shlukovou analýzu. Dle předpokladu má toto rozšíření zajistit lepší orientaci ve výsledku v podobě vytvoření intervalů dob manipulací. Postup byl otestován v programu STATISTICA 8.0 na **maticích C** a **E**. Nejprve bylo testováno, zda lze použít shlukovou analýzu pro **matici C**, která obsahuje úplné řešení bez zúžení do intervalu přípustných sazeb. Výsledek shlukové analýzy **matice C** je na obrázku 5-1.

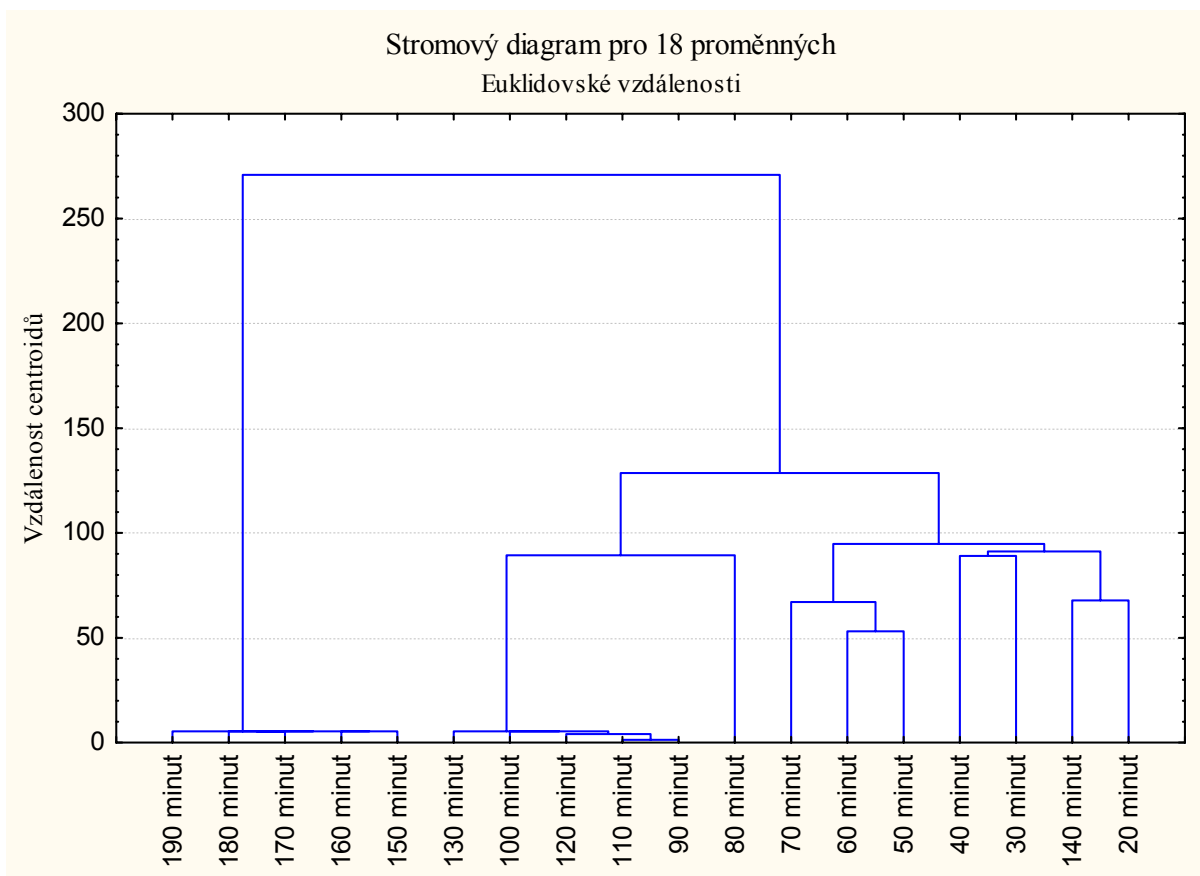
¹⁸⁾ interval přípustných sazeb byl zvolen na základě konzultací se společností Hangartner AG



Zdroj: autor

Obrázek 5-1: Shluková analýza matice C pro variantu 1

Z obrázku 5-1 je patrné, že shluková analýza **matice C** nepřináší očekávaný výsledek v podobě vytvoření použitelných intervalů, které by řešení zjednodušily, neboť nedělí **matici C** na podstatné shluky, ale dochází pouze ke schodovité kumulaci jednotlivých sloupců na sebe. Navíc řazení jednotlivých sloupců v analýze už z principu nedovoluje vytvoření intervalů. Další maticí testovanou pomocí shlukové analýzy byla **matice E**. Výsledek shlukové analýzy je na obrázku 5-2.



Obrázek 5-2: Shluková analýza matice E pro variantu 1

Z obrázku 5-2 je patrné, že použití shlukové analýzy pro **matici E** vede k předpokládanému cíli v podobě vzniku intervalů dob manipulací, protože na obrázku 5-2 jsou viditelné shluky. Řazení sloupců dovoluje vytvoření intervalů. Jediný sloupec, který vybočuje z tohoto předpokladu, je sloupec 140 minut. Ten, ale při pohledu do **matice C** neobsahuje žádné hodnoty, proto je možné jej zanedbat. Výsledkem jsou tři velké shluky, ze kterých lze vytvořit intervaly. Přehled těchto intervalů je v tabulce 5-6. Součástí tabulky 5-6 je kromě intervalů dob manipulací také průměrná hodnota z buněk přípustných řešení v **matici E** připadajících do příslušného intervalu dob manipulací.

Tabulka 5-6: Intervaly dob manipulací pro variantu 1

Interval dob manipulací [min]	Průměrná rozvozní vzdálenost [km]
<20, 80)	52,24
<80, 130)	131,16
<150, 190)	281,67

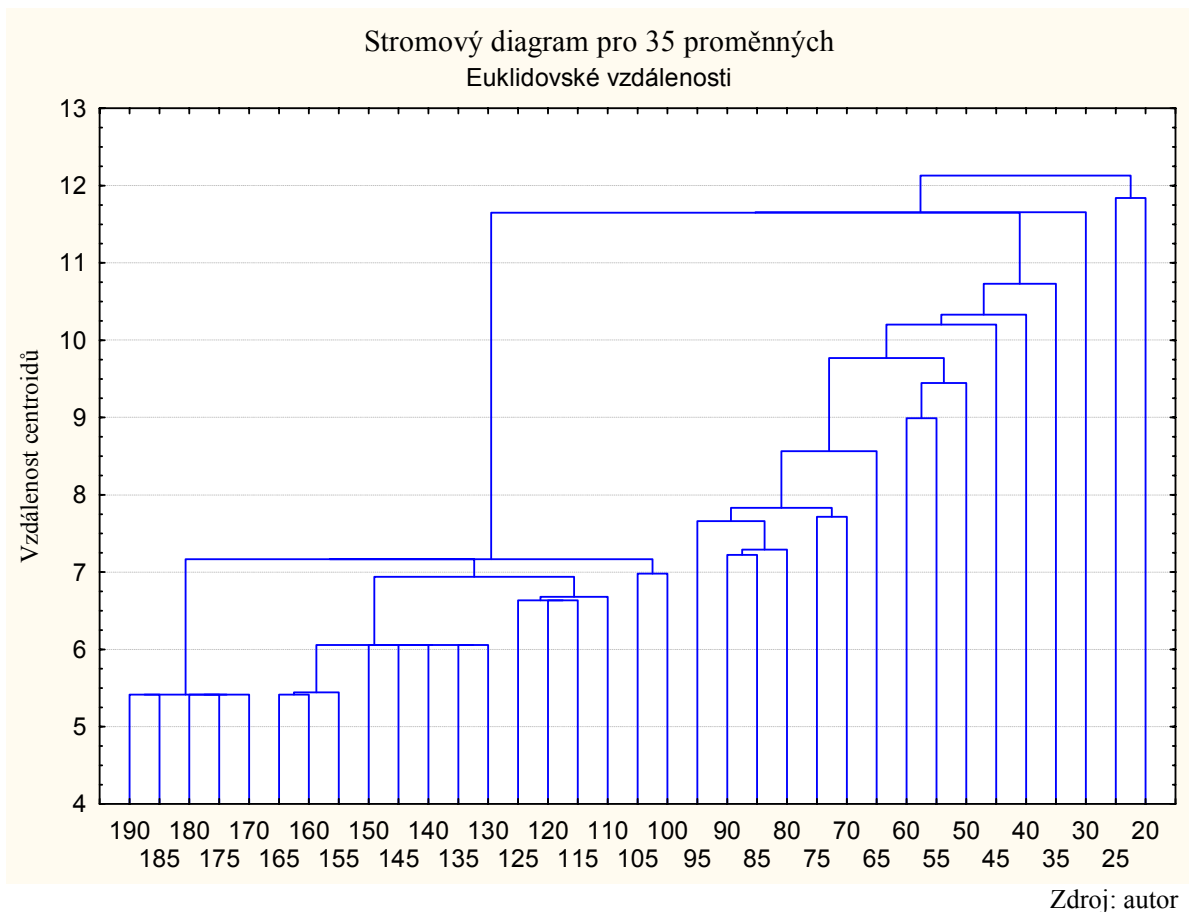
Zdroj: autor

Z tabulky 5-6 je patrné, že průnik intervalů dob manipulací nepokrývá celou oblast výpočetní matice. Důvodem je nepřítomnost hodnot ve sloupci s označením 140 minut. Není tak možné jednoznačně určit, do kterého intervalu tento sloupec zařadit, protože neovlivňuje výpočet průměrné rozvozní vzdálenosti. Z tabulky 5-6 dále vyplývá hodnota optimální rozvozní vzdálenost při nalezených intervalech dob manipulací.

5.2 Aplikace nově navrženého algoritmu pro výpočet optimální rozvozní vzdálenosti – Varianta 2

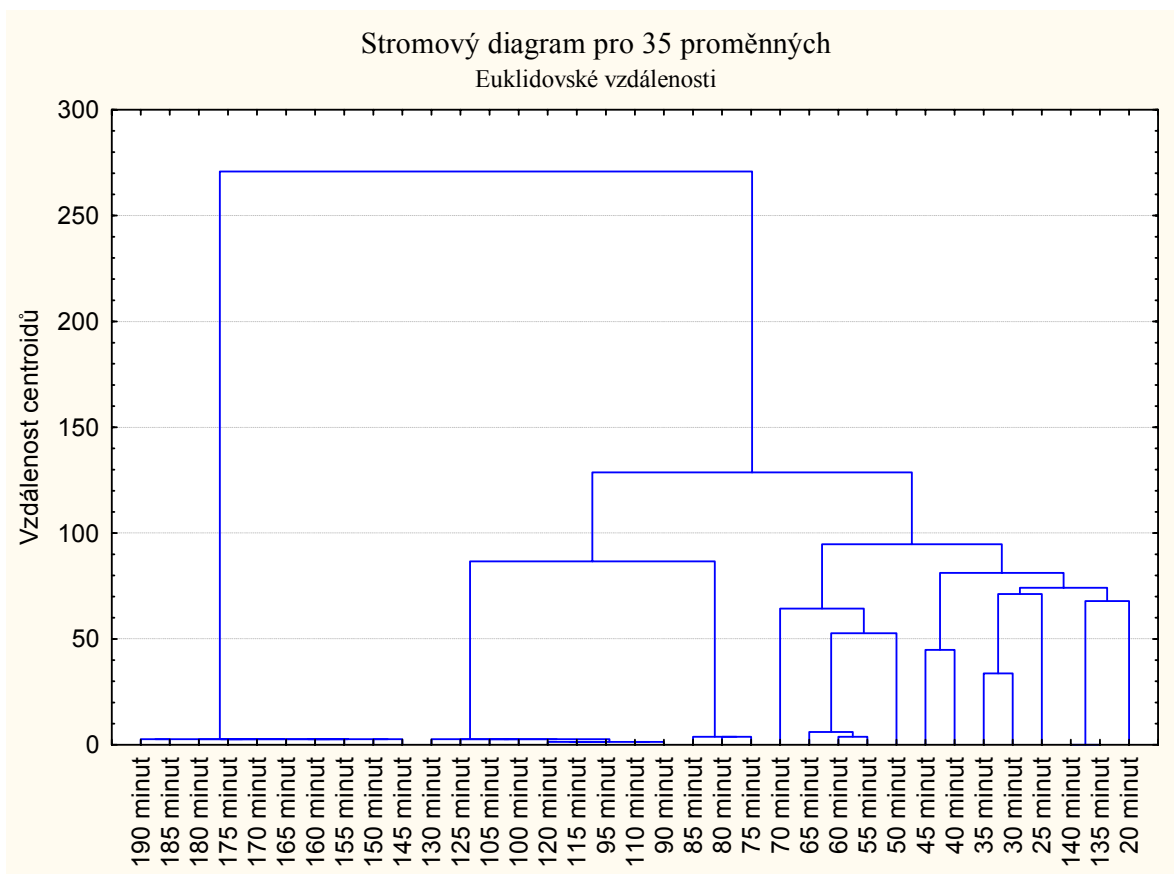
Ve variantě 1 aplikace nově navrženého algoritmu, jsou difference jednotlivých hodnot dob manipulací rovny 10 minutám. Jako druhá varianta je zvolen stav, kde je nastavena tato difference na poloviční hodnotu, tedy 5 minut. Testovaným kritériem je, zda se změní řešení při použití této poloviční difference, případně zda dojde k výrazné změně řešení. Druhá aplikace tak pomůže zjistit, zda z hlediska přesnosti výsledku stačí difference 10 minut či zda je lepší použít dvojnásobnou matici s diferencí 5 minut. Použití matice s diferencí 10 minut je samozřejmě méně pracné, ale na druhou stranu ani rozšíření výpočtu není časově náročné. Ve druhé variantě byl také zvýšen počet řádků matice, tedy denní počet obrátů cca o 10 %, z počtu 25 na 28.

Postup řešení byl u druhé varianty stejný jako ve variantě 1. Proto zde nejsou uvedeny výřezy **matic A – E**, tak jako u varianty 1. Všechny kompletní tabulky jsou uvedeny v přílohách 3-1 až 3-5. Výsledkem je opět shluková analýza **matic C a E**. Tyto analýzy jsou zakresleny na obrázcích 5-3 a 5-4.



Obrázek 5-3: Shluková analýza matice **C** pro variantu 2

Z obrázků 5-3 a 5-4 je patrné, že situace je obdobná jako u varianty 1. Shluková analýza **matice C** opět nepřináší možnost vytvoření vhodných intervalů, ale řazení sloupců je oproti obrázku 5-1 vzestupné. Lze tak konstatovat, že toto řešení je z hlediska použitelnosti a relevance lepší než je tomu u **matice C** s dvojnásobnou diferencí dob manipulací. Obrázek 5-4, stejně tak jako obrázek 5-2 u varianty 1, ukazuje, že hodnoty přípustných řešení lze, po zavedení intervalu přípustných sazeb rozdělit do třech shluků (intervalů). Přehlednost řešení narušují pouze sloupce 135 minut a 140 minut, které ale neobsahují žádné hodnoty, a proto je možné je zanedbat. Průměrné hodnoty rozvozních vzdáleností pro variantu 2 jsou v tabulce 5-7.



