



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

NÁSTROJE A METODICKÝ PŘÍSTUP K MODELOVÁNÍ MULTIMODÁLNÍ PŘEPRAVY ODPADŮ

TOOLS AND METHODOLOGICAL APPROACH FOR MULTIMODAL WASTE TRANSPORT MODELLING

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. David Poul

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

BRNO 2025

ABSTRAKT

POUL David: Nástroje a metodický přístup k modelování multimodální přepravy odpadů

S rostoucím množstvím odpadu, které produkuje dnešní společnost, je nezbytné se věnovat zefektivnění jeho nakládání, snižovat jeho produkci a celkově optimalizovat odpadové hospodářství. Důležitou roli také hraje doprava odpadu. Výrazná pozornost je věnovaná optimalizaci svozu odpadu, menší pozornost směřuje na přepravu odpadu na větší vzdálenosti, obzvláště při využití multimodální přepravy. U dnes využívaných modelů je řada věcí často výrazně zjednodušena, nejsou zahrnuty všechny části řetězce či zde chybí provazba na reálnou infrastrukturu. Představovaná práce má za cíl sestavit nástroj pro hodnocení multimodální přepravy, který adresuje nedostatky současných modelů a bude umožňovat hodnotit nejen celý dopravní řetězec, ale také jeho jednotlivé části. Navržený technicko-ekonomický model multimodální přepravy se primárně zaměřuje na dopravu v rámci odpadového hospodářství. Je ale vytvořen jako univerzální nástroj pro hodnocení širokého spektra přeprav. Model integruje silniční a železniční síť založenou na reálné infrastruktuře České republiky a obsahuje rozsáhlou databázi dopravních prostředků, ze kterých si uživatel modulárně sestaví dopravní systém vhodný pro řešenou problematiku. Technické vyhodnocení zahrnuje především stanovení hmotnosti, nalezení vhodné dopravní cesty, výpočet teoretické spotřeby paliva/energie a s tím související produkci emisí z výfukových plynů či detailní vyhodnocení časového průběhu. Navazující ekonomické vyhodnocení podrobně specifikuje rozpad nákladů a stanovuje předpoklad rozložení příjmů a výdajů během doby trvání projektu. Model byl ověřen na řadě případových studiích a společně s tím byla stanovena metodika použití modelu a jeho integrace do řešených případů, což bylo představeno na vybraných tématech.

Klíčová slova: *multimodální přeprava, silniční doprava, železniční doprava, technicko-ekonomický model, odpadové hospodářství, logistika, metodika*

ABSTRACT

POUL David: Tools and methodical approach for multimodal waste transport modelling

With the increasing amount of waste produced by today's society, it is essential to focus on making its treatment more efficient, reducing its production, and optimizing waste management overall. Waste transport plays a crucial role in this process. While significant attention is paid to optimizing waste collection, less focus is given to transporting waste over longer distances, especially when using multimodal transport. Current research and models often simplify many aspects, exclude parts of the chain, or lack connection to real infrastructure. This work aims to develop a tool for evaluating multimodal transport (road and rail), addressing the shortcomings of existing models. It allows for the evaluation of not only the entire transport chain but also its individual parts. The proposed techno-economic model of multimodal transport primarily focuses on transport within waste management. However, it is designed as a general tool for evaluating a wide range of transport scenarios. The model integrates the road and rail network based on the real infrastructure of the Czech Republic and includes an extensive database of transport system elements, from which user can modularly assemble a transport system suitable for specific scenarios. The technical evaluation includes determining weight, finding transport route, calculating theoretical fuel/energy consumption, and related exhaust gas emissions, as well as detailed time calculations. The subsequent economic evaluation provides a detailed breakdown of costs and estimates the distribution of income and expenses over the project's duration. The model was verified through several case studies, and a methodology for using the model and integrating it into solved cases was established, which was presented on selected topics.

Keywords: *multimodal transport, road transport, rail transport, technical-economic model, waste management, logistics, methodology*

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POUL, David. *Nástroje a metodický přístup k modelování multimodální přepravy odpadů*. Dizertační práce. Martin PAVLAS (školitel). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své disertační práce doc. Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. nejen za odborné vedení disertační práce, ale i důležité rady, inspirativní směřování, přátelskou atmosféru a časovou flexibilitu během mého studia. Chtěl bych také poděkovat Ing. Jiřímu Gregorovi, Ph.D. jakožto vedoucímu školiteli a všem kolegům, se kterými jsem mohl spolupracovat. Díky také patří rodině za podporu během celé délky studia.

OBSAH

1	Úvod.....	6
2	Rešerše.....	9
3	Cíle práce.....	11
4	Technicko-ekonomický model	13
4.1	Infrastrukturní síť	14
4.2	Dopravní systémy.....	15
4.3	Technické vyhodnocení	15
4.3.1	Technické vyhodnocení silniční dopravy	16
4.3.2	Technické vyhodnocení železniční dopravy	19
4.4	Environmentální vyhodnocení.....	23
4.5	Ekonomické vyhodnocení	24
4.6	Submodel přeložení.....	25
5	Implementace technicko-ekonomického modelu	27
5.1	Integrace do optimalizačních úloh.....	28
6	Zásady použití	29
7	Aplikace a využití modelu	31
7.1	Hodnocení regionální distribuce vodíku	32
8	Diskuse	35
9	Závěry	37
10	Seznam použité literatury	38
	Seznam obrázků	40
	Seznam tabulek.....	40

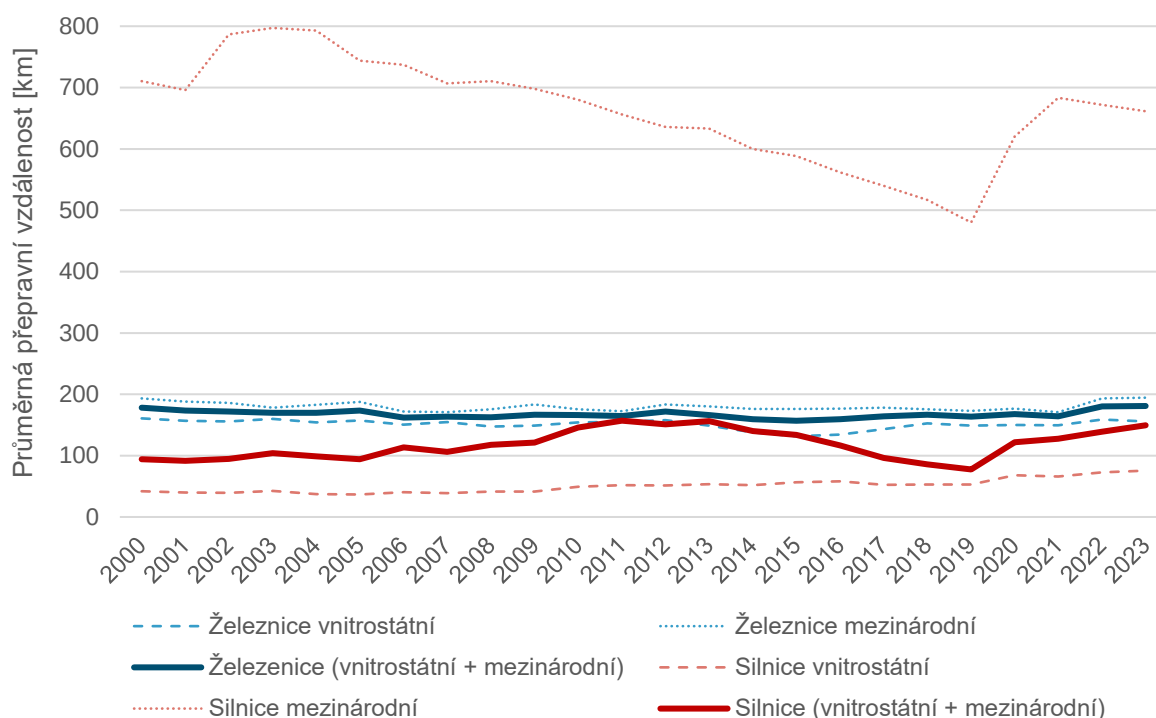
1 ÚVOD

Snadná doprava osob či zboží napříč celým světem je v dnešní době brána v podstatě jako samozřejmost. Stále se zvyšující čísla přeprav dokládají její důležitost, ať už se jedná o dopravu silniční, železniční či lodní, která je klíčovou složkou při dopravě mezi kontinenty, především v případě přepravy zboží. V Evropské unii mezi roky 1995 a 2022 narostla osobní přeprava o 25 %, nákladní dokonce o 45 % [1]. Shodným klíčovým parametrem pro všechny typy dopravy, který se sleduje a vyhodnocuje, je čas a především cena. V posledních letech ale začíná mít čím dál větší váhu také produkce emisí. Skloňována je nejčastěji produkce emisí CO₂, jakožto významného plynu z pohledu skleníkových emisí, v případě lodní dopravy pak také emise SO₂.