Obrázek 5-4: Shluková analýza **matic** E pro variantu 2

Tabulka 5-7: Intervaly dob manipulací pro variantu 2

Interval dob manipulací [min]	Průměrná rozvozní vzdálenost [km]
<20, 70)	53,52
<75, 130)	128,65
<145, 190)	283,02

Zdroj: autor

Z tabulky 5-7 je opět patrné, že dochází ke stejnému problému jako u varianty 1. Průnik intervalů dob manipulací nepokrývá celou výpočetní matici. Důvodem je nepřítomnost hodnot ve sloupci s označením 135 minut a 140 minut. Není tak opět možné jednoznačně určit, do kterého intervalu tyto sloupce zařadit.

5.3 Porovnání obou variant

Výsledky obou shlukových analýz **matic C** odhalily, že nejsou příliš vhodné pro vytvoření intervalů ani pro interpretaci výsledků nově navrženého algoritmu. Byla tak dokázána potřeba zavedení intervalu přípustných sazeb do nově navrženého algoritmu. Po provedení této úpravy vznikly **matice E**, které nabídly možnost rozdělit doby manipulací vždy do tří intervalů. Obě varianty dělí přípustná řešení do velmi podobných intervalů. Také hodnoty průměrných rozvozních vzdáleností se liší pouze nepatrně. Shrnutí těchto výsledků je popsáno v tabulce 5-8.

Tabulka 5-8: Souhrnná tabulka obou variant

Interval dob manipulací [min]		Průměrná rozvozní vzdálenost [km]		Rozdíly obou variant	
Varianta 1	Varianta 2	Varianta 1	Varianta 2	$V_2 - V_1$	$\frac{V_2 - V_1}{V_2} \cdot 100$
<20, 80)	<20, 70)	52,24	53,52	1,28 km	2,391 %
<80, 130)	<75, 130)	131,16	128,65	-2,51 km	1,951 %
<150, 190)	<145, 190)	281,67	283,02	1,35 km	0,477 %

Zdroj: autor

Z tabulky 5-8 je patrné, že průměrné rozvozní vzdálenosti varianty 2 se v zásadě neliší od výsledků varianty 1. Pro výpočet by tedy mohlo stačit používat matici s diferencí dob manipulací 10 minut. Dochází ale k malému rozdílu v hranicích intervalů obou variant, proto je lépe používat matici s diferencí 5 minut. Správnost fungování nově navrženého algoritmu byla ověřena také v reálném prostředí u společnosti ČSKD INTRANS, která na dotaz autora uvedla, že průměrná doba manipulací je u jejich vozidel cca 120 minut při průměrné rozvozní vzdálenosti 120 – 150 km, což odpovídá intervalům uvedeným v tabulce 5-8.

Z nově navrženého algoritmu dále vyplynulo, že optimální rozvozní vzdálenost je úměrná době manipulace (jiné práce) s dopravním prostředkem. Mezi nejčastější typy těchto manipulací patří nakládka a vykládka. Lze proto vyvodit závěr, že velikost optimální rozvozní vzdálenost je úměrná délce nakládky a vykládky. Doby manipulace se snaží každý subjekt minimalizovat. V případě KD lze za dobu manipulace v terminálu KD dosadit číslo v řádu desítek minut (10 – 30 minut). Tento čas vychází z předpokladu, že v terminále dochází pouze k nakládce přepravní jednotky na silniční vozidlo a k předání

průvodních (přepravních) listin. Složitější je určení doby manipulace na straně zákazníka. Ten může být reprezentován různými typy subjektů s rozdílným vybavením manipulační techniky. Obecně lze tyto zákazníky rozdělit na tři základní typy: terminál, logistický sklad a obecný zákazník. Každý z těchto typů má svá specifika.

Pod pojem terminál hledejme zákazníka s obdobným technickým vybavením pro manipulaci, jako je tomu v terminále KD. Logistický sklad pak neumožňuje manipulaci s přepravní jednotkou, vozidlo zde může zanechat návěs s přepravní jednotkou a nečekat na její vyložení. Obecný zákazník pak nemá technické možnosti k manipulaci s přepravní jednotkou ani s návěsem. Proto pro vyložení u obecného zákazníka musí tahač vyčkat dokončení vykládky. První dva typy zákazníků disponují značně vyšší schopností minimalizovat manipulační časy a dobu pobytu vozidla při vykládce/nakládce. Tato tvrzení jsou uvedena v tabulce v příloze 3-5, která ukazuje, že přípustná řešení se nacházejí při nižších dobách manipulací ve větším počtu řádků.

5.4 Aplikace matematického modelování nákladů

V kapitole 4.3 bylo matematickým modelováním dokázáno, že existuje interval přípustných řešení (vzdáleností), pro které nabývá nákladová funkce doprovázené KD nižších hodnot než přímá silniční doprava. Cílem této kapitoly je ověřit teoretický základ dosazením reálných hodnot získaných z praktických měření a prokázat, jak je tato ekonomická výhodnost doprovázené KD citlivá na změnu ceny za železniční dopravu c_{ZD} .



Zdroj: (48)

Obrázek 5-5: Ilustrační foto jízdní soupravy

Pro správný výpočet intervalu přípustných vzdáleností je nutné nejprve vypočítat proměnné, které vstupují do vztahů 4-18 až 4-23. Tyto proměnné, včetně jednotlivých dílčích sazeb c_i , jsou shrnuty v tabulce 5-9. Hodnoty byly stanoveny ve spolupráci s firmou Hangartner AG a DACHSER Czech Republic pro silniční soupravu (tahač + návěs) kategorie N₃. Ilustrační fotografie soupravy je na obrázku 5-5.

Tabulka 5-9: Souhrnná tabulka výpočet proměnných c_i

Proměnná	Hodnota	Dílčí náklad c_i	Hodnota [Kč·km ⁻¹]
PR	70 000 Kč	c_{PR}	0,54
L _R	130 000 km	c_{SD}	0,23
SD	30 000 Kč	c_{odp}	6,15
PC	4 000 000 Kč	c_{PHM}	9,81
t _{odp}	5 let	$c_{mýto}$	4,20
Mýto	4,2 Kč·km ⁻¹	c_{mzda}	3,08
HS	200 Kč·h ⁻¹	c_{pneu}	1,00
V _{NA}	65 km·h ⁻¹	c_{ISO}	2,11

Zdroj: autor

Z těchto nákladů je nyní možné pomocí vztahu 4-24 a tabulky 3-1 stanovit kalkulační vzorce pro jednotlivé druhy dopravy a vytvořit tabulku 5-10. V úvodu kapitoly bylo zmíněno, že kalkulační vzorce jednotlivých druhů KD budou testovány na citlivost řešení v závislosti na ceně přepravy po železnici c_{ZD} . Tímto testováním bylo zjištěno, že nejlepší hodnoty dosahuje doprovázená KD při ceně 17,50 Kč·km⁻¹, proto v tabulce 5-10 byla použita tato hodnota. V příloze 4-4 a 4-5 jsou uvedeny grafy při c_{ZD} 15 Kč·km⁻¹, resp. 20 Kč·km⁻¹. Grafy ukazují citlivost železniční dopravy na změnu ceny za kilometr. Zatímco v příloze 4-4 jsou hodnoty u doprovázené KD z hlediska nákladů téměř dokonalým řešením, tak v příloze 4-5, kde je cena za kilometr o pět korun vyšší, již není konkurenceschopná. Tato skutečnost ukazuje, na citlivost hranice mezi rentabilitou a ztrátovostí doprovázené KD. **Uvedené skutečnosti potvrzují závěry kapitoly 4.2 o vytížení vlaků KD.**

Tabulka 5-10: Kalkulační vzorce [Kč·km⁻¹]

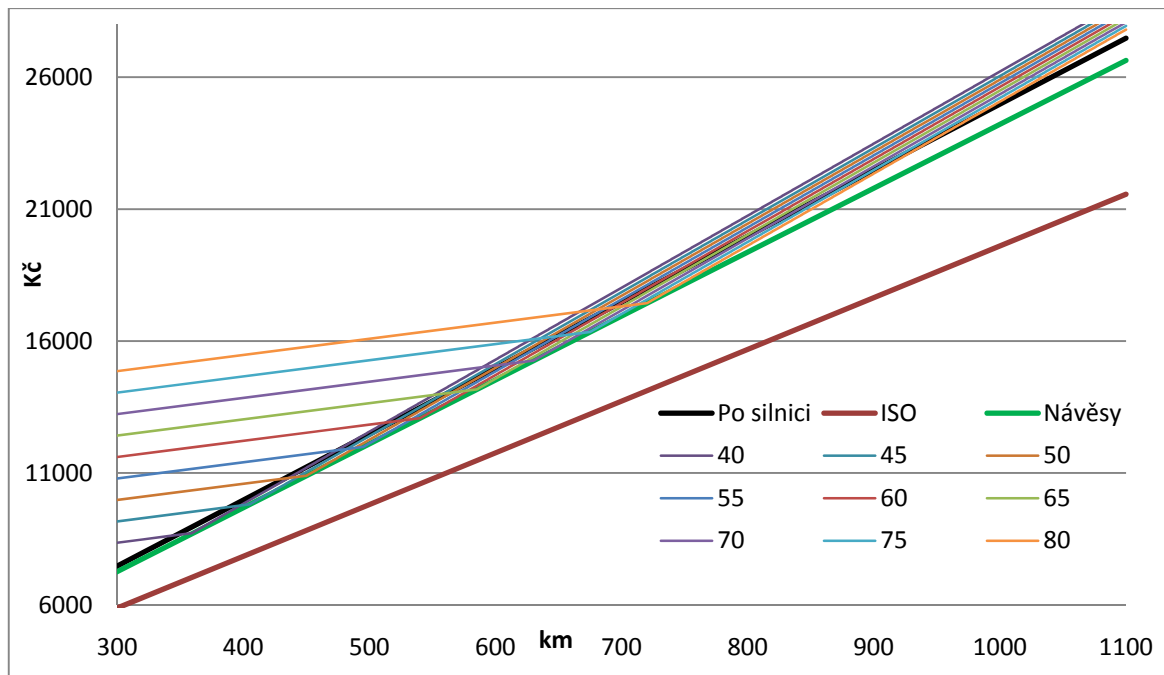
Druh nákladu	Kontejnery ISO řady 1	Sedlové návěsy	Ro-La	Přímá silniční doprava
Povinné ručení	0	0,54	0,54	0,54
Silniční daň	0	0,23	0,23	0,23
Odpisy	0	6,15	6,15	6,15
PHM	0	0	9,81	9,81
Mýto	0	0	4,20	4,20
Mzda řidiče	0	0	3,08	3,08
Pneumatiky	0	0	1,00	1,00
Pronájem přepravní jednotky	2,11	0	0	0
Přeprava po železnici	17,50	17,50	17,50	0
CELKEM	19,61	24,24	----	25,01

Zdroj: autor

U doprovázené KD nebyla vyčíslena celková hodnota, protože vztah pro její výpočet, a tím i přítomnost jednotlivých nákladových položek, se s velikostí přepravní vzdálenosti mění. Dosazením proměnných c_i z tabulky 5-10 do vzorce 4-31 lze stanovit, jak se bude měnit funkční průběh nákladů doprovázené KD v závislosti na přepravní vzdálenosti. Z matematického vyjádření vztahu 5-1 je zřejmé, že náklady na doprovázenou KD závisí kromě délky linky také na rychlosti vlaku.

$$\begin{aligned}
 \forall l \in (0; d.d.o \cdot v_{vlak}); C_{RoLa} &= 6,123 \cdot l + 162,81 \cdot v_{vlak} \\
 \forall l \in \langle d.d.o \cdot v_{vlak} \rangle; C_{RoLa} &= 24,213 \cdot l \\
 \forall l \in (d.d.o \cdot v_{vlak}; \infty); C_{RoLa} &= 27,293 \cdot l - 27,72 \cdot v_{vlak}
 \end{aligned}
 \quad [Kč \cdot km^{-1}] \quad (5-1)$$

U ostatních druhů dopravy je nákladová funkce přímo úměrná délce linky s tím, že směrnice nákladové funkce je rovna hodnotě v řádku CELKEM v tabulce 5-10. Na základě dosazení proměnných c_i a modelování ceny doprovázené KD pro různé v_{vlak} byl sestaven graf, který je na obrázku 5-6.



Zdroj: autor

Obrázek 5-6: Graf závislosti nákladů na ujeté vzdálenosti pro zkoumané druhy dopravy

Vzhledem k malé přehlednosti obrázku 5-6, což dokazuje složitost celého modelování, je v příloze 4-1 zobrazen tento graf v plné velikosti a v příloze 4-2 ve výřezu. V příloze 4-3 je výřez více přiblížen pro jednu z rychlostí vlaku v_{vlak} . **Vizualizací modelování se potvrdila hypotéza, že existuje oblast přípustných řešení, kde jsou variabilní náklady doprovázené KD nižší než přímé silniční dopravy.** Lze tak matematicky vyjádřit interval přípustných řešení a optimální řešení. Interval minimální l_{min} a maximální l_{max} přípustné vzdálenosti se nachází v průsečících první a třetí funkce ze vztahu 5-1. Optimální vzdálenost l_{opt} pak lze hledat jako průsečík první a třetí funkce ze vztahu 5-1. Ani jedna z těchto funkcí není v tomto bodě definována, průsečík lze hledat jako limitu obou funkcí směřující k tomuto bodu. Výsledek je ve vztahu 5-2 a jednotlivé hodnoty l jsou vyznačeny v příloze 4-3.

$$\begin{aligned}
 l_{min} &= 8,62 \cdot v_{vlak} \\
 l_{opt} &= 9 \cdot v_{vlak} \\
 l_{max} &= 12,14 \cdot v_{vlak}
 \end{aligned}
 \quad [km] \quad (5-2)$$

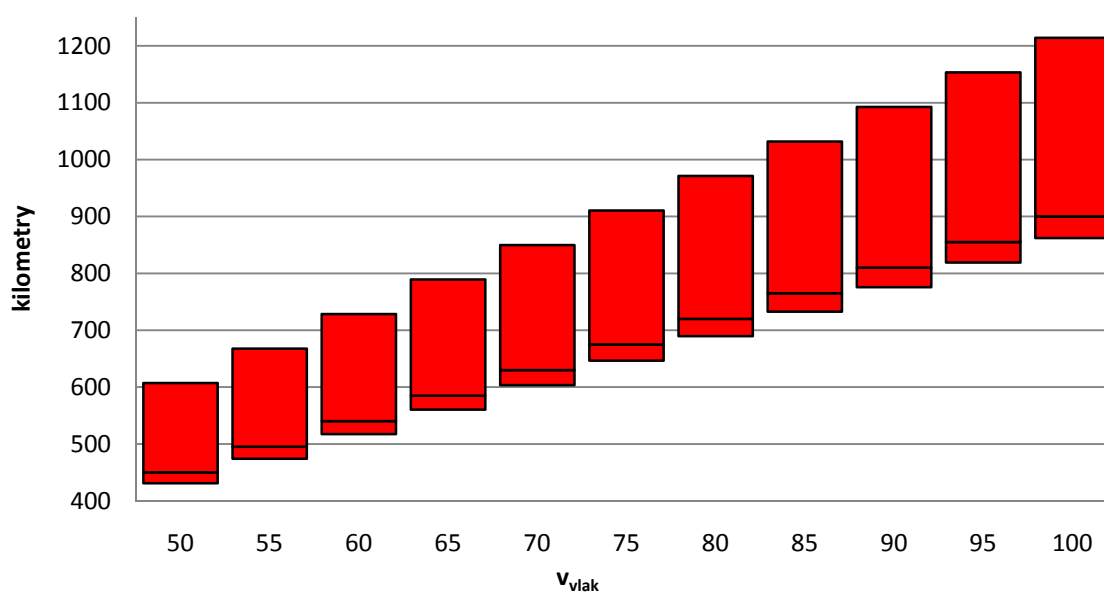
Pokud převedeme vztahy 5-2 do formy tabulky 5-11, můžeme dále sestavit graf intervalů přípustných řešení v závislosti na rychlosti vlaku doprovázené KD v_{vlak} .