Společnost a průmysl jsou motivováni ke snižování zátěže životního prostředí. Jednou z hlavních oblastí, kde se tak děje, je právě doprava, která v roce 2022 tvořila 29 % z celkové tvorby emisí skleníkových plynů v rámci EU [1], v případě České republiky (ČR) se jednalo zhruba o 17 % [2]. Kvůli tomu je dopravní sektor v posledních letech cílem značných investic do inovací.

Na regionální či mezistátní úrovni je významná část dopravy vykonávána po silnici. Silniční doprava je ale často spojována se značnou emisní zátěží, což vede ke snahám přesunout větší či menší část přeprav na železnici. Železniční doprava je obecně brána jako ekologický způsob dopravy zboží, kdy v porovnání s ostatními druhy dopravy jako je silniční, letecká či lodní, má železniční doprava nejnižší emise CO₂ [3]. Díky tomu může být atraktivní i v případech, kdy nabízí lehce vyšší náklady oproti ostatním druhům dopravy, především v porovnání se silniční dopravou. U řady nových projektů se také často stává, že železniční doprava je preferována či přímo vyžadována již od počátku jako hlavní způsob dopravy např. právě díky snaze o ekologickou formu dopravy [4].

Objem silniční dopravy dlouhodobě výrazně roste, u železniční dopravy naopak přepravní výkony dlouhodobě spíše mírně klesají [4]. I přesto, že silniční doprava je využívána častěji, hraje železniční doprava klíčovou roli v každodenní přepravě různých komodit. Její použití se však zpravidla vyplatí pouze od určitých vzdáleností, konkrétního množství a druhu přepravované komodity. Obr. 1 zobrazuje vývoj průměrné přepravní vzdálenosti v ČR pro oba typy dopravy. Čárkovaná čára zobrazuje průměrnou vzdálenost pro vnitrostátní přepravu, tečkovaná čára pro mezinárodní přepravu z/do ČR. Plná čára zobrazuje průměrnou přepravní vzdálenost pro oba režimy dopravy. V případě silniční dopravy je vidět, že pro mezinárodní dopravu jsou typické dlouhé vzdálenosti, v průměru 663 km za celé období. Naopak pro vnitrostátní přepravu jsou vzdálenosti spíše kratší, v průměru 51 km. Celková průměrná přepravní vzdálenost pro silniční dopravu je 118 km. Vyplývá tak, že větší množství se přepravuje vnitrostátně – 87 % v roce 2023 [5]. Pro železniční dopravu jsou vzdálenosti ve vnitrostátní a mezinárodní přepravě výrazně bližší. Mezinárodní přeprava má průměrnou přepravní vzdálenost 180 km, vnitrostátní poté 151 km. Celková průměrná přepravní vzdálenost pro železniční dopravu je 168 km. Z pohledu množství vnitrostátní přeprava činí pouze 35 %.



Obr. 1: Průměrná přepravní vzdálenost pro silniční a železniční dopravu v rámci ČR, na základě dat Ministerstva dopravy ČR [5], [6], [7], [8], [9]

Tab. 1 uvádí základní přehled údajů pro silniční a železniční dopravu v ČR pro rok 2023 na základě dat Ministerstva dopravy ČR.

Tab. 1: Základní přehled silniční a železniční přepravy v ČR pro rok 2023, na základě dat Ministerstva dopravy ČR [5],[6],[7],[8],[9]

Rok 2023	Silniční doprava	Železniční doprava
Množství – celková přeprava [mil. t]	433,7	83,1
Vnitrostátní přeprava [mil. t]	379,0	29,0
Mezinárodní přeprava [mil. t]	54,7	54,1
Průměrná vzdálenost – celkově [km]	149	181
Vnitrostátní přeprava [km]	76	156
Mezinárodní přeprava [km]	662	194

Při využití dvou a více způsobů dopravy lze hovořit o multimodální přepravě. Nejčastěji se lze setkat s kombinací silniční a železniční dopravy, využívá se ale i kombinací s leteckou či vodní dopravou. Terminologie dle ČSN 26 9375 udává názvosloví [10]:

Multimodální přeprava – přeprava zboží nejméně dvěma různými druhy dopravy.

Intermodální přeprava – multimodální přeprava, kdy po celou dobu přepravy je zbožíloženo v jedné přepravní jednotce nebo silničním vozidle a při měnících se druzích dopravy není se zbožím nijak manipulováno.

Kombinovaná doprava – intermodální přeprava, kdy většina trasy je uskutečněna po železnici nebo vodě, přičemž počáteční a závěrečná část je uskutečněna po silnici a je zpravidla co nejkratší.

Multimodální přeprava se těší značnému rozvoji, jelikož pomáhá snižovat zatížení vlivem silniční dopravy a související tvorby emisí z výfukových plynů. Výhodou multimodální přepravy je právě efektivní využití různých módů dopravy.

Jednou z výrazných a aktivně se rozrůstajících oblastí v Evropě se zaměřením na železniční/multimodální přepravu je doprava odpadů, respektive komplexní využití železniční dopravy v odpadovém hospodářství. Děje se tak díky celkovému přístupu jednotlivých států a jejich koncepcí odpadového hospodářství. To vede k potřebě nastavit udržitelný systém celého odpadového hospodářství, kdy důležitou složkou je právě logistika. Železniční doprava zde tak uplatňuje svoji pozici udržitelné, stabilní a ekologické dopravy [11]. Železnice je k přepravě odpadů využívána v okolních státech jako je Německo, Rakousko či Švýcarsko. Zejména v těchto státech byl v řadě projektů např. pro výstavbu zařízení pro energetické využití odpadů (ZEVO), již od počátku vyžadován podíl návozu odpadu po železnici [4]. Může se tak jednat o scénář, kdy v rámci regionu dojde ke svozu odpadu do lokálního svozového centra, kde je odpad přeložen do kontejnerů a naložen na železniční soupravu. Po železnici je pak odpad přepravován např. do ZEVO. V případě německého ZEVO Schwandorf je po železnici dopravováno 80 % odpadu. Systém se skládá z 9 překládacích stanic s frekvencí dvou vlaků denně. Za rok 2021 bylo po železnici dopraveno 380 000 t odpadu [12]. Doprava odpadu po železnici je využívána také v USA, kdy řada měst vyváží odpad z města na skládky odpadu, které jsou vzdálené až stovky kilometrů. V těchto případech má železnice nezastupitelnou roli. Jako příklad lze uvést společnost WIN Waste Innovations, která po železnici ročně přepraví přes 5 mil. tun odpadu, převážně stavebního ale i komunálního [13]. Je ale nutno podotknout, že konkrétně v USA by celkový přínos železnice mohl být vyšší, a to z důvodu, že většina místní železniční sítě je neelektrifikovaná a jsou tak využívány dieselové lokomotivy.

V Rakousku začalo v roce 2023 platit nařízení, že přepravovaný odpad nad 10 tun musí být přepravován po železnici, pokud dopravovaná vzdálenost přesáhne 300 km. V roce 2024 pak limit klesl na 200 km a od roku 2026 by měl platit limit 100 km. Očekává se, že až 15 mil. tun odpadu může být přepraveno po železnici [14].

V České republice je železnice v rámci odpadového hospodářství využívána minimálně. Lze se setkat převážně s dopravou kovového šrotu a v jednom případě také s dopravou směsného komunálního odpadu (SKO). Ta probíhá ze Svitav a Zábřehu do stanice Brno-Slatina, odkud jsou následně kontejnery přepraveny do ZEVO SAKO Brno [15].

Využití multimodální přepravy může být výhodné, obecně ale vnáší komplexnost do dopravního řetězce vzhledem k využití více módů dopravy, s čímž se pojí nutné přeložení, podrobnější plánování apod. Je tak nutné důkladně vyhodnotit technické aspekty navrženého řešení, které se promítnou do ekonomiky celého provozu. Na základě prvotní analýzy a konzultací vyplynulo, že pro společnosti a zainteresované osoby je obtížné takové vyhodnocení provést. Častým znakem je menší zkušenost s plánováním komplexního dopravního řetězce. Chybí také efektivní nástroj pro hodnocení přínosů (technických, ekonomických či environmentálních) multimodální přepravy. Současně je nutné identifikovat a popsat bariéry jednotlivých módů dopravy a nabídnout řešení, jak s nimi pracovat či jak je eliminovat. Výstup z nástroje může pomoci společností definovat podklady pro výběrové řízení či obchodní vyjednávání. S příchodem EU taxonomie, která stanovuje pravidla pro posuzování, zda jsou podnikatelské činnosti skutečně udržitelné z environmentálního hlediska, také bude nutné definovat jednotlivé kroky či změny a přesně vyčíslit jejich dopady. To dále klade nároky na nutné podrobné vyhodnocení dané problematiky.

Představená disertační práce se zaměřuje především na multimodální přepravu z pohledu silniční a železniční dopravy, doprava vodní a letecká není řešena.