Obrázek 5-7 ukazuje oblast přípustných řešení l_{min} až l_{max} (červená oblast). Hodnota l_{opt} je v každém ze sloupců naznačena černou čarou.

Tabulka 5-11: Výpočet intervalu přípustných řešení pro různé rychlosti vlaku [km]

v_{vlak} [km·h ⁻¹]	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0 - l_{min}	431	474	517	560	603	647	690	733	776	819	862
l_{min} - l_{opt}	450	495	540	585	630	675	720	765	810	855	900
l_{opt} - l_{max}	607	668	728	789	850	911	971	1032	1093	1153	1214

Zdroj: autor



Zdroj: autor

Obrázek 5-7: Graf optimálních vzdáleností pro různé rychlosti vlaku doprovázené KD [km]

Pomocí modelování bylo dokázáno a kvantifikováno za jakých podmínek může být doprovázená KD rentabilní. Vzdálenosti ze vztahu 5-2 jsou pro provozovatele KD prvotním vodítkem při rozhodování o zavedení nové linky doprovázené KD. Dalším důležitým krokem je identifikace vrcholů vhodných pro umístění terminálů KD. Takový vrchol by měl, splňovat tyto další podmínky:

- vrchol leží na trati, která je součástí Evropské dohody AGTC.
- vrchol má napojení na síť dálnic a silnic I. třídy, které splňují parametry pro provoz těžkých nákladních vozidel (silniční soupravy až do 40 tun).

- vrchol musí být vnitřně prostorově dimenzován pro technologické a manipulační úkony silničních a železničních souprav,
- v tomto místě musí být, případně tímto místem musí procházet požadované přepravní toky.

Na základě postupu uvedeného v této kapitole a matematického modelování je možné sestavit schéma rozhodovacího procesu při zavádění linky KD. Celý rozhodovací proces je v příloze 5. Pro doprovázenou KD by nalezené terminály pro linky KD byly použity jako koncové ve smyslu změny druhu dopravy. Pokud rozhodovací proces rozšíříme o nově navržený algoritmus pro výpočet optimální rozvozní vzdálenosti, lze tyto terminály využít jako koncové ve smyslu konečného rozvozu zásilek.

Závěr

V analytické části disertační práce bylo zjištěno, že všechny přístupy, které byly dosud při řešení dopravních úloh uplatněny, jsou orientovány na dopravce a na úplné náklady dopravy. Především v oblasti modelování nákladů tak neexistoval pohled, který by zohledňoval především variabilní náklady, tedy ty, které jsou společné pro široké spektrum dopravců. Rovněž byly zjištěny nedostatky v řešení dopravních úloh v podobě neexistence algoritmu pro zjišťování optimální rozvozní vzdálenosti.

Z analýzy vyplynuly **cíle disertační práce**, které byly formulovány v kapitole 3. Jsou jimi **vytvoření metody pro určení optimální rozvozní vzdálenosti, navržení matematického modelu maximalizace finanční úspory při měnící se přepravní vzdálenosti a schéma rozhodovacího procesu, za jakých podmínek je možné zavést linku KD.**

Na základě stanovených cílů byly zvoleny metody zkoumání, které byly v obecném návrhu řešení doplněny o nový algoritmus pro určení optimální rozvozní vzdálenosti, výpočet koeficientu rentability a o matematické modelování nákladů.

Obecný návrh řešení byl následně aplikován v podmínkách EU s ohledem na ČR. Po změně vstupních hodnot a respektování zákonů dané země je aplikovatelný v každém státě EU.

Hlavním přínosem disertační práce je vytvoření nového autorem navrženého algoritmu, pomocí něhož lze určit optimální rozvozní vzdálenost pro libovolné centrum hromadné obsluhy. Tento algoritmus byl doplněn o vývojový diagram.

Dalším přínosem je provedení matematického modelování nákladů, které sleduje vývoj variabilních nákladů u různých druhů KD a přímé silniční dopravy. Byla tak potvrzena hypotéza, že doprovázená KD může za určitých podmínek dosáhnout nižších variabilních nákladů než přímá silniční doprava.

Třetím přínosem disertační práce je vytvoření schématu rozhodovacího procesu, za jakých podmínek a kritérií je výhodné zavést linku KD.

Summary

Presented dissertation thesis on theme **The Assumptions in Development of Intermodal Transport Systems** deals with trend this will be observed in the future on the field of intermodal transport in Czech Republic and EU. Its goal is in finding ways, how to make intermodal transport more attractive for wider spectrum of haulers. Dissertation thesis is divided into five main chapters.

In the first chapter is a state-of-the-art analysis of intermodal transport in Czech Republic as well as in EU. Emphasis is placed on technological respect of intermodal transport and its specifics in confrontation with direct road transport. There is propounded a hypothesis that variable costs of intermodal transport including accompanied might be lower than for direct road transport. This hypothesis is supported by expected mathematical curve of variable costs for accompanied intermodal transport and direct road transport. Another important part of the analysis is focused subvention support of intermodal transport on national and European level. Matter of common disadvantage of intermodal transport is very high costs for infrastructure development and buying of vehicles. Those costs are shown up in final price of the service, so that most dynamic development has nowadays types of intermodal transport with less input costs. Presumption of dissertation thesis is, that if intermodal transport systems will be free of input costs, than intermodal transport can be profitability. The input costs can be financed from European funds or national donation. One of the conditions for European projects is sustainability after the end of subsidy, so in the field of variable costs.

On the basis of the analysis were set goals of the dissertation thesis:

- set up of new author's proposed method for calculation of optimal hauling distance,
- proposal of mathematic model which maximize financial savings by changing hauling distance,
- set up of decision process diagram for put of line of intermodal transport into service.

Those goals led to the choice of mathematical apparatus, which was in necessary cases modified for the needs of the dissertation thesis. Through the use of chosen and modified methods, all aims of the dissertation thesis were fulfilled. The contribution of the dissertation thesis is as follows:

- set up of a new author's proposed method for calculation of optimal hauling distance, through which can be determined optimal hauling distance. This algorithm is coupled with a flowchart,
- mathematical modelling of costs is looking for changing of variable costs with growing hauling distance for different types of intermodal transport and direct road transport. The proposed hypothesis that accompanied intermodal transport might have lower variable costs than direct road transport was acknowledged,
- set up of a decision process diagram for putting a line of intermodal transport into service.

Seznam použitých informačních zdrojů

1. **Rožek, Petr.** *Námořní doprava*. Pardubice : Institut Jana Pernera, o.p.s., 2007. ISBN 80-86530-39-6.
2. **Economic Commission for Europe (UN/ECE).** 1941816.pdf. *Organization for Economic Co-operation and Development*. [Online] 2001. [Citace: 9. Prosinec 2007.] <http://www.oecd.org/dataoecd/42/32/1941816.pdf>.
3. *"Amodalizmus" v dopravě jako trend globálního obchodu 21. století.* **Hansenová, Heda.** Lázně Bohdaneč : Česká intermodální asociace - ARIP, 2006. CZ INTERMODAL - EUROKOMBI. ISBN 80-7194-874-8.
4. **Černý, Ján, Kľuvánek, Pavol.** *Základy matematickej teórie dopravy*. Bratislava : Veda, 1989. ISBN 80-224-0099-8.
5. **Ministerstvo dopravy ČR.** Právní předpisy pro kombinovanou dopravu. *Ministerstvo dopravy ČR*. [Online] [Citace: 10. 1 2008.] http://www.mdcz.cz/cs/Drazni_doprava/Kombinovana_doprava/pravpredp.htm.
6. Zákon č. 16/1993 Sb., o dani silniční. *business.center.cz*. [Online] [Citace: 4. 2 2008.] <http://business.center.cz/business/pravo/zakony/silnicnidan/zakon.aspx>.
7. Úplné znění zákona č. 361/2000 Sb. ke dni 1. červenci 2006. *Silniční zákon.cz*. [Online] [Citace: 4. 2 2008.] <http://www.silnicnizakon.cz/zakon/uplne-zneni-zakona-c-3612000-sb-ke-dni-1-cervenci-2006.html>.
8. **Novák, Jaroslav, a další.** *Kombinovaná přeprava*. Pardubice : Institut Jana Pernera, o.p.s., 2010. ISBN 978-80-86530-59-8.
9. *Intermodální přeprava na vzestupu a jak ji dále podpořit.* **Cempírek, Václav.** Lázně Bohdaneč : Univerzita Pardubice, 2006. CZ INTERMODAL - EUROKOMBI. ISBN 80-7194-874-8.
10. A.P. Moller - Maersk Group. [Online] [Citace: 28. 4 2008.] <http://www.maersk.com/en>.
11. INTRANS. [Online] ČSKD Intrans, a.s. [Citace: 27. 4 2008.] <http://www.intrans.cz/>.
12. *METRANS - Container terminals and all-in intermodal service in Central Europe.* [Online] [Citace: 20. 3 2008.] <http://www.metrans.cz/>.
13. *Bohemiakombi, s.r.o.* [Online] 2006. [Citace: 25. 3 2008.] <http://www.bohemiakombi.cz/>.
14. *Průvodce nákladní přepravou Českých drah.* Olomouc : JERID, spol. s r.o., 2000. Sv. IV.

15. *Externí náklady v dopravě*. **Říha, Zdeněk**. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2000. ISBN 80-7194-249-9.
16. *Logistický management*. **Pernica, Petr**. Praha : RADIX, spol. s r.o., 1998. ISBN 80-86031-13-6.
17. **Vlastislav Mojžíš a kol.** Teoretické základy technologie a řízení kombinované dopravy. Pardubice : autor neznámý, 1996. Grantový projekt Grantové agentury České republiky č. 103/94/1394.
18. **Wiezorke, Christiane**. Innovative Technologies for Intermodal Transfer Points. *Transport Research Knowledge Centre*. [Online] [Citace: 12. 10 2007.] http://www.transport-research.info/web/downloadfunction.cfm?docname=200608%2F20060831_112110_39174_intermodal_D2Eissue1-0.pdf&apptype=application/pdf.
19. **Peterlini, Edoardo**. State of the Art of conventional and innovative techniques in intermodal transport. *EUTP - Intermodal Freight Transport Research*. [Online] [Citace: 19. 11 2007.] www.eutp.org/download/itip/D1/Annex2.pdf.
20. 32006R0561. *EUR-Lex*. [Online] 15. 3 2006. [Citace: 12. 1 2008.] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006R0561:CS:HTML>.
21. **Machačka, Ivo**. *Nářízení 561, 3821 a AETR do kabiny*. Pardubice : SYSTEMCONSULT, 2007. ISBN 80-85629-24-0.
22. *Optimal location of intermodal freight hubs*. **Illia Radunica, Laura Wynter**. Le Chesnay : Institut National de Recherche en Informatique en Automatique, 2000. ISSN 0249-6399.
23. SCADPlus. *Activities of European Union*. [Online] [Citace: 14. únor 2008.] <http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l24007.htm>.
24. Transport - Marco Polo Programme. [Online] [Citace: 20. Leden 2008.] http://ec.europa.eu/transport/marcopolo/index_en.htm.
25. 2007_08_06_list_projects_call2006.pdf. *Transport - Marco Polo Programme*. [Online] [Citace: 15. Leden 2008.] http://ec.europa.eu/transport/marcopolo/projects/projects_en.htm.
26. *Bílá kniha Komise Evropských společenství "Evropská dopravní politika pro rok 2010: čas rozhodnout"*. Knihovna dokumentů Evropské Unie vztahující se k dopravě. Praha : Nadatur, 2001. Sv. 88. ISBN 80-7270-015-4.
27. *Intermodalita - představy, skutečnost a vize*. **Mojžíš, Vlastislav**. Lázně Bohdaneč : Univerzita Pardubice, 2006. CZ INTERMODAL - EUROKOMBI. stránky 126-131. ISBN 80-7194-874-8.