2 REŠERŠE

Rešerše je rozdělena na dva hlavní bloky. První z nich je rešerše zaměřená na odborné a výzkumné zdroje mapující současný stav z pohledu technicko-ekonomických modelů pro hodnocení dopravních úloh. Druhý blok se zaměřuje na technickou rešerši z pohledu reálné přepravy, především se zaměřením na přepravu odpadu a intermodální systémy.

Z literární rešerše vyplývá, že většina modelů se věnuje optimalizačním úlohám. S tím se pojí převážně zjednodušené definování vstupních parametrů pro snížení výpočetních nároků. Je tak obtížné najít odborné publikace, které by detailněji specifikovaly technické či ekonomické parametry. Dále také vyplývá, že pouze menší množství publikací se věnuje multimodální přepravě jako celku. Řada z nich se navíc omezuje pouze na intermodální dopravu (stejná přepravní jednotka), kde je pouze jeden typ přeložení. Většina publikací se pak věnuje pouze konkrétní části dané problematiky.

V aktuálních publikacích se lze častěji setkat s hodnocením produkce emisí, především CO₂, což některé modely hodnotí detailně. Dopravní náklady jsou v uvedených modelech hodnoceny okrajově a zjednodušeně. Pravděpodobně nejvíce přehlíženou částí modelů je specifikace jízdních souprav, která je spíše obecná. Tento problém nastává především u železniční dopravy, která je v uvedených modelech hodnocena minimálně a pokud, tak právě její specifikace postrádá detailnější parametry.

Infrastrukturní síť je v daných modelech často výrazně zjednodušena, je specifikována pouze celkovou vzdáleností bez zohlednění geometrického profilu, tedy např. sklonových poměrů a rozdílů ve spotřebě mezi jednotlivými dopravními cestami. V modelech také nejsou rozlišeny náklady na úseky s mýtem a bez mýta.

Kritickou vlastností modelů je zahrnutí všech částí logistického řetězce – v případě opomenutí i drobných částí může docházet ke zkreslení výsledků, což může zvýhodňovat určitý typ přepravy.

Z pohledu komerčních, veřejně dostupných nástrojů nebyl nalezen nástroj, který by dokázal hodnotit multimodální přepravu jako celek ve větším detailu. Z pravidla se jedná o online kalkulačky pro výpočet emisní stopy či základních ekonomických parametrů, které mají zjednodušené zadávání vstupních parametrů a neumožňují detailnější specifikaci jízdních souprav.

Technická rešerše se primárně soustředila na odpadové hospodářství a možnosti přepravy odpadu. Má za cíl především představit řešení a uvést jednotlivé možnosti spolu s jejich parametry, které budou sloužit jako podklad pro databázi dopravních systémů či pro definování samotného výpočtu, jeho možností a specifik. Základní možnosti přepravy odpadu lze popsat v několika stupních:

- 1) Silniční doprava.
- 2) Multimodální přeprava – využití různých přepravních jednotek.
- 3) Intermodální přeprava – využití intermodálních jednotek.

Samostatná železniční doprava není uvažována, jelikož ve většině případů je vždy část přepravy, řešena po silnici (např. samotný svoz odpadu). Prvním stupněm přepravy odpadu tak je využití pouze silniční dopravy. Odpad může být přepraven do zpracovatelského zařízení pouze ve svozovém voze. Variantou je také přeložení ze svozového vozu např. do návěsu typu Walking floor. I přesto, že je zde přeložení do jiné přepravní jednotky, jedná se pouze o využití silniční dopravy, nelze tak hovořit o multimodální přepravě.

Druhým stupněm je využití zmíněné multimodální přepravy, tedy využití více dopravních módů (typů) s tím, že komodita je přeložena do jiné přepravní jednotky. Např. silniční doprava je

realizována svozovým vozem či návěsem typu Walking floor, ze kterého je odpad vysypán na zem. Následně je kolovým nakladačem odpad naložen do vysokostěnného železničního vozu, kterým je odpad přepravován do koncového zařízení.

Třetím stupněm je využití intermodální přepravy, tedy multimodální přepravy, kdy přeprava probíhá v jedné přepravní jednotce. Jako příklad lze uvést naložení odpadu do kontejneru, který je nejdříve naložen na silniční návěs a dopraven k železniční vlečce, kde je naložen na železniční intermodální vůz a přepraven do koncového zařízení. Celá přeprava odpadu tak probíhá v jedné přepravní jednotce, během přeložení na jiný dopravní mód není manipulováno s odpadem jako takovým. Technická rešerše se zaměřila na základní popis hlavních intermodálních systémů, které lze využít k dopravě odpadu, mezi které se řadí systém Inno freight, ACTS a MOBILER. Krátce také rozebrala ISO kontejnery a dopravu pomocí vysokostěnných železničních vozů či silničních návěsů typu Walking floor.

Separovaný odpad se zpravidla lisuje do balíků, kdy následně může být využito běžného valníkového nákladního auta, návěsu, respektive železničního vozu. Přeložení balíků probíhá nejčastěji vysokozdvížným vozíkem. V případě přepravy volně loženého odpadu, např. směsného komunálního odpadu (SKO), je nutné přeložit odpad ze svozových vozidel do kontejnerů. Nejjednodušší způsob přeložení je pomocí kolového nakladače (případě jeřábu s drapákem) na zpevněné ploše (tento způsob je např. využíván v Plzeňském kraji v rámci systému návozu SKO do ZEVO Chotíkov). Jedná se o možnost, kdy je odpad ze svozových vozů jednoduše vysypán na zpevněnou plochu do nízkého bunkru a nakladačem přeložen do kontejnerů. Odpad může být také seshora stlačen pomocí tzv. roll packeru. Výše uvedený způsob je vhodný pro menší množství odpadu. V případě větších objemů stojí za zvážení výstavba překládací stanice s lisem. Odpad je ze svozových vozidel vysypán do násypky a pomocí beranu je natlačen do kontejneru.

3 CÍLE PRÁCE

Základní poznatek vycházející z rešerše je, že aktuálně chybí komplexní, a především univerzální nástroj, který dokáže hodnotit multimodální přepravu jako celek se všemi částmi dopravního řetězce, ze kterých se skládá. Takový nástroj může sloužit pro každodenní vyhodnocení změn v přepravě, např. při omezení na dopravních komunikacích, může být ale také využit při koncepčním plánování pro technické ověření proveditelnosti projektu nebo také pro získání předpokládaných parametrů přepravy (ceny z pohledu provozovatele či emisní zátěže), což následně může sloužit jako podklad pro obchodní vyjednávání a vypisování zakázek.

Vytvoření nástroje, který bude uživatelsky dostatečně přívětivý, jednoduchý, ale podrobný a detailní, je značně komplikované a vyžaduje pokročilou odbornost v řadě oblastí. Klíčovým krokem je připravit podklady pro takový nástroj, definovat hlavní požadavky či navrhnout algoritmy, které budou sloužit jako podklad pro implementaci. Předkládaná disertační práce si tak klade za cíl primárně výše uvedené, práce se ale bude věnovat i dalším bodům:

- **Přípravení podkladů pro vytvoření nástroje**, který umožní snadné vyhodnocení multimodální přepravy pro celý dopravní řetězec.
- **Vytvoření základních modelů** pro implementaci do výsledného nástroje.
- **Ověření modelů** a jejich dílčích částí, především při řešení případových studií.
- **Sestavení pravidel použití** modelů a jejich integrace do reálných případů.

Motivací je vytvořit takové podklady, respektive modely, které budou reflektovat stejné požadavky jako ty na cílový nástroj, tedy především umožnění detailně a komplexně hodnotit zadaný dopravní řetězec. Modely budou připravovány do takového stádia, aby je šlo snadno integrovat do výsledného nástroje. **Cíleno je na uživatele s běžnou znalostí logistiky**, kteří budou umět odpovědět na základní otázky dané problematiky. Ty jim pomohou připravit scénáře, dle kterých sestaví uvažovaný dopravní řetězec. Příklady otázek jsou uvedeny v kapitole 6.

Uživatel si bude moci namodelovat současnou variantu – např. využití čistě silniční dopravy – a variantu nově navrženou, kdy se bude jednat např. o využití intermodální dopravy pro přepravu z bodu A do bodu D, viz obr. 2, kde z bodu A do bodu B bude využita silniční doprava, následně bude intermodální jednotka přeložena na železniční vůz a z bodu B do bodu C bude využita železniční doprava. Posledním krokem bude opět přeložení na silniční soupravu a z bodu C do bodu D bude provedena přeprava po silnici.



Obr. 2: Ukázka možného dopravního řetězce

Primární zaměření práce je využití modelu pro potřeby **odpadového hospodářství**. To s sebou nese určitá specifika, např. omezená volba intermodálních přepravních systémů, legislativní nároky apod. **Hlavní vizí je ale vytvořit nástroj co nejvíce univerzální**, bude tak počítáno s možností snadného rozšíření o další možnosti přeprav. **Základem bude využití v rámci České republiky**. Nástroj by měl být ale použitelný nezávisle na státu, mělo by tak

být zajištěno jeho snadné přizpůsobení případným národním standardům či legislativním požadavkům.

Vzhledem k hlavnímu zacílení na odpadové hospodářství v ČR bude uvažováno pouze se silniční a železniční dopravou. Regionální lodní (říční) doprava není v odpadovém hospodářství ČR využívána a prozatím není ani uvažováno její výraznější využití, proto se jí předkládaná disertační práce nebude zabývat. Není ale vyloučeno její případné zahrnutí v případě potřeby.

Z rešerše vyplynuly klíčové oblasti, kterým se modely musí věnovat tak, aby bylo zajištěno objektivní a co nej přesnější hodnocení dané problematiky pro široké spektrum přeprav. Jedná se především o oblasti:

- Široká databáze dopravních systémů pro silniční i železniční dopravu.
- Zahrnutí všech klíčových částí logistického řetězce.
- Infrastrukturní síť založená na reálné infrastruktuře.
- Stanovení teoretické spotřeby energie/paliva dopravního systému.
- Stanovení produkce emisí z výfukových plynů.
- Podrobné hodnocení technických i ekonomických parametrů.

Emise produkované dopravou zahrnují širokou škálu látek a polutantů a jejich zdrojů. Jedná se jak o emise z výfukových plynů, tak ale také emise v podobě otěrů pneumatik, otěrů brzdových destiček či resuspenze prachu usazeného na vozovce. Předkládaná disertační práce se bude věnovat pouze stanovení emisí z výfukových plynů.

Disertační práce se nebude zabývat matematickou optimalizací multimodální přepravy. K tomuto účelu je možná kooperace s nástrojem NERUDA¹, který slouží právě pro optimalizaci. Navržený nástroj, respektive jeho jednotlivé části mohou sloužit pro pre-processing či následný post-processing pro upřesnění finálního řešení.

Předběžný název vytvářeného nástroje bude **Technicko-ekonomický model multimodální přepravy** (dále také jako TE model).

Některým aspektům multimodální přepravy, respektive specificky intermodální dopravy, se již věnovala disertační práce [16] v rámci které vznikly mimo jiné následující TE modely:

- TE model silniční dopravy
- TE model železniční dopravy
- TE model překládací stanice pro směsný komunální odpad.

Modely měly řadu omezení, např. měly pouze jeden nebo dva částečně definované dopravní systémy či měly zjednodušenou nebo žádnou integrovanou dopravní síť. Na TE model železniční dopravy vzniklý ve zmíněné disertační práci [16] následně navazovala autorova diplomová práce [17], kdy byl daný model dále rozpracován a doplněn o další části. Předkládaná disertační práce na modely dále navazuje, přepracovává je a dále rozšiřuje do takového detailu, aby zahrnovaly výše uvedené klíčové oblasti, které vyplynuly z rešerše.

Následující kapitola 4 se věnuje pozadí modelu, tedy členění výpočtu s popisem jednotlivých částí, na což v kapitole 5 navazuje popis implementace výpočtů. Kapitola 6 uvádí pravidla, jak pracovat s modelem a jak ho integrovat do reálných scénářů. Kapitola 7 představuje aplikaci modelu na případových studiích.

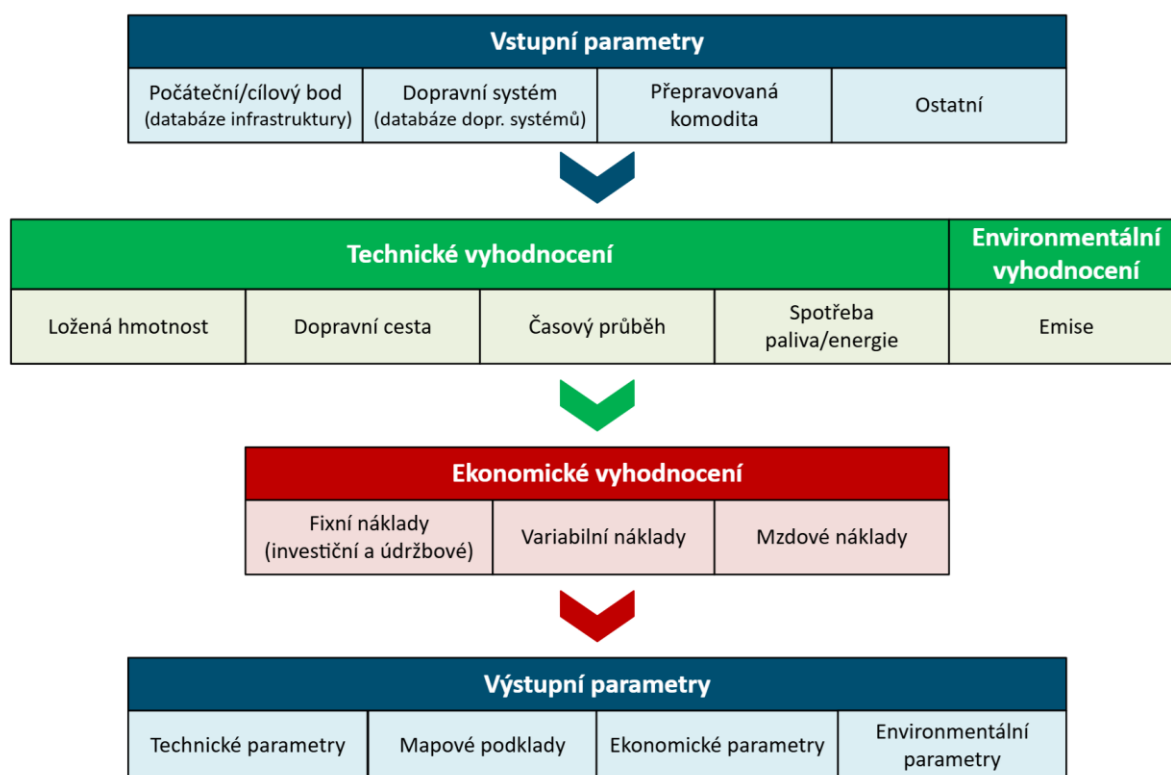
¹ Více informací <https://upi.fme.vutbr.cz/veda-vyzkum/neruda/>

4 TECHNICKO-EKONOMICKÝ MODEL

Vytvářený souhrnný technicko-ekonomický model multimodální přepravy zahrnuje tři submodely pro snadnější využití jednotlivých možností. Jedná se o submodely:

- Silniční doprava
- Železniční doprava
- Přeložení.

Submodely pro silniční a železniční dopravu lze uvažovat jako hlavní submodely. Sdílejí shodně navrženou strukturu, která je znázorněna na obr. 3, což vede ke snadné orientaci uživatele při využívání submodelů. Oba submodely jsou také koncipovány se stejnými či velmi podobnými vstupními a výstupními parametry. To zajišťuje možnost snadného propojení obou submodelů, případně možnost snadného porovnání obou typů dopravy.



Obr. 3: Struktura technicko-ekonomického submodelu silniční a železniční dopravy

Třetí submodel (přeložení, viz kap. 4.6) je svým rozsahem a komplexností výrazně menší model a zahrnuje několik typů manipulační techniky. Slouží k výpočtu přeložení mezi jednotlivými typy dopravy. Lze ho také využít k výpočtu nákladky/vykládky v rámci submodelu silniční nebo železniční dopravy.

Submodely zahrnují širokou řadu vstupních parametrů, které vycházejí z technické a odborné rešerše. Aby byl model dostupný pro široké spektrum uživatelů nezávisle na hloubce znalosti dané problematiky, zahrnuje model předdefinované hodnoty či je uveden rozsah, v jakém by se daný parametr měl pohybovat. Model také na základě zadaných parametrů automaticky kontroluje ostatní hodnoty, případně je i mění, aby nedocházelo k nesprávnému definování hodnocené přepravy a tím pádem nerelevantním výsledkům.