28. **Voleský a kol.** *Kombinovaná doprava*. Žilina : Edičné stredisko VŠDS, 1995. ISBN 80-7100-268-2.
29. **Janic, Milan.** Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D*. 12, 12 2007, stránky 33-44.
30. Objectives DIOMIS. *UIC*. [Online] 2009. [Citace: 20. 01 2010.] <http://www.uic.org/diomis/spip.php?article20>.
31. **Kinzle, dipl. ing. Hans - Paul.** *DIOMIS Modul 3 - New EU Member States - Slovakia*. Bratislava : autor neznámý, 2009.
32. **Dorda, Michal.** Michal Dorda. *Homel - TU Ostrava*. [Online] [Citace: 29. 1 2010.] http://homel.vsb.cz/~dor028/ODP_4prednaska.doc.
33. **Kelbel, Jan; Šilhán, David.** Shluková analýza. *Osobní stránka - Ivan Nagy*. [Online] 2008. [Citace: 22. 1 2010.] <http://staff.utia.cas.cz/nagy/skola/Projekty/Classification/ShlukovaAnalyza.pdf>.
34. **Klufová, Renata; Rost, Michael.** Metody shlukové analýzy. *Kvantitativní metody pro zemědělskou praxi*. [Online] 2006. [Citace: 25. 1 2010.] http://www2.zf.jcu.cz/public/departments/kmi/MSMT_05/web_kvant_metody.htm.
35. *Kombinovaná doprava po vstupu České Republiky do EU*. **Kocourek, Vojtěch**. Lázně Bohdaneč : Univerzita Pardubice, 2006. CZ INTERODAL - EUROKOMBI. ISBN 80-7194-874-8.
36. **Wigan, M., Clarke, R.** Transport and Surveillance Aspects of Location-Based Services. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*. 2009, 2105.
37. **Takano, K., Arai, M.** A genetic algorithm for the hub-and-spoke problem applied to containerized cargo transport. *JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY*. červen, 2009, Sv. 2, 14.
38. **Frank A Tillman, Thomas M. Cain.** An upperbound algorithm for the single and multiple terminal delivery problem. *Management science*. 1972, Sv. 11, 18.
39. **Frank, H.** A note on a graph theoretic game of Hakimi's. *Operations Research*. 1967, Sv. 3, 15.
40. **Ghoseiri, Keivan, Ghannadpour, Seyed Farid.** A hybrid genetic algorithm for multi-depot homogenous locomotive assignment with time windows. *Applied soft computing*. 2010, Sv. 1, 10.
41. **Sadjadi, S. J., Jafari, M., Amini, T.** A new mathematical modeling and a genetic algorithm search for milk run problem (an auto industry supply chain case study). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009, Sv. 1-2, 44.

42. **Volek, Josef.** *Operační výzkum I.* Pardubice : Dopravní fakulta Jana Pernera, 2002. ISBN 80-7194-410-6.
43. Prohlášení-2008_2009.pdf. *Správa železniční dopravní cesty, s.o.* [Online] 5. 9 2008. [Citace: 8. 1 2009.] http://www.szdc.cz/SZDC_soubory/Prohlášení/2008-2009/Prohlášení-2008_2009.pdf.
44. *Poplatok za železničnú dopravnú cestu v nákladnej doprave.* **Poliak, M.** miesto neznámé : Logistický monitor, 2006, Sv. 4. ISSN 1336-5851.
45. **Ministrstvo dopravy.** *Ročenky dopravy.* [Online] 31. 12 2007. [Citace: 18. 3 2009.] http://www.sydos.cz/cs/rocenka_pdf/Rocenka_dopravy_2007.pdf. ISSN 1801-3090.
46. Interní materiály společnosti Hangartner AG. Praha : autor neznámý, 2009.
47. *Influence of toll establishment in Czech Republic on haulers prices.* **Nachtigall, Petr a Jaromír, Široký.** 6, Wrocław : Consulting i logistyka Spolka z o.o., 2008, Sv. 1. ISSN 1734-2015.
48. Vítejte v DACHSER Czech Republic, a.s. <http://www.dachser.cz/>. [Online] DACHSER GmbH, 15. 2 2010. [Citace: 9. 3 2010.] [http://www.dachser.cz/C12572900046342F/vwContentByKey/0C14B27E1E8736DFC125766A004CEA2E/\\$FILE/rumunsko_novinky_zmensena.jpg](http://www.dachser.cz/C12572900046342F/vwContentByKey/0C14B27E1E8736DFC125766A004CEA2E/$FILE/rumunsko_novinky_zmensena.jpg).

Seznam zkratek

Zkratka	Vysvětlivka česky	Vysvětlivka anglicky
ACTS	Dopravní systém odvalovacích kontejnerů	Abroll Containers Transport System
AETR	Evropská dohoda o práci osádek vozidel v mezinárodní dopravě	Accord Européen Relatif au Travail des Équipages des Véhicules Effectuant des Transports Internationaux Par Route
AGTC	Evropská dohoda o nejdůležitějších trasách mezinárodní kombinované dopravy	European Agreement on Important Transport Lines and Related Instalations
CEMT	Evropská konference ministrů doprav	The European Conference of Ministers of Transport, International Transport Forum
ČD	České dráhy	
ČNB	Česká národní banka	
ČR	Česká republika	
CVRP		Capacitated vehicle routing problem
BP	Bezpečnostní přestávka	
EC	Evropská komise	European Commision
ECE	Evropská komise pro Evropu	European Commision for Europe
EHP	Evropský hospodářský prostor	
ES	Evropské společenství	
EU	Evropská Unie	European Union
EUTP		European Transfer Points
IFTR		Intermodal Freight Transport Research
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	International Standartization Organization
ITIP		Intermodal Technologies for Intermodal Transfer Points
IWW	Plavba po vnitrozemských vodních cestách	Inland Waterway Shipping
IZS	Integrovaný záchranný systém	Joint rescue service
KD	Kombinovaná doprava	Intermodal transport
kWh	kilowatthodina	
MDVRP		Multi-depot vehicle routing problem
PACT		Pilot Action for Combinied Transport
PHM	Pohonné hmoty	
PJO	Přestávka na jídlo a oddech	
PPP	Princip, kdo vytváří emise, platí	Polutant Pays Principle
PVRP		Periodic vehicle routing problem
Ro-La	Kombinovaná doprava silničních souprav po železnici	Rollende Landstrasse
Ro-Ro	Kombinovaná přeprava vozidel prostřednictvím lodí	Roll on - Roll off

Zkratka	Vysvětlivka česky	Vysvětlivka anglicky
SD	Silniční doprava	
SDVRP		Split delivery vehicle routing problem
SSS	Příbřežní námořní plavba	Short Sea Shipping
SVRP		Stochastic vehicle routing problem
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty	
Tkm	tunokilometr	
TSP	Problém obchodního cestujícího	Travelling salesman problem
VEU		Volume Equivalent Unit
VRP		Vehicle routing problem
VRPB		Vehicle routing problem with backhauls
VRPPD		Vehicle routing problem with pickup and delivery
VRPSD		Vehicle routing problem with satellite facilities
VRPTW		Vehicle routing problem with time windows
ŽD	Železniční doprava	
UIC	Mezinárodní železniční unie	International Union of Railways
DIOMIS		Developing Infrastructure & Operating Models for Intermodal Transport

Seznam tabulek

Tabulka 1-1: Sleva na silniční dani pro vozidla jezdící v režimu KD.....	13
Tabulka 1-2: Externí náklady v dopravě	20
Tabulka 3-1: Přehled nákladů jednotlivých zkoumaných druhů dopravy.....	39
Tabulka 4-1: Hodnota bezpečnostních přestávek pro různé intervaly doby řízení	47
Tabulka 4-2 - Celková hmotnost a délka ucelených vlaků.....	55
Tabulka 4-3 - Vstupní hodnoty a výpočet hodnot koeficientů k_R	55
Tabulka 4-4 - Poměr mezi celkovou hmotností ložených a prázdných vlaků.....	56
Tabulka 5-1: Výřez z výsledné matice A	64
Tabulka 5-2: Výřez z matice B.....	64
Tabulka 5-3: Výřez z matice C.....	65
Tabulka 5-4: Výřez z matice D.....	65
Tabulka 5-5: Výřez z matice E.....	66
Tabulka 5-6: Intervaly dob manipulací pro variantu 1	69
Tabulka 5-7: Intervaly dob manipulací pro variantu 2	71
Tabulka 5-8: Souhrnná tabulka obou variant	72
Tabulka 5-9: Souhrnná tabulka výpočet proměnných c_i	74
Tabulka 5-10: Kalkulační vzorce [$Kč \cdot km^{-1}$].....	75
Tabulka 5-11: Výpočet intervalu přípustných řešení pro různé rychlosti vlaku [km].....	77

Seznam obrázků

Obrázek 1-1: Schéma závislostí mezi základními pojmy.....	9
Obrázek 1-2: Schéma vazeb mezi jednotlivými druhy dopravy a činiteli ovlivňujícími tyto druhy dopravy	10
Obrázek 1-3: Schéma přímé silniční dopravy	11
Obrázek 1-4: Schéma KD.....	11
Obrázek 1-5: Grafické znázornění porovnání jednotlivých druhů dopravy z hlediska přepravní vzdálenosti 1 tuny zboží při stejné spotřebě energie [km].....	22
Obrázek 1-6: Schéma rozdělení nákladů v dopravě	23
Obrázek 1-7: Mapa počtu vlaků KD v Evropě za den.....	24
Obrázek 1-8: Oblast řešení projektu DIOMIS II modulu 3.....	25
Obrázek 1-9: Mapa využití kapacity železniční sítě na Slovensku v roce 2008	26
Obrázek 4-1: Principiální ukázka výpočtové kontingenční tabulky a matice	43
Obrázek 4-2: Příklad shlukové analýzy.....	50
Obrázek 4-3: Srovnání cen za použití dopravní cesty ve vybraných zemích.....	53
Obrázek 4-4: Variabilní složka pro doprovázenou KD.....	61
Obrázek 5-1: Shluková analýza matice C pro variantu 1	67
Obrázek 5-2: Shluková analýza matice E pro variantu 1	68
Obrázek 5-3: Shluková analýza matice C pro variantu 2	70
Obrázek 5-4: Shluková analýza matice E pro variantu 2	71
Obrázek 5-5: Ilustrační foto soupravy	73
Obrázek 5-6: Graf závislosti nákladů na ujeté vzdálenosti pro zkoumané druhy dopravy .	76
Obrázek 5-7: Graf optimálních vzdáleností pro různé rychlosti vlaku doprovázené KD [km].....	77

Seznam příloh

- Příloha 1: Vývojový diagram nově navrženého algoritmu
- Příloha 2: Aplikace nově navrženého algoritmu pro variantu 1
- Příloha 3: Aplikace nově navrženého algoritmu pro variantu 2
- Příloha 4: Grafy matematického modelování nákladů
- Příloha 5: Schéma rozhodovacího procesu zavádění linky KD

Publikační činnost k tématu disertační práce

- [1] **NACHTIGALL, Petr**. How to use Marco Polo II for support of Czech intermodal transport. In *Sborník 6th Conference of European Students of Traffic and Transportation Sciences*, Žilina, 11.6.2008, s. 81 – 84, ISBN 978-80-8070-869-6
- [2] CEMPÍREK, Václav, **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Systematické jízdní řády vlaků kombinované přepravy. In *Doprava a Logistika, Transport and Logistics, mezinárodní časopis*. Košice, 1/2007. s. 175-181. ISSN 1451-107X
- [3] CEMPÍREK, Václav, **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Development of Intermodal Transport in Central and Eastern Europe. In *WorldCargo News*. 5/2006, s. 55-56, ISSN 1355-0551
- [4] CEMPÍREK, Václav, **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. New Prospects for Intermodal Transport. In *WorldCargo News*. 11/2006, s. 26, ISSN 1355-0551
- [5] CEMPÍREK, Václav, SEIDLOVÁ, Andrea, ŠIROKÝ, Jaromír, **NACHTIGALL, Petr**, KAMPF, Rudolf. Aplikace logistických systémů do nákladní obslužné přepravy. In *Zborník prednášok EURNEX-ŽEL 2007*. Žilina. 31. 5. 2007. s. 135-141. ISBN 978-80-8070-679-1
- [6] ŠIROKÝ, Jaromír, **NACHTIGALL, Petr**, RATHOUSKÝ Bedřich. Nová pravidla pracovního režimu řidiče. In *Perner's Contacts*. 2/2007, s. 95-103, ISSN 1801-674X
- [7] CEMPÍREK, Václav, SEIDLOVÁ, Andrea, ŠIROKÝ, Jaromír, **NACHTIGALL, Petr**, KAMPF, Rudolf. Návrhy základních aplikací logistických systémů do nákladní obslužné přepravy regionů. In *Sborník příspěvků LOGI 2007*. Lázně Bohdaneč, 20. 3. 2007, s. 24-32, ISBN 80-86530-35-3
- [8] CEMPÍREK, Václav, **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Short Haul Intermodal (Container Logistic Centre Near Paskov). In *WorldCargo News*. 1/2007, s. 36, ISSN 1355-0551
- [9] CEMPÍREK, Václav, **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Efektivní logistika a řízení kvality rozhodují v konkurenčním boji. In *Manažment v železničnej doprave 2007*. Žilina. 11. 9. 2007. s. 5-10. ISBN 978-80-8070-780-4

- [10] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Intermodal Transport in Czech Republic after Entering to EU. In *Transport 2006*. Sofia, září 2006, s. 67-71, 954-12-0130-X
- [11] CEMPÍREK, Václav, SEIDLOVÁ, Andrea, ŠIROKÝ, Jaromír, **NACHTIGALL, Petr**, KAMPF, Rudolf. Possible Integration of Logistic Systems Into Regional Service Via Road Cargo Transport. In *Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B*. Pardubice, 2007. s. 71-80. ISBN 1211-6610
- [12] CEMPÍREK, Václav, SEIDLOVÁ, Andrea, ŠIROKÝ, Jaromír, **NACHTIGALL, Petr**, KAMPF, Rudolf. Application Of Logistic Systems Into Regional Service Via Road Cargo Transport. In *Železničná doprava a logistika*. 4/2006, s. 48-53, ISSN 1336-7943
- [13] **NACHTIGALL, Petr**. Rentabilita ucelených nákladních vlaků. In *Perner's Contacts*. 15/2009, s. 180-187, ISSN 1801-674X
- [14] **NACHTIGALL, Petr**. Nový algoritmus výpočtu optimální rozvozové vzdálenosti. In *Perner's Contacts*. 17/2010, v tisku, ISSN 1801-674X
- [15] CEMPÍREK, Václav, **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Vlaky kombinované přepravy. In sborník *Intermodal – Eurokombi 2009*. Žilina. 9. – 10. 6. 2009. ISBN 978-80-554-0073-0