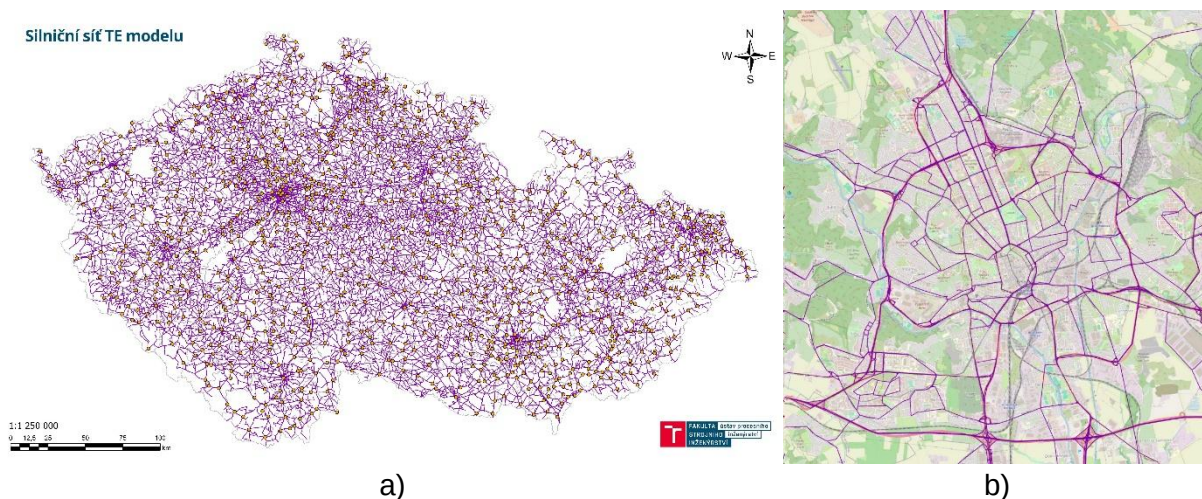
Mezi klíčové výstupní parametry lze zařadit jak technické, environmentální a ekonomické parametry, které jsou dále rozebrány v příslušných kapitolách, tak také mapové podklady. Nejčastěji se jedná o kombinaci projetých úseků pro silniční a železniční dopravu, kdy

jednotlivé úseky lze jednoduše vyfiltrovat v dané vektorové vrstvě v GIS programu² a zobrazit tak navržené trasy pro navazující tvorbu map (modely samotné dokáží zobrazit trasu v obrázku/mapě ČR). Můžou to být ale také dopravní náklady pro jednotlivé obce či obce s rozšířenou působností (ORP) při dopravě materiálu z intermodálního terminálu apod.

4.1 Infrastrukturní síť

Infrastrukturní síť je klíčovou částí TE modelu. Model zahrnuje infrastrukturní síť České republiky pro silniční a železniční dopravu. Databázi lze v budoucnu rozšířit i o další státy v případě potřeby. Databáze je vytvořena na základě geografických dat v GIS.

Silniční síť je založena na otevřeném digitálním geografickém modelu území ČR Data50 [18], který je odvozený z kartografické databáze pro základní mapu ČR 1:50 000. Datový model poskytuje Český úřad zeměměřický a katastrální. Vzhledem k tomu, že se model primárně zaměřuje na nákladní dopravu, komplexnost sítě byla částečně redukována. Základní struktura databáze vychází z obcí, kdy byly vynechány obce s méně než 1 000 obyvateli. Zároveň byly přidány body zájmu pro odpadové hospodářství jako jsou skládky, zařízení pro energetické využití odpadu a podobně. Databáze silniční sítě zahrnuje 1 132 bodů. Z pohledu úseků byla silniční síť zahrnutá v modelu redukována o cesty nižších tříd, které nelze pro nákladní dopravu využít (omezení průjezdnosti). To vede ke snížení výpočetních nároků. Počet úseků obsažených v databázi je 230 835. Každý úsek je definován 15 parametry jako je délka úseku, třída silnice, sklon, případně zda se jedná o tunel nebo most. Obr. 4 zobrazuje silniční síť vytvořenou pro účely modelu.

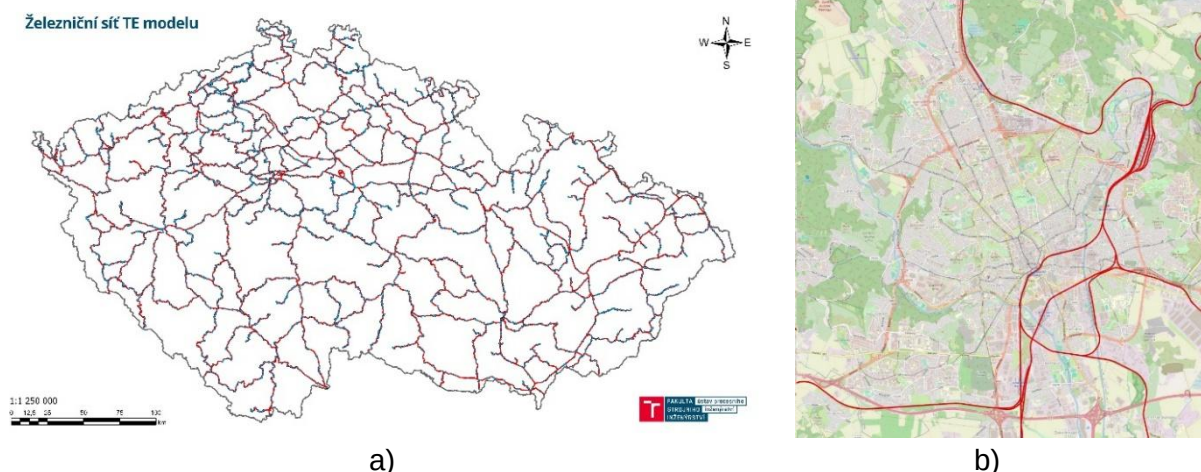


Obr. 4: Silniční síť technicko-ekonomického modelu a) ČR; b) úroveň měst

Obdobně jako u silniční sítě, základní struktura železniční sítě sestavená pro účely modelu vychází z digitálního geografického modelu území ČR Data50. Jednotlivé úseky byly rozděleny na kratší a byly přidány význačné body. Celkově se jedná o 5 543 bodů. Zdrojová vektorová data (Data50) obsahují pouze základní geografické parametry, neobsahují technické parametry železničních tratí nutné pro potřeby modelu. Z toho důvodu tak bylo nutné pro každý úsek přiřadit vybrané technické parametry. Pro každý bod byla doplněna výšková souřadnice pomocí SRTM³ dat. V rámci výpočtu může být každý úsek potlačen, což umožňuje simulovat například výluky. Každý úsek v databázi je definován 28 parametry. Obr. 5 zobrazuje náhled na vytvořenou železniční infrastrukturní síť ČR.

² GIS = Geografický informační systém – počítačový systém (program/aplikace), který umožňuje pracovat s geografickými daty.

³ SRTM = The Shuttle Radar Topography Mission



Obr. 5: Železniční síť technicko-ekonomického modelu a) ČR; b) úroveň měst

4.2 Dopravní systémy

Správné a dostatečně detailní určení dopravního systému je zásadní pro celkové vyhodnocení. Z toho důvodu je databáze dopravních systémů důležitá součástí TE modelu a přispívá k jeho univerzálnosti. Výběr dopravního systému je koncipován jako modulární. To znamená, že uživatel si výsledný dopravní systém sestaví z jednotlivých prvků. To umožňuje modelu přesně vyhodnotit technické specifikace/výkonnost každého konkrétního případu bez zobecňování, což se následně promítne do ekonomického vyhodnocení. Model automaticky ověřuje kompatibilitu prvků a nedovolí reálně neproveditelné konfigurace. Prvky dopravního systému v databázi lze kdykoliv modifikovat, odebrat či přidat nové. Princip modularity platí jak pro silniční, tak pro železniční dopravu.

Pro silniční dopravu zahrnuje databáze prvky dopravního systému (v aktuální verzi modelu) jako jsou tahač či automobilový podvozek, různé typy návěsů/přívěsů a nástaveb. Každý prvek je specifikován řadou parametrů jako je prázdná hmotnost, počet náprav, rozměry nebo užitečný objem, v případě motorových vozidel také např. průměrná spotřeba paliva. Tyto údaje jsou primárně získávány z technických materiálů výrobců či dalších dostupných zdrojů. Aktuální verze modelu zahrnuje pouze dieselový pohon pro silniční dopravu, elektrický prozatím nebyl implementován. Stejně jako v případě silniční dopravy tak i pro tu železniční byla vytvořena rozsáhlá databáze prvků dopravního systému, která zahrnuje několik elektrických či dieselových lokomotiv a různé typy železničních vozů. Mimo standardní parametry u všech částí dopravního systému jako hmotnost, rozměry apod. jsou u každé lokomotivy specifikovány trakční charakteristiky. Model také umí uvažovat více lokomotiv na přípřeži (v čele vlaku), případně využití postrku. Pro každou lokomotivu je nastavena její celková účinnost, která integruje jednotlivé účinnosti lokomotivy jako účinnost přenosu energie, účinnost elektromotoru či účinnost převodového systému. Z pohledu železničních vozů je důležitým parametrem jejich únosnost na základě traťové třídy zatížení. Využitelné pro oba módy dopravy jsou intermodální kontejnery. Databáze zahrnuje systém ACTS, systém Inno freight a ISO kontejnery, kdy pro každý systém jsou zahrnuty různé velikosti a typy kontejnerů.

4.3 Technické vyhodnocení

Technické vyhodnocení se skládá ze čtyř hlavních kroků:

- Stanovení hmotnosti a zatížení
- Nalezení dopravní cesty
- Výpočet teoretické spotřeby energie/paliva
- Časový průběh

Detailní vyhodnocení pro silniční a železniční dopravu se částečně odlišuje, z toho důvodu bude vyhodnocení pro oba módy dopravy rozebráno ve vlastních kapitolách. Environmentální a ekonomické vyhodnocení je shodné pro silniční a železniční dopravu, jelikož navazuje na shodné výstupní parametry z obou submodelů, a je popsáno v kapitole 4.4, respektive 4.5.