Ostatní publikační činnost

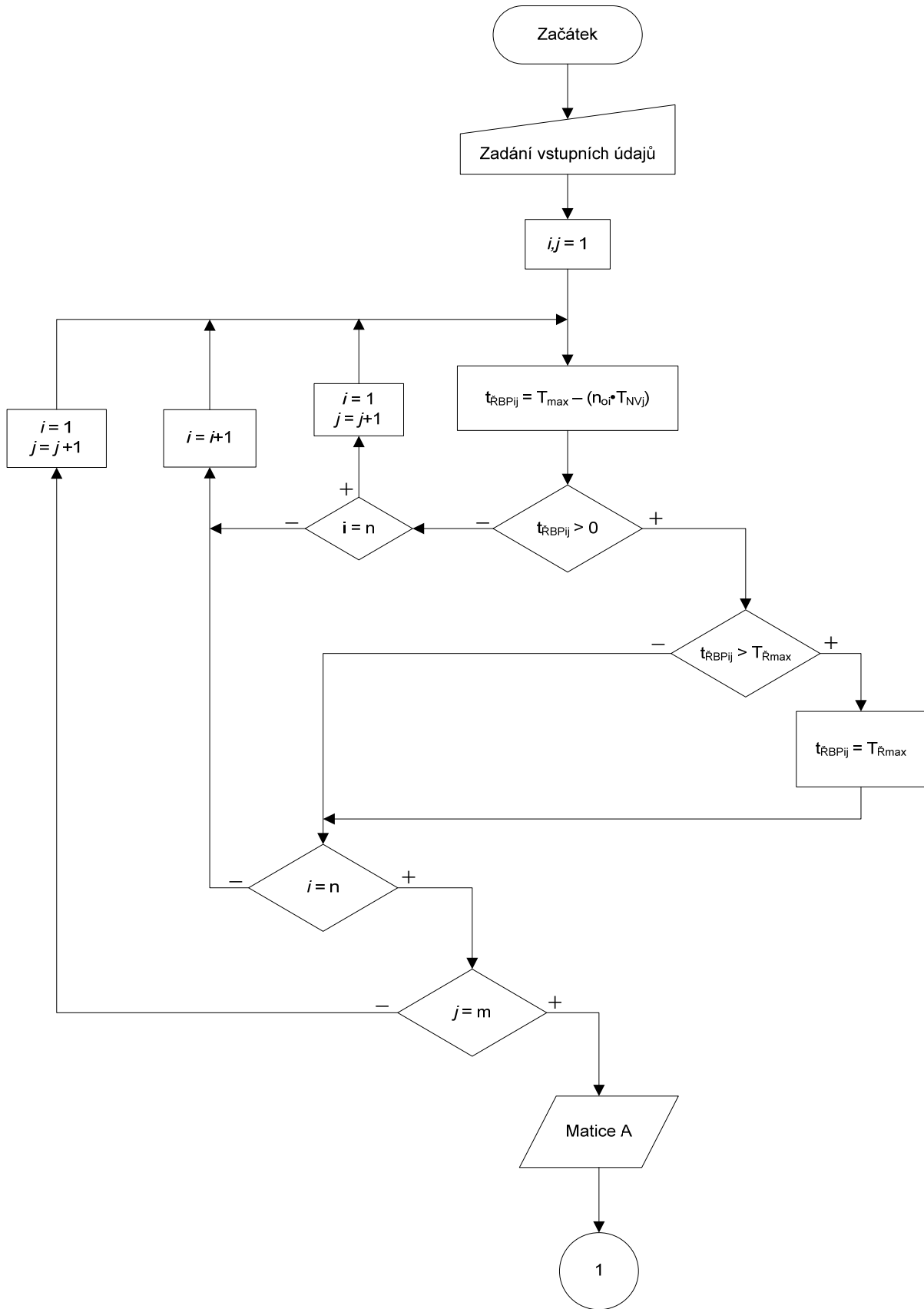
- [1] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Modernizace překládky kontejnerů ISO v přístavech. In *Perners Contacts*. Pardubice, 3/2006. s. 82-87. ISSN 1801-674X
- [2] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Megaterminál pro překládku silnice-železnice Busto Arsizio-Gallarate. In *7. konference s mezinárodní účastí Logi 2006 "Externí poskytování logistických služeb"*. Lázně Bohdaneč. s. 127-131. ISBN 80-86530-30-2
- [3] **NACHTIGALL, Petr**. BladeRunner. In *4th International conference of European Students of traffic and transportation sciences*. Novi Sad: [s.n.], 2006. s. 1-6. ISBN 86-85211-91-3.
- [4] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Modernizace kontejnerových terminálů. In *CZ INTERMODAL - EUROKOMBI*. Lázně Bohdaneč, 2006. s. 169-182. ISBN 80-7194-874-8
- [5] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Výzkum a vývoj spreaderů pro překládku kontejnerů ISO. In *Čtvrtá mezinárodní vědecká konference "Nové výzvy pro dopravu a spoje"*. Pardubice : [s.n.], 2006. s. 643-648. ISBN 80-7194-880-2.
- [6] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Vliv modernizací v železniční dopravě na zvyšování technické rychlosti. In *LOGVD 2006 - Dopravná logistika a krízové situácie*. Žilina : [s.n.], 2006. s. 194-197. ISBN 80-8070-606-9.
- [7] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Kontejnerové lodě budoucnosti. In *Perners Contacts*. Pardubice, 2/2006. s. 103-108. ISSN 1801-674X
- [8] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Rozvoj kontejnerových terminálů Bremerhaven a Wilhelmshaven. In *LOGI 2007 - Externí poskytování logistických služeb*. Lázně Bohdaneč, 2006. s. 192-198. ISBN 80-86530-35-3
- [9] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. BladeRunner – silniční i železniční vozidlo. In *Železničná doprava a logistika*. Žilina, 1/2006. s. 21-25. ISSN 1336-7943
- [10] KAPLAN, Věroslav, SOUŠEK, Radovan, **NACHTIGALL, Petr**. Experiences with floods and their influence on railway infrastructure. In *Naučni skup "Človek i sredina"*. Niš. s. 114-116. ISBN 86-80261-74-2

- [11] **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír. Growth of Transport Output in HHLA Container Terminals. In *Železničná doprava a logistika*. Žilina, 2/2006. s. 54-60. ISSN 1336-7943
- [12] CEMPÍREK, Václav, **NACHTIGALL, Petr**, ŠIROKÝ, Jaromír, KAMPF, Rudolf, SEIDLOVÁ Andrea. Aplikácia logistických systémov na nákladnú obslužnú dopravu. In *Doprava a logistika*. Žilina, 10/2007. s. 22-24. ISSN 1337-0138
- [13] BŘEZINA, Edvard, **NACHTIGALL, Petr**. Vztah kvalitativních a kvantitativních ukazatelů na dopravní provoz a infrastrukturu. In sborník *ŽelAktuel* 2008, s. 6-8. ISBN 978-80-86530-51-2
- [14] MAZAČ, Pavel, **NACHTIGALL, Petr**. Racionalizace traťového úseku Praha-Čakovice – Měšice u Prahy. In sborník *ŽelAktuel* 2009, s. 60-66. ISBN 978-80-86530-61-1

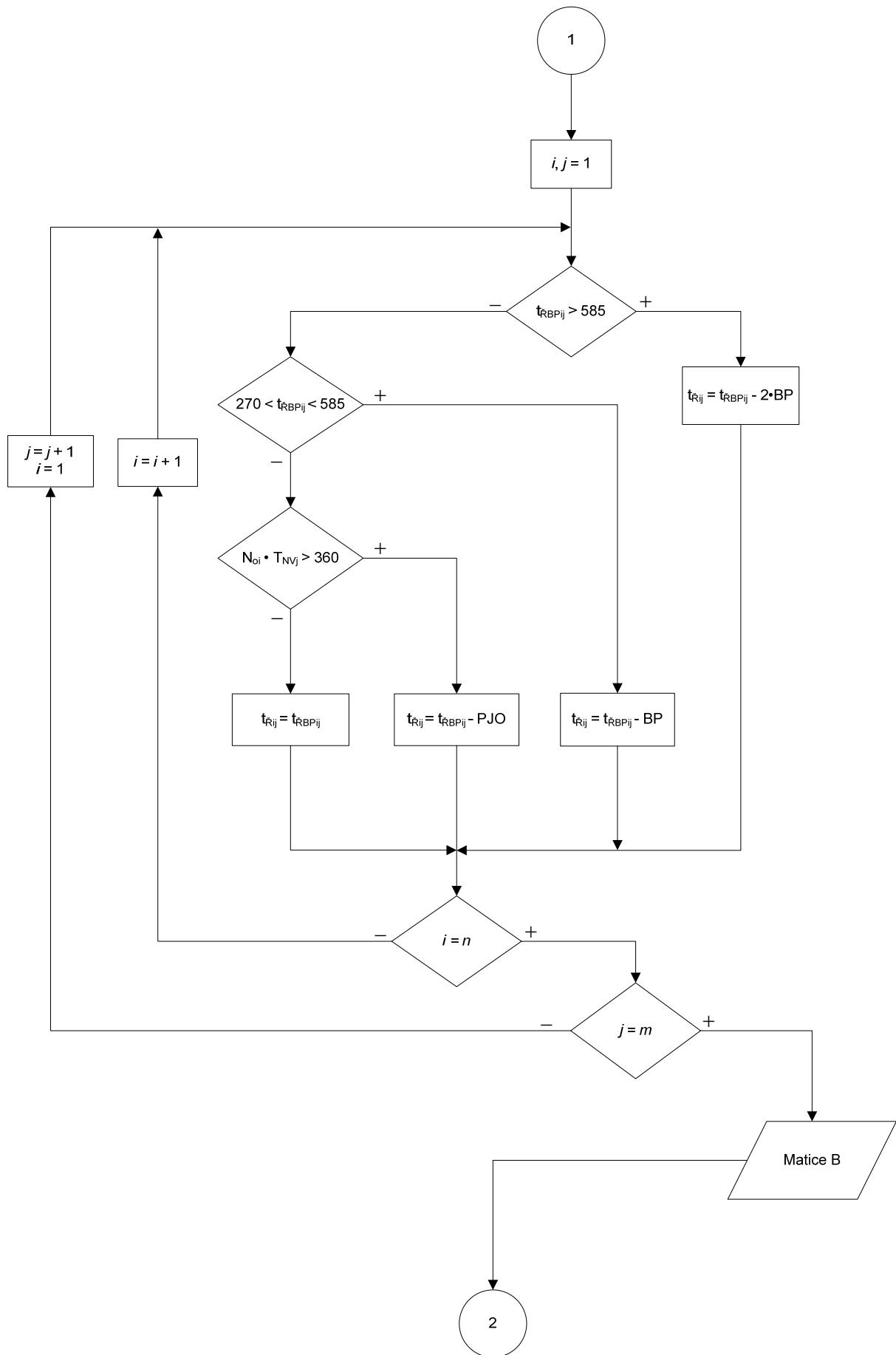
Ostatní aktivity doktoranda

- Hlavní organizátor **5. mezinárodní konference studentů a doktorandů evropských vysokých škol dopravních,**
- Člen řešitelského týmu projektu MD ČR – **Racionalizace dopravního provozu a rozsahu dopravní infrastruktury na mimokoridorových tratích,**
- Člen řešitelského týmu studie MD ČR – **Posouzení vlivu změny zákazů jízd pro nákladní vozidla – „Ekonomické dopady a přínosy pro dopravce, přepravce a společnost“,**
- Člen řešitelského týmu studie – **Analýza propustnosti a posouzení proveditelnosti návrhu Železničního uzlu Brno s hlavním osobním nádražím v neodsunuté poloze,**
- Oponent závěrečné zprávy společnosti KORID LK – **Kategorizace železničních tratí na území Libereckého kraje,**
- Řešitel a spoluřešitel interních grantů UPa a DFJP,
- spoluřešitel projektu **FLAVIA** (Freight and Logistics Advancement in Central/South-East Europe - Validation of trade and transport processes, Implementation of improvement actions, Application of co-coordinated structures).

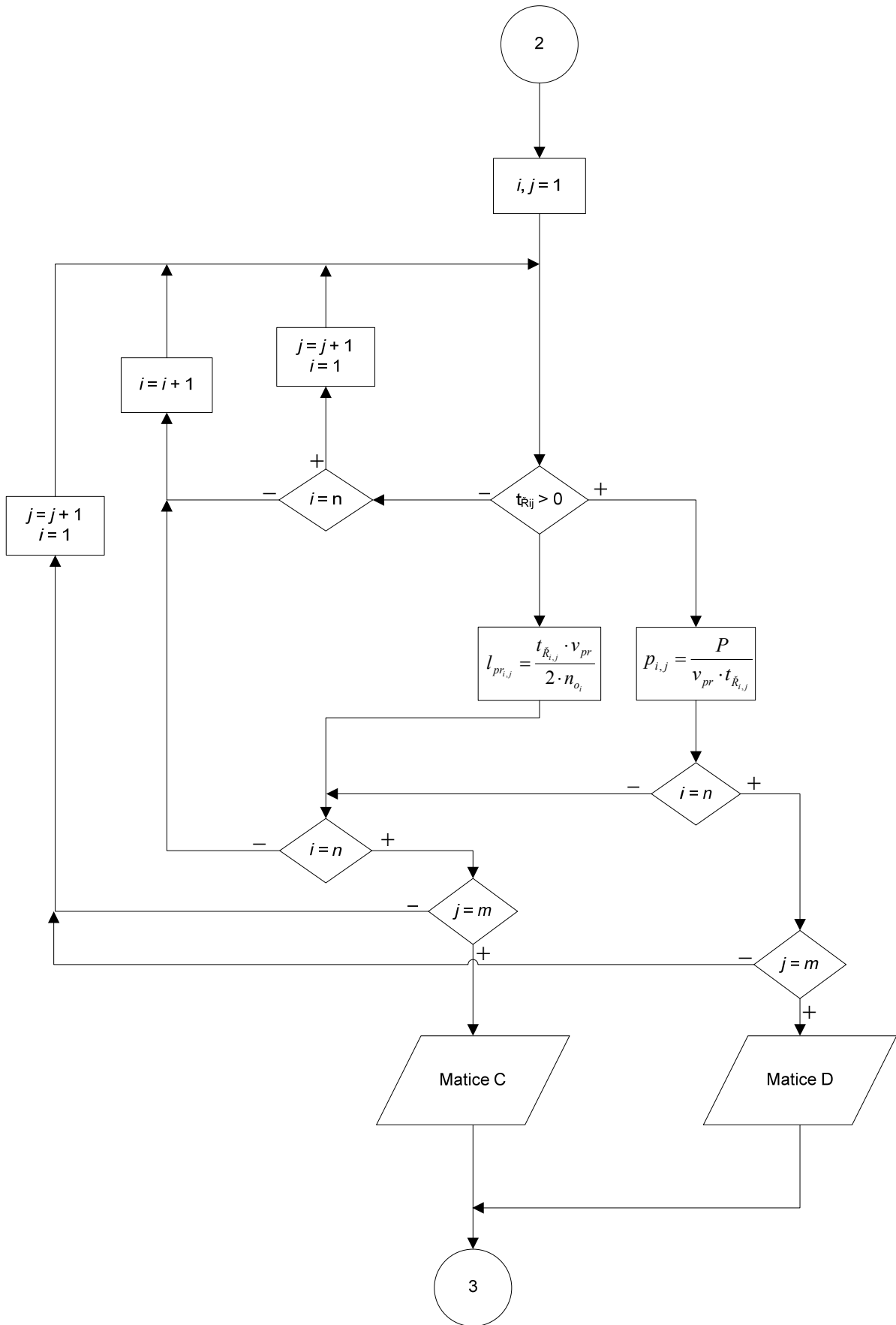
Vývojový diagram nově navrženého algoritmu