4.3.1 Technické vyhodnocení silniční dopravy

Stanovení hmotnosti a zatížení

Prvním krokem je stanovení celkové hmotnosti dopravního systému. Nejdříve je na základě vybraných prvků dopravního systému stanovena prázdná hmotnost systému, kdy jsou údaje načteny z databáze. Dalším krokem je výpočet ložené hmotnosti. Tu lze stanovit definováním buď:

- **Sypné hmotnosti materiálu:** Model vypočítá hmotnost na základě objemu přepravní jednotky (návěs, nástavba, kontejner apod.).
- **Hmotnosti na jednu přepravní jednotku:** Model ověří, zda zadaná hmotnost vyhovuje parametrům dopravního systému, respektive legislativním limitům, případně stanoví nižší hmotnost.

Celková hmotnost je pak vypočítána jako součet ložené hmotnosti a prázdné hmotnosti dopravního systému. Z vypočtené ložené a celkové hmotnosti lze stanovit koeficient zatížení tzv. load factor (rovnice 1).

$$lf = \frac{m_{load}}{m_{limit} - m_{system}} \quad (1)$$

kde: lf – koeficient zatížení (load factor)

m_{load} – ložená hmotnost [kg]

m_{limit} – maximální povolená hmotnost dopravního systému [kg]

m_{system} – hmotnost prázdného dopravního systému [kg]

Dopravní systém je následně zařazen do kategorie vozidel, viz tab. 2, s ohledem na vypočtenou celkovou hmotnost a rozměry dopravního systému.

Tab. 2: Kategorie silničních vozidel (dopravních systémů)

Kategorie vozidla	Popis kategorie	Maximální hmotnost [t]	Maximální výška [m]
0	Osobní vozidlo, malá dodávka	3,5	2
1	Dodávka	3,5	2,5
2	Lehké nákladní vozidlo	10	3,2
3	Těžké nákladní vozidlo I	26	4
4	Těžké nákladní vozidlo II	48	4

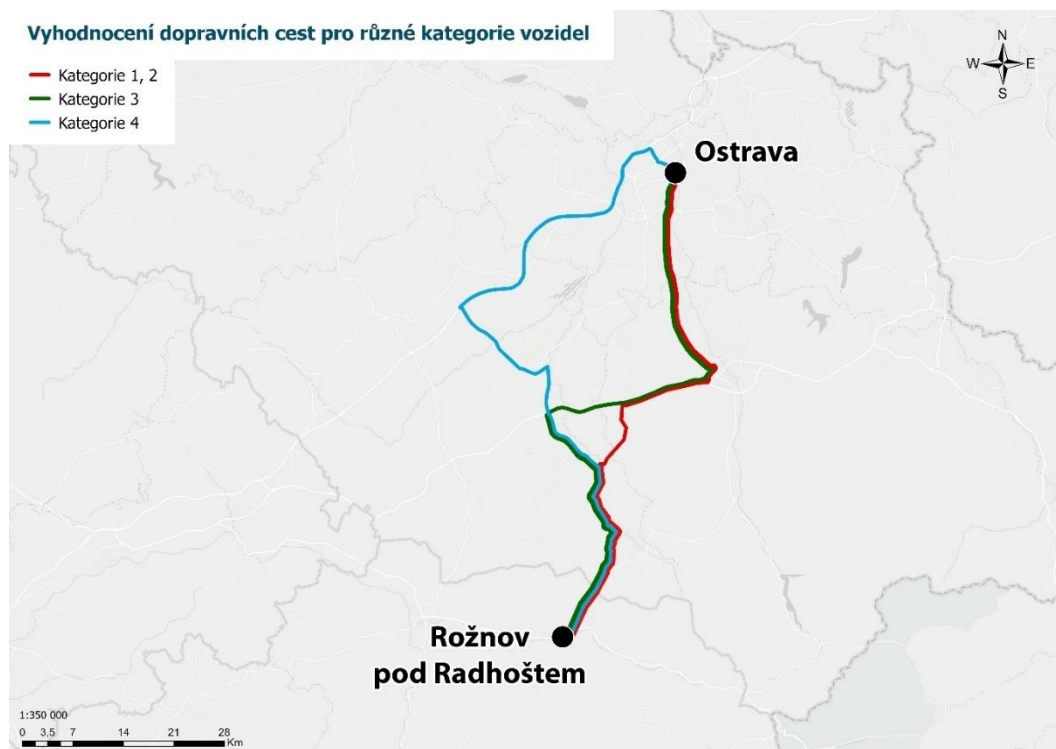
Dopravní cesta

Druhým krokem technické evaluace je nalezení vhodné dopravní cesty a navazující vyhodnocení relevantních parametrů. Uživatel vybere počáteční a cílový bod, na jejichž základě dojde k vyhledání dopravní cesty tak, aby byly respektovány parametry dle příslušné kategorie silničního dopravního systému.

Vzhledem k rozsáhlosti databáze bylo přistoupeno k tomu, že kombinace projetych úseků je pro každou kategorii vozidel a kombinaci počátečního a cílového bodu dopředu vyhodnocena. Nalezení dopravní cesty tak probíhá jako vyhledání kombinace počátečního a cílového bodu

a kategorie vozidla v databázi. To vede ke snížení výpočetních nároků, ale znemožňuje např. některé úseky omezit z důvodu uzavírky určitého úseku komunikace.

Ukázka vyhodnocení pro různé kategorie vozidel je na obr. 6.



Obr. 6: Vyhodnocení dopravních cest pro různé kategorie dopravního systému

Výstupem nalezení dopravní cesty je již zmíněná kombinace projetých úseků. Pro potřeby pozdějších výpočtů je provedena sumarizace vzdáleností dle jednotlivých tříd komunikací. Model umožňuje dvě možnosti manuálního zadání:

- **Plně manuální zadání** – určení dopravní cesty dle databáze je potlačeno, uvažovány pouze manuálně zadané vzdálenosti.
- **Částečné manuální zadání** – doplnění vzdálenosti ke vzdálenostem určené dopravní cesty pomocí modelu.

Model také umožňuje sestavit celkovou dopravní cestu za využití průjezdných bodů. Lze tak hodnotit například trasy s postupnou vykládkou, kdy se mění také ložená hmotnost. Stejný princip je použit i pro zpáteční cesty ($A \rightarrow B \rightarrow A$).

Stanovení teoretické spotřeby paliva

Důležitým údajem pro celé vyhodnocení je teoretická spotřeba paliva. Tento údaj je ale pro silniční dopravu velmi obtížné přesně stanovit, jelikož je ovlivněn řadou faktorů, kdy některé lze přesně definovat (geometrický profil, zatížení vozidla), naopak některé lze určit velmi obtížně (hustota provozu, chodci ve městě, tlak v pneumatikách a jejich dezén, využití klimatizace/topení atd.). Z toho důvodu je v aktuální verzi modelu využit zjednodušený přístup výpočtu teoretické spotřeby paliva.

Výpočet je založen na průměrné spotřebě vozidla (definovaná pro každé motorové vozidlo v databázi), ujeté vzdálenosti a koeficientu zatížení, viz rovnice 3. Základní předpoklady využit ve vztahu ke koeficientu zatížení jsou:

- Spotřeba paliva roste s rostoucím zatížením (rostoucí koeficient zatížení).
- Průměrná spotřeba motorového vozidla definovaná v databázi odpovídá koeficientu zatížení 50 %.

Model pracuje s jednoduchou lineární závislostí spotřeby paliva v závislosti na koeficientu zatížení. Změna je nastavena pro kategorie vozidel, viz tab. 2, splňující emisní normu EURO 6/EURO VI, následovně:

- **Kategorie 0, 1:** -1,5 l/100 km pro koeficient zatížení 0 % a +1,5 l/100 km pro koeficient zatížení 100 %.
- **Kategorie 2, 3, 4:** -5 l/100 km pro koeficient zatížení 0 % a +5 l/100 km pro koeficient zatížení 100 %.

Upravená hodnota spotřeby paliva je vypočítána dle rovnice 2.

$$f_c = f_{c_{average}} + (a \cdot l_{f,i} - b) \quad (2)$$

kde: f_c – upravená hodnota spotřeby paliva motorového vozidla [l/100 km]

$f_{c_{average}}$ – průměrná spotřeba paliva motorového vozidla [l/100 km]

a – konstanta (3 pro kategorii 0 a 1; 10 pro kategorii 2, 3 a 4)

b – konstanta (1,5 pro kategorii 0 a 1; 5 pro kategorii 2, 3 a 4)

Jak již bylo zmíněno dříve, celková dopravní cesta může zahrnovat několik průjezdných bodů, přičemž každá část dopravní cesty může mít jiný koeficient zatížení. To platí i pro cestu „tam a zpět“, kdy na cestě do destinace je dopravní systém naložený a na zpáteční cestě prázdný. Celková spotřeba paliva jednoho cyklu (tam a zpět; okružní trasa apod.) se určí podle rovnice 3.

$$f_{c_{trip}} = \sum_{i=1}^n s_i \cdot \frac{f_{c_i}}{100} \quad (3)$$

kde: $f_{c_{trip}}$ – spotřeba paliva jednoho cyklu [l]

f_{c_i} – upravená hodnota spotřeby paliva motorového vozidla pro jednotlivou část dopravní cesty [l/100 km]

s_i – vzdálenost jednotlivé části dopravní cesty [km].