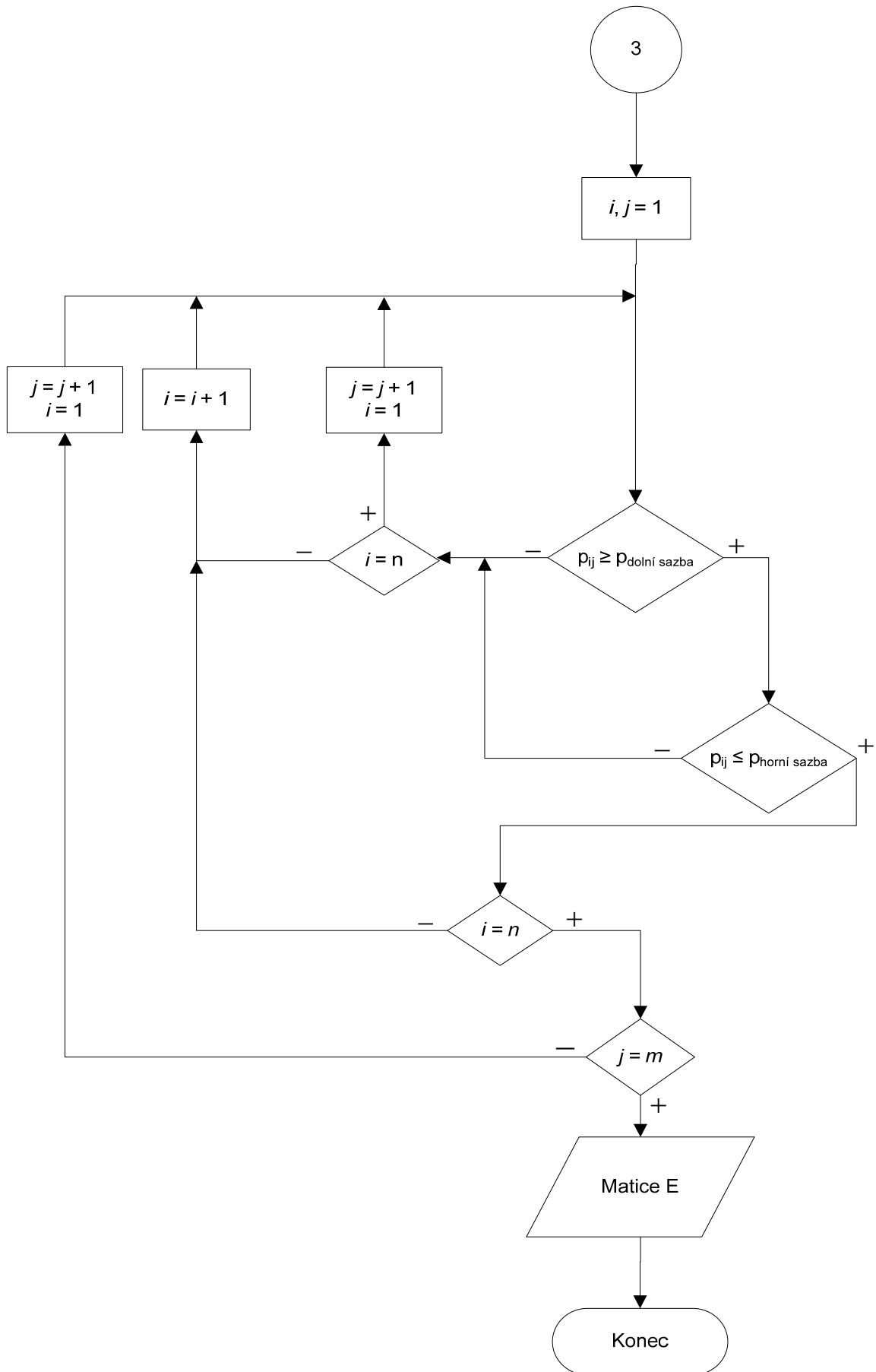
Vývojový diagram nově navrženého algoritmu



Vývojový diagram nově navrženého algoritmu



Vývojový diagram nově navrženého algoritmu



Prvotní matice A [min]

n₀	T_{NV}	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1		760	750	740	730	720	710	700	690	680	670	660	650	640	630	620	610	600	590
2		740	720	700	680	660	640	620	600	580	560	540	520	500	480	460	440	420	400
3		720	690	660	630	600	570	540	510	480	450	420	390	360	330	300	270	240	210
4		700	660	620	580	540	500	460	420	380	340	300	260	220	180	140	100	60	20
5		680	630	580	530	480	430	380	330	280	230	180	130	80	30				
6		660	600	540	480	420	360	300	240	180	120	60							
7		640	570	500	430	360	290	220	150	80	10								
8		620	540	460	380	300	220	140	60										
9		600	510	420	330	240	150	60											
10		580	480	380	280	180	80												
11		560	450	340	230	120	10												
12		540	420	300	180	60													
13		520	390	260	130														
14		500	360	220	80														
15		480	330	180	30														
16		460	300	140															
17		440	270	100															
18		420	240	60															
19		400	210	20															
20		380	180																
21		360	150																
22		340	120																
23		320	90																
24		300	60																
25		280	30																

Výsledná matice A [min]

n₀	T_{NV}	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1		690	690	690	690	690	690	690	690	680	670	660	650	640	630	620	610	600	590
2		690	690	690	680	660	640	620	600	580	560	540	520	500	480	460	440	420	400
3		690	690	660	630	600	570	540	510	480	450	420	390	360	330	300	270	240	210
4		690	660	620	580	540	500	460	420	380	340	300	260	220	180	140	100	60	20
5		680	630	580	530	480	430	380	330	280	230	180	130	80	30				
6		660	600	540	480	420	360	300	240	180	120	60							
7		640	570	500	430	360	290	220	150	80	10								
8		620	540	460	380	300	220	140	60										
9		600	510	420	330	240	150	60											
10		580	480	380	280	180	80												
11		560	450	340	230	120	10												
12		540	420	300	180	60													
13		520	390	260	130														
14		500	360	220	80														
15		480	330	180	30														
16		460	300	140															
17		440	270	100															
18		420	240	60															
19		400	210	20															
20		380	180																
21		360	150																
22		340	120																
23		320	90																
24		300	60																
25		280	30																

Maticе B [min]

n₀	T_{NV}	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1		600	600	600	600	600	600	600	600	590	580	570	560	550	540	530	520	510	500
2		600	600	600	590	570	550	530	510	535	515	495	475	455	435	415	395	375	355
3		600	600	570	540	510	525	495	465	435	405	375	345	315	285	255	270	240	210
4		600	570	530	535	495	455	415	375	335	295	255	260	220	180	140	100	60	20
5		590	540	535	485	435	385	335	285	235	230	180	130	80	30				
6		570	510	495	435	375	315	255	240	180	120	60							
7		550	525	455	385	315	245	220	150	80	10								
8		530	495	415	335	255	220	140	60										
9		510	465	375	285	240	150	60											
10		535	435	335	235	180	80												
11		515	405	295	230	120	10												
12		495	375	255	180	60													
13		475	345	260	130														
14		455	315	220	80														
15		435	285	180	30														
16		415	255	140															
17		395	270	100															
18		375	240	60															
19		355	210	20															
20		335	180																
21		315	150																
22		295	120																
23		275	90																
24		255	60																
25		235	30																

Matice C [km]

n₀	T_{NV}	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1		325,00	325,00	325,00	325,00	325,00	325,00	325,00	325,00	319,58	314,17	308,75	303,33	297,92	292,50	287,08	281,67	276,25	270,83
2		162,50	162,50	162,50	159,79	154,38	148,96	143,54	138,13	144,90	139,48	134,06	128,65	123,23	117,81	112,40	106,98	101,56	96,15
3		108,33	108,33	102,92	97,50	92,08	94,79	89,38	83,96	78,54	73,13	67,71	62,29	56,88	51,46	46,04	48,75	43,33	37,92
4		81,25	77,19	71,77	72,45	67,03	61,61	56,20	50,78	45,36	39,95	34,53	35,21	29,79	24,38	18,96	13,54	8,13	2,71
5		63,92	58,50	57,96	52,54	47,13	41,71	36,29	30,88	25,46	24,92	19,50	14,08	8,67	3,25				
6		51,46	46,04	44,69	39,27	33,85	28,44	23,02	21,67	16,25	10,83	5,42							
7		42,56	40,63	35,21	29,79	24,38	18,96	17,02	11,61	6,19	0,77								
8		35,89	33,52	28,10	22,68	17,27	14,90	9,48	4,06										
9		30,69	27,99	22,57	17,15	14,44	9,03	3,61											
10		28,98	23,56	18,15	12,73	9,75	4,33												
11		25,36	19,94	14,53	11,33	5,91	0,49												
12		22,34	16,93	11,51	8,13	2,71													
13		19,79	14,38	10,83	5,42														
14		17,60	12,19	8,51	3,10														
15		15,71	10,29	6,50	1,08														
16		14,05	8,63	4,74															
17		12,59	8,60	3,19															
18		11,28	7,22	1,81															
19		10,12	5,99	0,57															
20		9,07	4,88																
21		8,13	3,87																
22		7,26	2,95																
23		6,48	2,12																
24		5,76	1,35																
25		5,09	0,65																

Matice D [€]

n _o	T _{NV}	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,66
2		0,55	0,55	0,55	0,56	0,57	0,60	0,62	0,64	0,61	0,64	0,66	0,69	0,72	0,75	0,79	0,83	0,87	0,92
3		0,55	0,55	0,57	0,61	0,64	0,62	0,66	0,70	0,75	0,81	0,87	0,95	1,04	1,15	1,29	1,21	1,37	1,56
4		0,55	0,57	0,62	0,61	0,66	0,72	0,79	0,87	0,98	1,11	1,29	1,26	1,49	1,82	2,34	3,28	5,46	16,38
5		0,56	0,61	0,61	0,68	0,75	0,85	0,98	1,15	1,39	1,42	1,82	2,52	4,10	10,92				
6		0,57	0,64	0,66	0,75	0,87	1,04	1,29	1,37	1,82	2,73	5,46							
7		0,60	0,62	0,72	0,85	1,04	1,34	1,49	2,18	4,10	32,77								
8		0,62	0,66	0,79	0,98	1,29	1,49	2,34	5,46										
9		0,64	0,70	0,87	1,15	1,37	2,18	5,46											
10		0,61	0,75	0,98	1,39	1,82	4,10												
11		0,64	0,81	1,11	1,42	2,73	32,77												
12		0,66	0,87	1,29	1,82	5,46													
13		0,69	0,95	1,26	2,52														
14		0,72	1,04	1,49	4,10														
15		0,75	1,15	1,82	10,92														
16		0,79	1,29	2,34															
17		0,83	1,21	3,28															
18		0,87	1,37	5,46															
19		0,92	1,56	16,38															
20		0,98	1,82																
21		1,04	2,18																
22		1,11	2,73																
23		1,19	3,64																
24		1,29	5,46																
25		1,39	10,92																

Matice E [km]

n _o	T _{NV}	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1															292,50	287,08	281,67	276,25	270,83
2								143,54	138,13	144,90	139,48	134,06	128,65						
3					97,50	92,08	94,79	89,38											
4				71,77	72,45	67,03													
5			58,50	57,96	52,54														
6			46,04	44,69															
7			40,63																
8	35,89	33,52																	
9	30,69																		
10	28,98																		
11	25,36																		
12	22,34																		
13	19,79																		
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			

Prvotní matice A [min]

n _o	T _{NV}	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	
1	760	755	750	745	740	735	730	725	720	715	710	705	700	695	690	685	680	675	670	665	660	655	650	645	640	635	630	625	620	615	610	605	600	595	590		
2	740	730	720	710	700	690	680	670	660	650	640	630	620	610	600	590	580	570	560	550	540	530	520	510	500	490	480	470	460	450	440	430	420	410	400		
3	720	705	690	675	660	645	630	615	600	585	570	555	540	525	510	495	480	465	450	435	420	405	390	375	360	345	330	315	300	285	270	255	240	225	210		
4	700	680	660	640	620	600	580	560	540	520	500	480	460	440	420	400	380	360	340	320	300	280	260	240	220	200	180	160	140	120	100	80	60	40	20		
5	680	655	630	605	580	555	530	505	480	455	430	405	380	355	330	305	280	255	230	205	180	155	130	105	80	55	30	5									
6	660	630	600	570	540	510	480	450	420	390	360	330	300	270	240	210	180	150	120	90	60	30															
7	640	605	570	535	500	465	430	395	360	325	290	255	220	185	150	115	80	45	10																		
8	620	580	540	500	460	420	380	340	300	260	220	180	140	100	60	20																					
9	600	555	510	465	420	375	330	285	240	195	150	105	60	15																							
10	580	530	480	430	380	330	280	230	180	130	80	30																									
11	560	505	450	395	340	285	230	175	120	65	10																										
12	540	480	420	360	300	240	180	120	60																												
13	520	455	390	325	260	195	130	65																													
14	500	430	360	290	220	150	80	10																													
15	480	405	330	255	180	105	30																														
16	460	380	300	220	140	60																															
17	440	355	270	185	100	15																															
18	420	330	240	150	60																																
19	400	305	210	115	20																																
20	380	280	180	80																																	
21	360	255	150	45																																	
22	340	230	120	10																																	
23	320	205	90																																		
24	300	180	60																																		
25	280	155	30																																		
26	260	130																																			
27	240	105																																			
28	220	80																																			

Výsledná matice A [min]

n _o	T _{NV}	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	
1	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	685	680	675	670	665	660	655	650	645	640	635	630	625	620	615	610	605	600	595	590	
2	690	690	690	690	690	690	690	680	670	660	650	640	630	620	610	600	590	580	570	560	550	540	530	520	510	500	490	480	470	460	450	440	430	420	410	400	
3	690	690	690	675	660	645	630	615	600	585	570	555	540	525	510	495	480	465	450	435	420	405	390	375	360	345	330	315	300	285	270	255	240	225	210		
4	690	680	660	640	620	600	580	560	540	520	500	480	460	440	420	400	380	360	340	320	300	280	260	240	220	200	180	160	140	120	100	80	60	40	20		
5	680	655	630	605	580	555	530	505	480	455	430	405	380	355	330	305	280	255	230	205	180	155	130	105	80	55	30	5									
6	660	630	600	570	540	510	480	450	420	390	360	330	300	270	240	210	180	150	120	90	60	30															
7	640	605	570	535	500	465	430	395	360	325	290	255	220	185	150	115	80	45	10																		
8	620	580	540	500	460	420	380	340	300	260	220	180	140	100	60	20																					
9	600	555	510	465	420	375	330	285	240	195	150	105	60	15																							
10	580	530	480	430	380	330	280	230	180	130	80	30																									
11	560	505	450	395	340	285	230	175	120	65	10																										
12	540	480	420	360	300	240	180	120	60																												
13	520	455	390	325	260	195	130	65																													
14	500	430	360	290	220	150	80	10																													
15	480	405	330	255	180	105	30																														
16	460	380	300	220	140	60																															
17	440	355	270	185	100	15																															
18	420	330	240	150	60																																
19	400	305	210	115	20																																
20	380	280	180	80																																	
21	360	255	150	45																																	
22	340	230	120	10																																	
23	320	205	90																																		
24	300	180	60																																		
25	280	155	30																																		
26	260	130																																			
27	240	105																																			
28	220	80																																			

Matice B [min]

n _o	T _{NV}	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190		
1	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	595	590	585	580	575	570	565	560	555	550	545	540	535	530	525	520	515	510	505	500		
2	600	600	600	600	600	600	600	590	580	570	560	550	540	530	520	510	500	535	525	515	505	495	485	475	465	455	445	435	425	415	405	395	385	375	365	355		
3	600	600	600	585	570	555	540	525	510	540	525	510	495	480	465	450	435	420	405	390	375	360	345	330	315	300	285	270	255	240	270	255	240	225	210			
4	600	590	570	550	530	510	535	515	495	475	455	435	415	395	375	355	335	315	295	275	255	235	260	240	220	200	180	160	140	120	100	80	60	40	20			
5	590	565	540	515	535	510	485	460	435	410	385	360	335	310	285	260	235	255	230	205	180	155	130	105	80	55	30	5										
6	570	540	510	525	495	465	435	405	375	345	315	285	255	270	240	210	180	150	120	90	60	30																
7	550	515	525	490	455	420	385	350	315	280	245	255	220	185	150	115	80	45	10																			
8	530	535	495	455	415	375	335	295	255	260	220	180	140	100	60	20																						
9	510	510	465	420	375	330	285	240	240	195	150	105	60	15																								
10	535	485	435	385	335	285	235	230	180	130	80	30																										
11	515	460	405	350	295	240	230	175	120	65	10																											
12	495	435	375	315	255	240	180	120	60																													
13	475	410	345	280	260	195	130	65																														
14	455	385	315	245	220	150	80	10																														
15	435	360	285	255	180	105	30																															
16	415	335	255	220	140	60																																
17	395	310	270	185	100	15																																
18	375	285	240	150	60																																	
19	355	260	210	115	20																																	
20	335	235	180	80																																		
21	315	255	150	45																																		
22	295	230	120	10																																		
23	275	205	90																																			
24	255	180	60																																			
25	235	155	30																																			
26	260	130																																				
27	240	105																																				
28	220	80																																				

Matice C [km]

n _o	T _{NV}	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	
1		325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	325,0	322,3	319,6	316,9	314,2	311,5	308,8	306,0	303,3	300,6	297,9	295,2	292,5	289,8	287,1	284,4	281,7	279,0	276,3	273,5	270,8	
2		162,5	162,5	162,5	162,5	162,5	162,5	159,8	157,1	154,4	151,7	149,0	146,3	143,5	140,8	138,1	135,4	144,9	142,2	139,5	136,8	134,1	131,4	128,6	125,9	123,2	120,5	117,8	115,1	112,4	109,7	107,0	104,3	101,6	98,9	96,1	
3		108,3	108,3	108,3	105,6	102,9	100,2	97,5	94,8	92,1	97,5	94,8	92,1	89,4	86,7	84,0	81,3	78,5	75,8	73,1	70,4	67,7	65,0	62,3	59,6	56,9	54,2	51,5	48,8	46,0	43,3	48,8	46,0	43,3	40,6	37,9	
4		81,3	79,9	77,2	74,5	71,8	69,1	72,4	69,7	67,0	64,3	61,6	58,9	56,2	53,5	50,8	48,1	45,4	42,7	39,9	37,2	34,5	31,8	35,2	32,5	29,8	27,1	24,4	21,7	19,0	16,3	13,5	10,8	8,1	5,4	2,7	
5		63,9	61,2	58,5	55,8	58,0	55,3	52,5	49,8	47,1	44,4	41,7	39,0	36,3	33,6	30,9	28,2	25,5	27,6	24,9	22,2	19,5	16,8	14,1	11,4	8,7	6,0	3,3	0,5								
6		51,5	48,8	46,0	47,4	44,7	42,0	39,3	36,6	33,9	31,1	28,4	25,7	23,0	24,4	21,7	19,0	16,3	13,5	10,8	8,1	5,4	2,7														
7		42,6	39,9	40,6	37,9	35,2	32,5	29,8	27,1	24,4	21,7	19,0	19,7	17,0	14,3	11,6	8,9	6,2	3,5	0,8																	
8		35,9	36,2	33,5	30,8	28,1	25,4	22,7	20,0	17,3	17,6	14,9	12,2	9,5	6,8	4,1	1,4																				
9		30,7	30,7	28,0	25,3	22,6	19,9	17,2	14,4	14,4	11,7	9,0	6,3	3,6	0,9																						
10		29,0	26,3	23,6	20,9	18,1	15,4	12,7	12,5	9,8	7,0	4,3	1,6																								
11		25,4	22,7	19,9	17,2	14,5	11,8	11,3	8,6	5,9	3,2	0,5																									
12		22,3	19,6	16,9	14,2	11,5	10,8	8,1	5,4	2,7																											
13		19,8	17,1	14,4	11,7	10,8	8,1	5,4	2,7																												
14		17,6	14,9	12,2	9,5	8,5	5,8	3,1	0,4																												
15		15,7	13,0	10,3	9,2	6,5	3,8	1,1																													
16		14,0	11,3	8,6	7,4	4,7	2,0																														
17		12,6	9,9	8,6	5,9	3,2	0,5																														
18		11,3	8,6	7,2	4,5	1,8																															
19		10,1	7,4	6,0	3,3	0,6																															
20		9,1	6,4	4,9	2,2																																
21		8,1	6,6	3,9	1,2																																
22		7,3	5,7	3,0	0,2																																
23		6,5	4,8	2,1																																	
24		5,8	4,1	1,4																																	
25		5,1	3,4	0,7																																	
26		5,4	2,7																																		
27		4,8	2,1																																		
28		4,3	1,5																																		

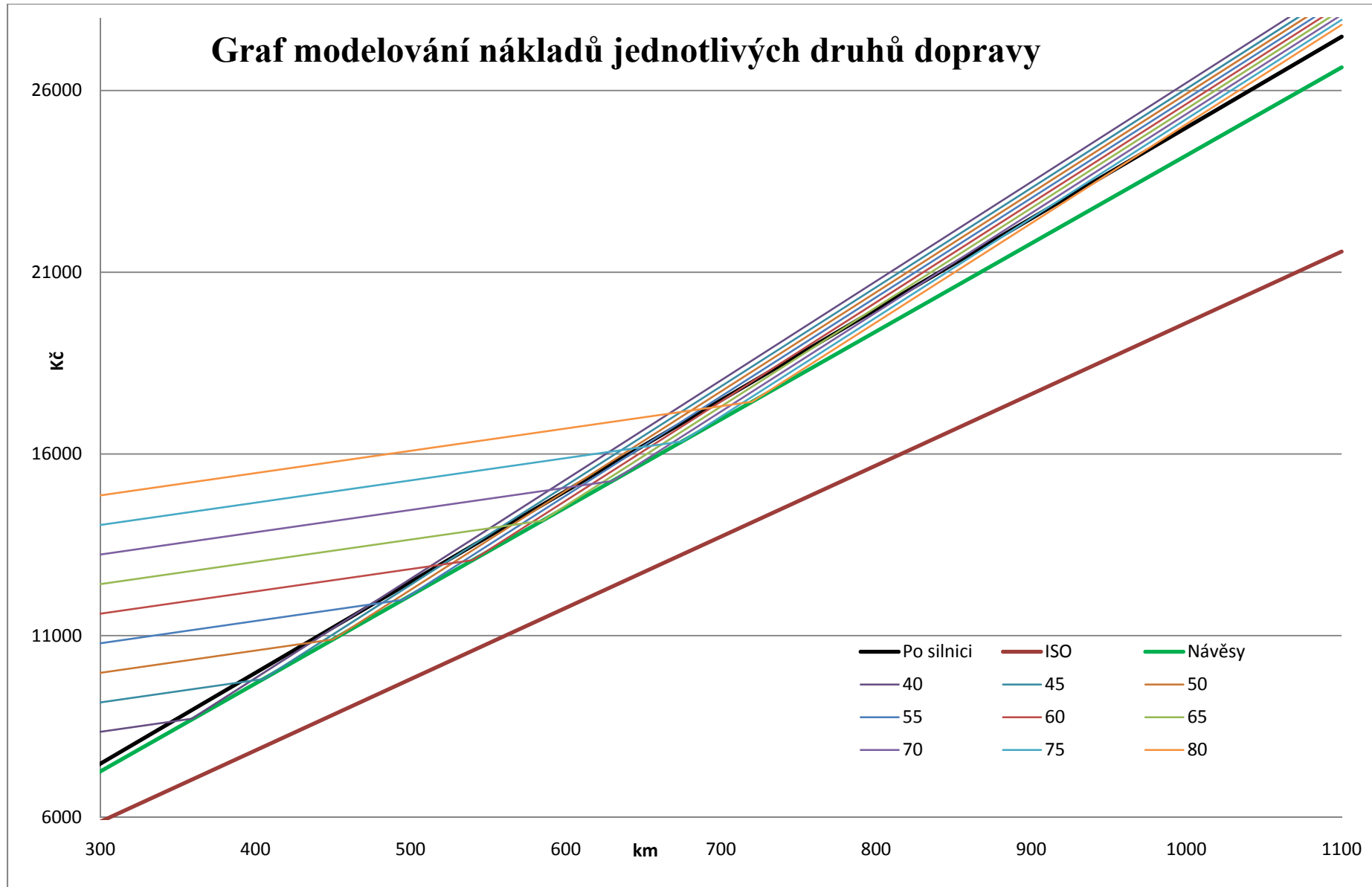
Matic D [€]

n _o	T _{NV}	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	
1		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,56	0,56	0,56	0,57	0,57	0,58	0,59	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62	0,62	0,63	0,64	0,64	0,65	0,66	
2		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,66	0,61	0,62	0,64	0,65	0,66	0,68	0,69	0,70	0,72	0,74	0,75	0,77	0,79	0,81	0,83	0,85	0,87	0,90	0,92	
3		0,55	0,55	0,55	0,56	0,57	0,59	0,61	0,62	0,64	0,61	0,62	0,64	0,66	0,68	0,70	0,73	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,91	0,95	0,99	1,04	1,09	1,15	1,21	1,29	1,37	1,21	1,29	1,37	1,46	1,56	
4		0,55	0,56	0,57	0,60	0,62	0,64	0,61	0,64	0,66	0,69	0,72	0,75	0,79	0,83	0,87	0,92	0,98	1,04	1,11	1,19	1,29	1,39	1,26	1,37	1,49	1,64	1,82	2,05	2,34	2,73	3,28	4,10	5,46	8,19	16,4	
5		0,56	0,58	0,61	0,64	0,61	0,64	0,68	0,71	0,75	0,80	0,85	0,91	0,98	1,06	1,15	1,26	1,39	1,29	1,42	1,60	1,82	2,11	2,52	3,12	4,10	5,96	11,0	65,5								
6		0,57	0,61	0,64	0,62	0,66	0,70	0,75	0,81	0,87	0,95	1,04	1,15	1,29	1,21	1,37	1,56	1,82	2,18	2,73	3,64	5,46	11,0														
7		0,60	0,64	0,62	0,67	0,72	0,78	0,85	0,94	1,04	1,17	1,34	1,29	1,49	1,77	2,18	2,85	4,10	7,28	32,8																	
8		0,62	0,61	0,66	0,72	0,79	0,87	0,98	1,11	1,29	1,26	1,49	1,82	2,34	3,28	5,46	16,4																				
9		0,64	0,64	0,70	0,78	0,87	0,99	1,15	1,37	1,37	1,68	2,18	3,12	5,46	21,9																						
10		0,61	0,68	0,75	0,85	0,98	1,15	1,39	1,42	1,82	2,52	4,10	11,0																								
11		0,64	0,71	0,81	0,94	1,11	1,37	1,42	1,87	2,73	5,04	32,8																									
12		0,66	0,75	0,87	1,04	1,29	1,37	1,82	2,73	5,46																											
13		0,69	0,80	0,95	1,17	1,26	1,68	2,52	5,04																												
14		0,72	0,85	1,04	1,34	1,49	2,18	4,10	32,8																												
15		0,75	0,91	1,15	1,29	1,82	3,12	11,0																													
16		0,79	0,98	1,29	1,49	2,34	5,46																														
17		0,83	1,06	1,21	1,77	3,28	21,9																														
18		0,87	1,15	1,37	2,18	5,46																															
19		0,92	1,26	1,56	2,85	16,4																															
20		0,98	1,39	1,82	4,10																																
21		1,04	1,29	2,18	7,28																																
22		1,11	1,42	2,73	32,8																																
23		1,19	1,60	3,64																																	
24		1,29	1,82	5,46																																	
25		1,39	2,11	11,0																																	
26		1,26	2,52																																		
27		1,37	3,12																																		
28		1,49	4,10																																		