Časový průběh

Posledním důležitým krokem technického vyhodnocení je určení časového průběhu. Prvotně je potřeba určit fond pracovní doby. Ten se skládá z počtu pracovních dnů v roce a pracovní doby za jeden den. Ta je určena počtem směn a délkou jedné směny. Tu lze chápat jako maximální čas, po který může řidič během jednoho dne řídit. V rámci modelu je konzervativně brána délka denní směny 9 hodin (tento parametr je omezený legislativou). Je také možnost využít dvou směn za jeden den, a to v případě, kdy jsou ve vozidle buď 2 řidiči (dálková doprava) anebo se vozidlo vrátí do depa a nastupuje nový řidič. Počet pracovních dnů v roce se liší dle hodnoceného scénáře, stejně tak lze měnit délku směny.

Celkový čas jedné jízdy je zpravidla součtem času nakládky, času pro ujetí dopravní cesty a času vykládky. Při cyklu „tam a zpět“ je uvažován navíc čas pro ujetí dopravní cesty zpět. Je také uvažováno zdržení na dopravní cestě, které je v základu nastaveno na 10 % času jízdy.

Pro výpočet času jízdy dle rovnice 4 model uvažuje stanovené vzdálenosti pro jednotlivé třídy komunikací a průměrné rychlosti dle třídy komunikace a kategorie vozidla. Čas nakládky se liší dle vybraného dopravního systému a způsobu nakládání. Pro každý typ nakládky byl separátně stanoven čas naložení, respektive je proveden jednoduchý výpočet např. na základě loženého objemu. Stejný princip je pak použit u času vykládky – opět jsou stanoveny různé časy pro jednotlivé typy vykládky. Stanovení tohoto času je provázáno se submodelem přeložení, který je popsán v kapitole 4.6.

Celkový čas je spočítán dle rovnice 4.

$$t_{total} = delay_{drive} \cdot \sum_{i=1}^8 \frac{S_{rc,i}}{v_i} + t_{load} + t_{unload} \quad (4)$$

kde: t_{total} – celkový čas pro jeden cyklus [min]

S_{rc} – suma vzdáleností pro danou třídu komunikace [km]

v – průměrná rychlost pro danou třídu komunikace [km/h]

$delay_{drive}$ – uvažované procentuální zdržení během jízdy [%]

t_{load} – čas nakládky [min]

t_{unload} – čas vykládky [min]

4.3.2 Technické vyhodnocení železniční dopravy

Stanovení hmotnosti a zatížení

Technické vyhodnocení pro železniční dopravu postupuje dle stejné struktury jako pro silniční dopravu. První krok tak je stanovení hmotnosti dopravního systému, respektive ložené hmotnosti. Výpočet prázdné hmotnosti dopravního systému probíhá stejně jako u silniční dopravy, tedy jako součet prázdných hmotností všech zvolených prvků dopravního systému.

V případě silniční dopravy udává vyhláška maximální limity hmotnosti na nápravu či celou jízdní soupravu. Pro železniční dopravu podobné limity stanovuje norma ČSN EN 15528⁴. Jedná se především o definici maximální hmotnosti na nápravu, případně maximální hmotnosti na běžný metr vozidla. Pro některé vozy je přímo ve výpočtu zahrnut algoritmus, který stanovuje zatížení na nápravy dle rozložení hmotnosti. Jedná se především o intermodální vozy za využití kontejnerů, kde na uchycení kontejnerů je uvažován vlastní limit zatížení. Pro většinu ostatních vozů (čtyřnápravových) je uvažováno rovnoměrné rozložení hmotnosti na oba podvozky a výpočet zatížení na nápravu je dle rovnice 5.

$$zatizeniNaprava = \frac{zatizeniPodvozek}{2} = \frac{m_{load} \cdot 0,5 + \frac{m_{car}}{2}}{2} \quad (5)$$

kde: $zatizeniNaprava$ – zatížení na nápravu [t/náprava]

$zatizeniPodvozek$ – zatížení na podvozek [t/podvozek]

m_{load} – ložená hmotnost [kg]

m_{car} – hmotnost prázdného vozu [kg]

Ložená hmotnost je stejně jako v případě silniční dopravy stanovena buď dle sypné hmotnosti (a objemu přepravní jednotky) nebo na základě manuálně definované hmotnosti na jednu přepravní jednotku. Při vyhodnocování ložené hmotnosti model pracuje ve dvou režimech, které jsou úzce provázány s nalezením vhodné dopravní cesty:

- **Model vyhledá nejkratší možnou trasu** (při respektování technických parametrů dopravního systému) a na základě parametrů vyhledané trasy určí maximální loženou hmotnost.
- **Model stanoví maximální loženou hmotnost** dle technických parametrů dopravního systému a poté nalezne vhodnou trasu.

⁴ ČSN EN 15528 (736330) – Železniční aplikace – Traťové třídy zatížení pro určení vztahu mezi dovoleným zatížením infrastruktury a maximálním zatížením vozidly

Model také umožňuje definovat počet plných, prázdných nebo částečně naložených vozů, např. při přepravě prázdných kontejnerů.

Dopravní cesta

Pro vyhodnocení dopravní cesty uživatel opět zadává výchozí a cílový bod, případně také průjezdné body. Oproti vyhodnocení silniční dopravy, kde kombinace projetých úseků je vyhodnocena dopředu a vybírá se pouze daná kombinace v databázi (snížení výpočetních nároků), nalezení železniční dopravní cesty probíhá v rámci výpočtu. To umožňuje jak některé úseky omezit např. z důvodu výluky, tak využívat omezující parametry (okrajové podmínky). Mezi ně se řadí:

- Délka jízdní soupravy (dopravního systému)
- Zatížení na nápravu (dovolená traťová třída zatížení)
- Vyžadovaný systém trakčního napájení
- Kód pro kombinovanou dopravu.

Pro nalezení kombinace projetých úseků je implementován tzv. Dijkstra algoritmus. Zjednodušeně se jedná o algoritmus pro nalezení nejkratší spojnice dvou definovaných bodů v orientovaném grafu. Pro zkrácení výpočetního času je algoritmus implementovaný jako obousměrný (Bidirectional Dijkstra), což znamená, že hledá z obou bodů naráz ve stále se zvětšujícím kružnicovém poli.

Model také umožňuje zahrnout ujetou vzdálenost v okolních státech. Ta je zadána pouze jako hodnota, jelikož model nezahrnuje infrastrukturní síť okolních států. Pro uvedenou vzdálenost v okolních státech jsou stanoveny náklady na dopravní cestu dle příslušného státu a poměrově vypočtena spotřeba energie a produkce emisí.

Stanovení teoretické spotřeby energie/paliva

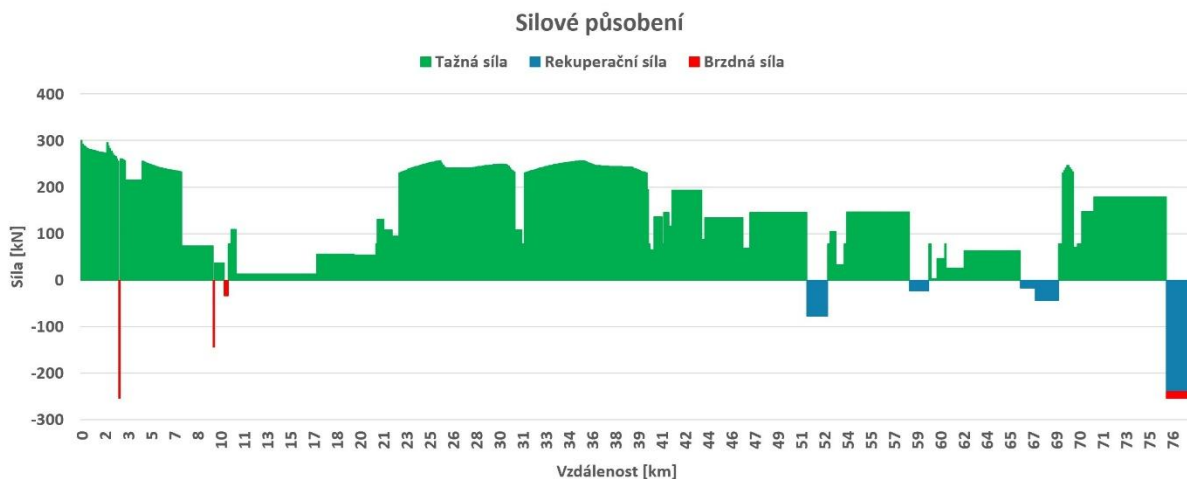
Výpočet teoretické spotřeby energie či paliva je v případě železniční dopravy snazší, co se týče stanovení či odhadu proměnných parametrů, které ovlivňují jízdu vlaku. Samotný výpočet je značně komplexní, proto v následujícím textu nebudou uvedeny všechny podrobnosti či rovnice, text bude zaměřen na popsání principu a důležitých částí.