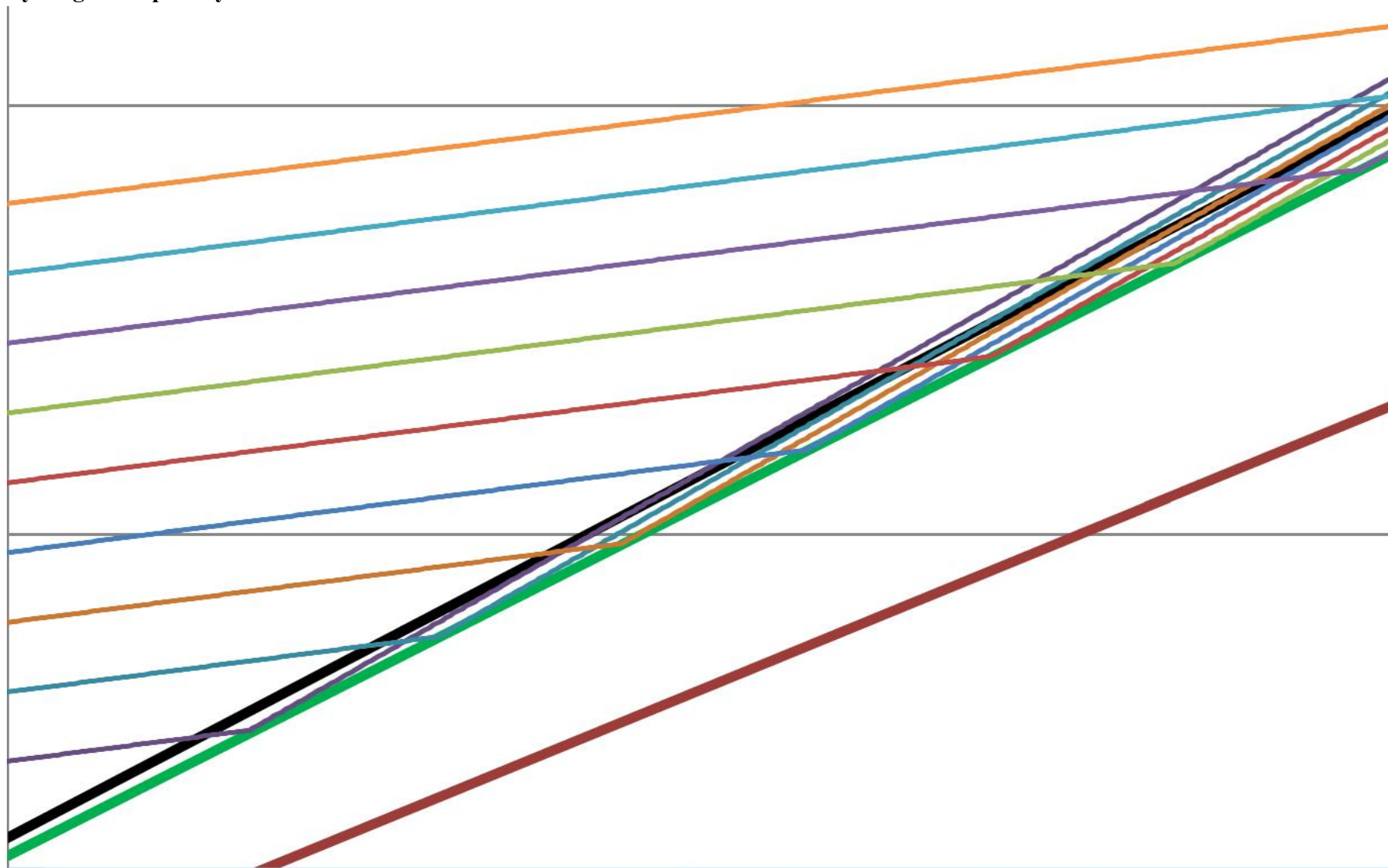
Matice E [km]

n _o	T _{NV}	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190			
1																											295,2	292,5	289,8	287,1	284,4	281,7	279,0	276,3	273,5	270,9			
2													146,3	143,5	140,8	138,1	135,4	144,9	142,2	139,5	136,8	134,1	131,4	128,7															
3								97,5	94,8	92,1	97,5	95,0	92,1	89,4	86,7																								
4					71,8	69,1	72,5	69,7	67,0	64,3																													
5			58,5	55,8	58,0	55,3	52,5																																
6		48,8	46,0	47,4	44,7																																		
7		39,9	40,6	37,9																																			
8	35,9	36,2	33,5																																				
9	30,7	30,7																																					
10	29,0	26,2																																					
11	25,4																																						
12	22,3																																						
13	19,8																																						
14																																							
15																																							
16																																							
17																																							
18																																							
19																																							
20																																							
21																																							
22																																							
23																																							
24																																							
25																																							
26																																							
27																																							
28																																							

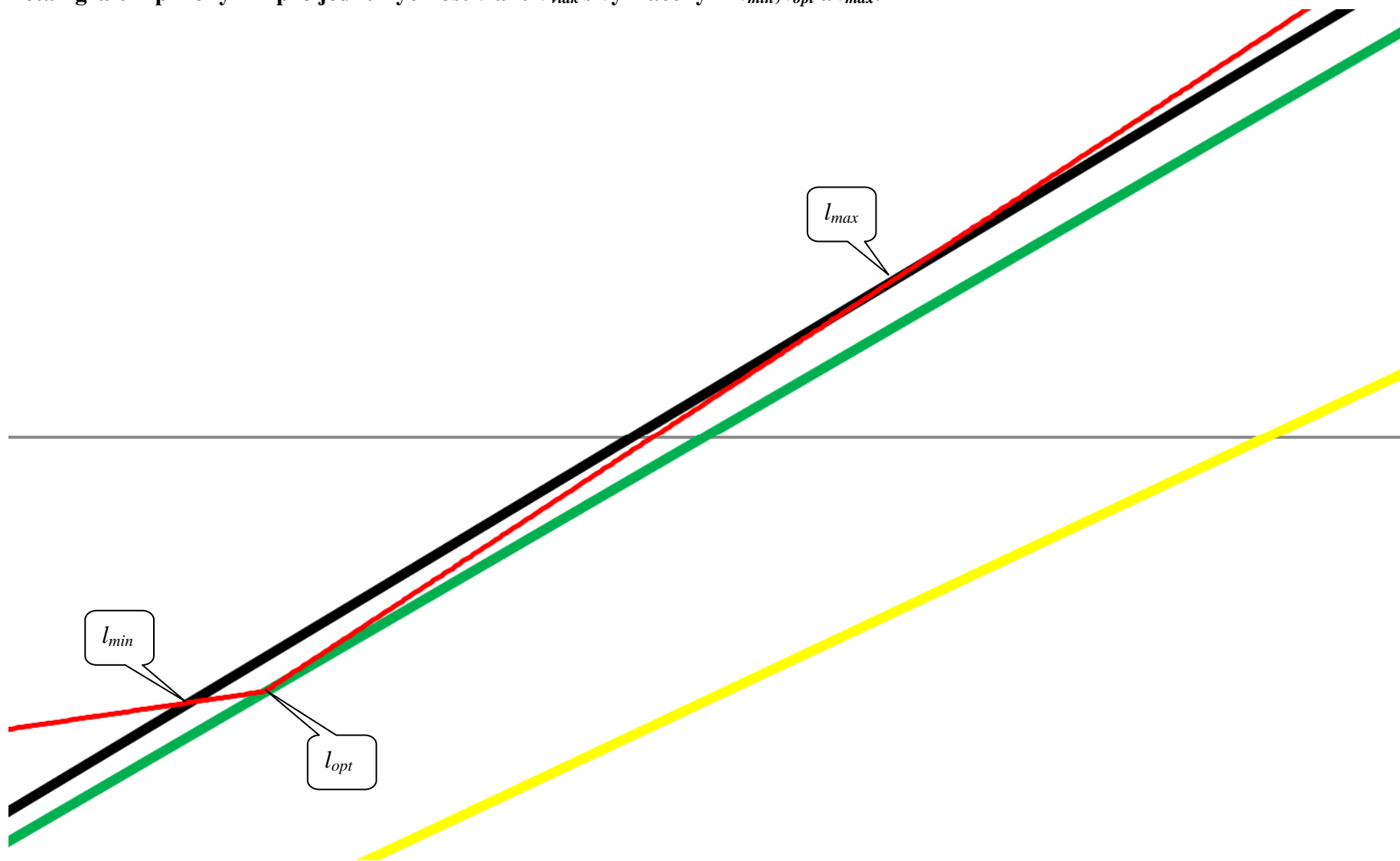
Graf modelování nákladů jednotlivých druhů dopravy



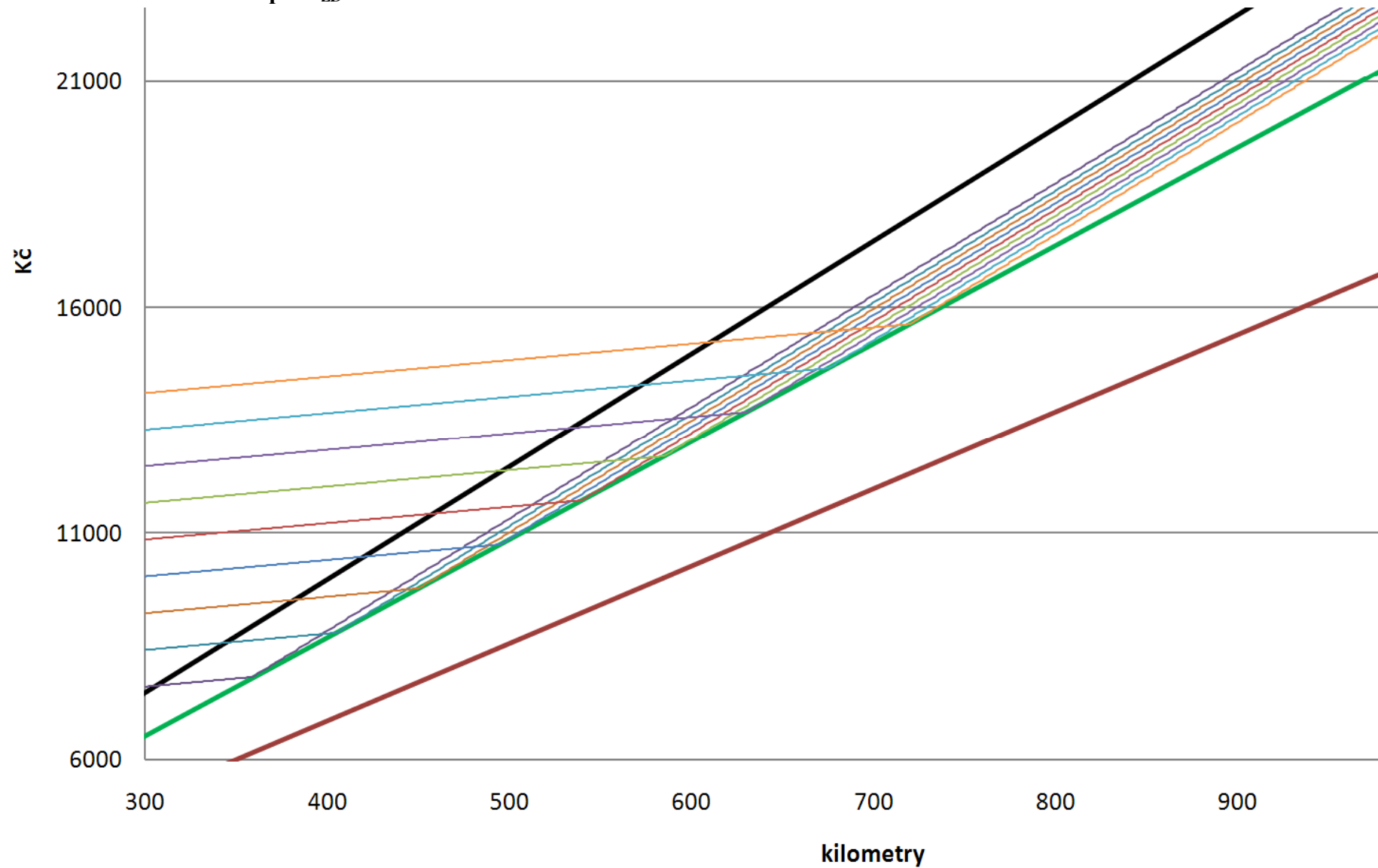
Výřez grafu z přílohy 4-1.



Detail grafu z přílohy 4-1 pro jednu rychlost vlaku v_{vlak} s vyznačenými l_{min} , l_{opt} a l_{max} .



Graf modelování nákladů pro $c_{zD} = 15 \text{ Kč}\cdot\text{km}^{-1}$



Graf modelování nákladů pro $c_{zD} = 20 \text{ Kč}\cdot\text{km}^{-1}$

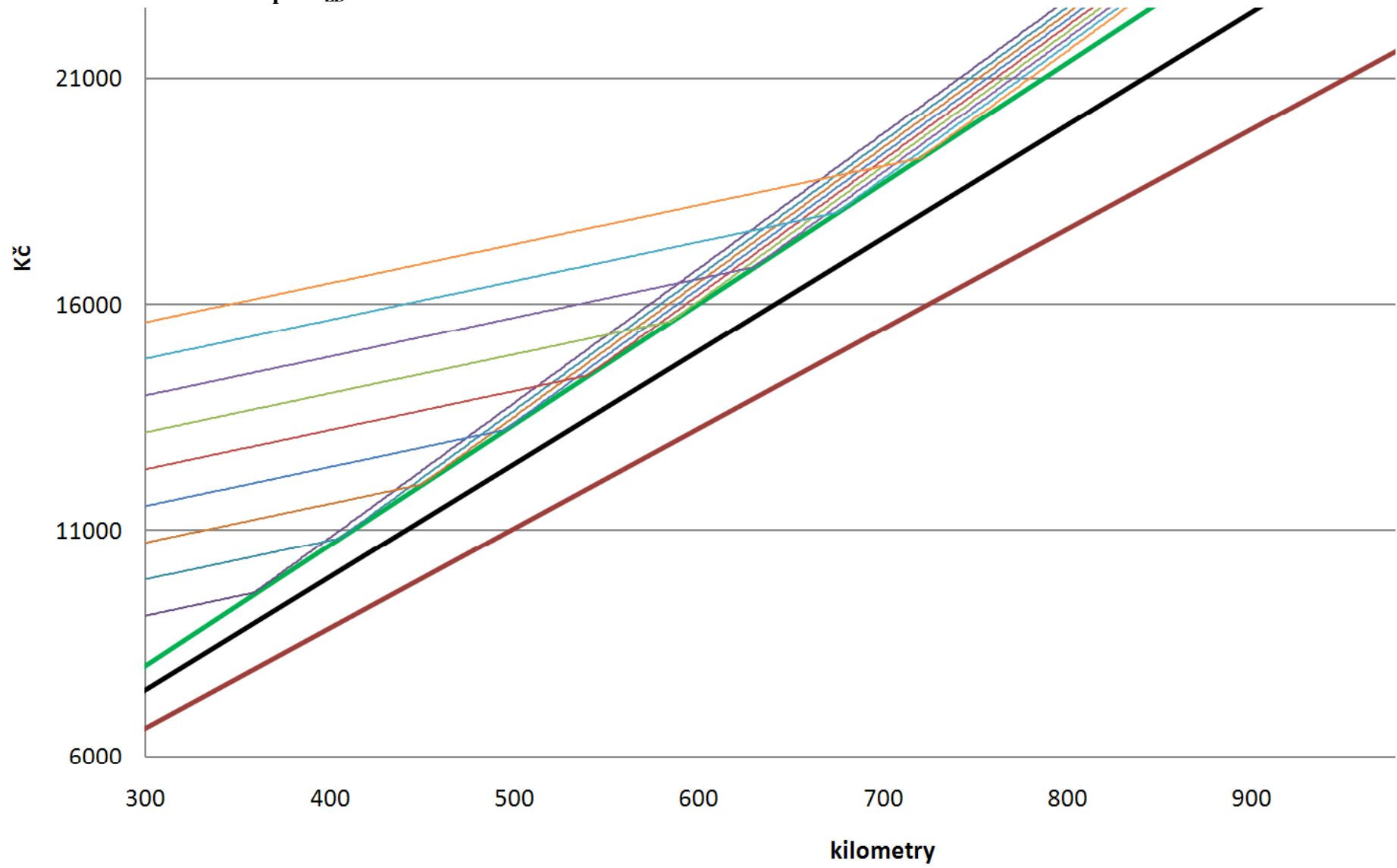


Schéma rozhodovacího procesu za jakých podmínek zavést linku KD