Problematické dynamiky jízdy vlaku (matematického modelu jízdy vlaku) se věnovalo několik akademických prací (především bakalářské a diplomové práce), odborných publikací apod. Ve většině z nich ale byla uvažována různá zjednodušení. V případě akademických prací často nebylo uvažováno brzdění vlaku, které je velmi složité na automatizované vyhodnocení v rámci výpočtu. Primárním cílem prací bylo stanovení spotřeby energie, doby jízdy či porovnání různých typů lokomotiv např. na vlečce pro určitou hmotnost vlaku. Některé odborné publikace jako např. [19] popisují problematiku velmi do hloubky, bylo tak nutné některé závislosti modifikovat pro potřeby vyvíjeného TE modelu a dostupnosti dat. Pro potřeby sestavení výpočtu dynamiky jízdy vlaku v rámci popisovaného TE modelu bylo čerpáno ze zdrojů [19], [20], [21], [22], [23], [24] a [25].

Princip výpočtu vychází ze silového působení, ze kterého je stanovena rychlost a následně práce a energie. Navazuje na něj také výpočet času jízdy. Pro výpočet silového působení je nutné uvažovat řadu parametrů jako je trakční charakteristika lokomotivy, hmotnost soupravy či ložená hmotnost, sklonové poměry trati, jednotlivé odporové síly apod. Odporové síly či jízdní odpory zahrnují měrný vozidlový odpor, odpor sklonu a odpor oblouku. Zmíněný odpor oblouku není prozatím ve výpočtu uvažován vzhledem k chybějícímu parametru v databázi, který v současném detailu infrastrukturní sítě nelze uvažovat. Ve výpočtu dynamiky jízdy vlaku byla uvažována určitá zjednodušení. Není uvažována jízda výběhem, kterou lze popsat jako jízdu setrvačností, jež je využívána např. před zahájením brzdění. Dále ve výpočtu není

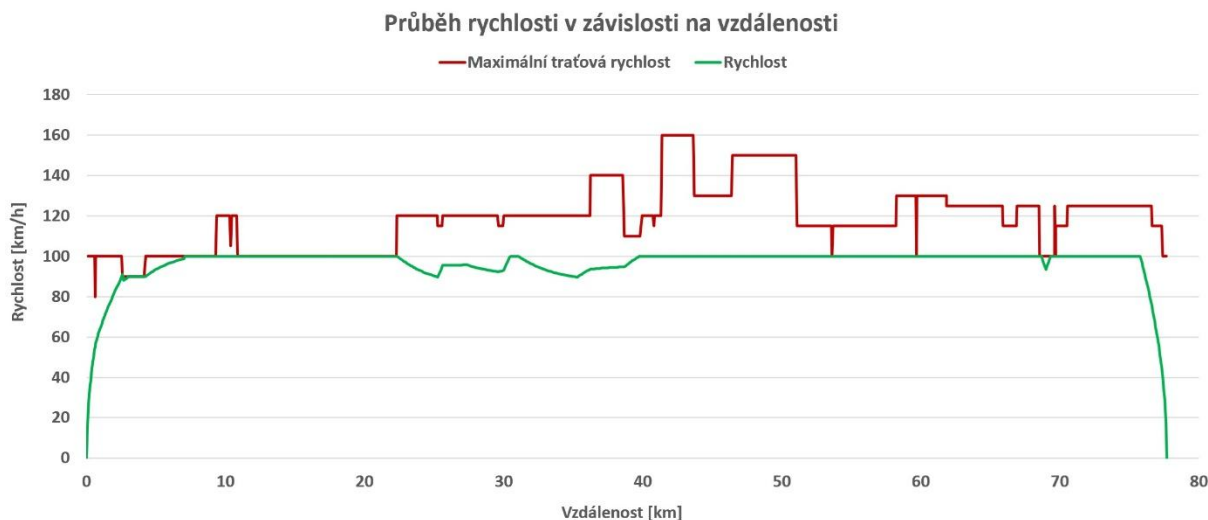
uvažováno působení trakční soustavy a ovlivnění typem elektrické výzbroje lokomotivy, což se týká především starších typů lokomotiv.

Model je schopný pracovat s libovolně velkým iteračním krokem, jeho volba ale ovlivňuje přesnost výpočtu (v základu nastaven na 100 m). Ukázka vyhodnocení silového působení je na obr. 7.



Obr. 7: Silové působení pro hodnocenou dopravní cestu

Navazující výpočet průběhu rychlosti pro hodnocenou dopravní cestu je na obr. 8 a tomu odpovídající výškový profil poté zobrazuje obr. 9. Je zřejmé, jak náročnější sklonové poměry ovlivňují schopnost vlaku udržovat požadovanou rychlost. Výpočet tak může pomoci např. s určením úseků, kde daná jízdní souprava může mít problém s propady rychlosti díky náročným sklonovým poměrům trati, případně model umožňuje testovat různé scénáře provozu.



Obr. 8: Průběh rychlosti v závislosti na vzdálenosti pro hodnocenou dopravní cestu



Obr. 9: Výškový profil hodnocené dopravní cesty

Na základě silového působení, respektive trakční a rekuperační síly, je vypočítána potřebná práce dle rovnice 6. Rekuperační síla je uvažována jako záporná.

$$W_{tr} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot x_i \quad (6)$$

kde: W_{tr} – práce [kJ]

F_i – trakční nebo rekuperační síla na daném úseku [kN]

x_i – délka úseku [m]

Z vypočítané hodnoty práce je poté stanovena celková spotřebovaná energie dle rovnice 7.

$$E_{tr} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{3,600} \cdot W_{tr} \quad (7)$$

kde: E_{tr} – spotřebovaná energie [kWh]

η – účinnost lokomotivy [-]

Vypočítaná energie je stanovena v kilowatthodinách [kWh]. V případě lokomotiv pro nezávislou trakci, nejčastěji s dieselovým pohonem, je následně energie přepočtena na spotřebované litry paliva. Uvažovaná hustota nafty je 0.84 kg/m^3 [26], která odpovídá energetické hustotě paliva 10 kWh/l .

Časový průběh

Vyhodnocení časového průběhu, respektive vyhodnocení času jízdy, úzce souvisí s výpočtem dynamiky jízdy vlaku. Během každého kroku výpočtu dynamiky jízdy je stanoven čas pro ujetí daného úseku. Doba jízdy je pak stanovena jako součet časů jízdy pro všechny úseky. Vypočtená doba jízdy je teoretická, dosažitelná pouze v ideálním případě. Vzhledem k výpočtu, který často slouží pro prvotní hodnocení dané přepravy kdy není znám jízdní řád, je nutné uvažovat také zpoždění, která mohou vzniknout během jízdy. Zpoždění během jízdy je ale obtížné určit. Model proto vychází z dat o obsazenosti jednotlivých úseků tratí (rozdělení do šesti skupin, v procentech), která byla získána na základě spolupráce se Správou železnic v rámci dřívějšího projektu. Data nejsou veřejně dostupná a jsou datována k roku 2019. Od roku 2020 Správa železnic vydává veřejné mapové podklady s počtem spojů (9. nejvyšší počet spojů v prvním čtvrtletí daného roku) na jednotlivých tratích/úsecích. Z těchto údajů však nelze získat informaci o obsazenosti/propustnosti trati.

Zdržení na dopravní cestě je určeno výpočtem na základě obsazenosti dopravní cesty a tomu stanovených koeficientů zdržení, které jsou určeny expertním posouzením. Výsledné celkové zdržení během jízdy se v průměru pohybuje v řádu jednotek procent, v případě velkého zastoupení koridorových tratí tak i nižších desítek procent.

Výsledný celkový čas se zahrnutím dalších relevantních operací se spočítá dle rovnice 8.

$$t_{total} = t_{lococheck,1} + t_{load} + t_{load,delay} + t_{techcheck,1} + t_{drive} \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^6 dtc_i \cdot c_i\right) + t_{techcheck,2} + t_{unload} + t_{unload,delay} + t_{lococheck,2} \quad (8)$$

kde: t_{total} – celkový čas [min]
 $t_{lococheck,1}$ – příprava lokomotivy (v případě potřeby) [min]
 t_{load} – čas nakládky [min]
 $t_{load,delay}$ – zpoždění na nakládkce [min]
 $t_{techcheck,1}$ – technická kontrola soupravy před jízdou [min]
 t_{drive} – čas jízdy [min]
 dtc_i – procento zastoupení vzdálenosti pro jednotlivé skupiny obsazenosti [%]
 c_i – koeficient zpoždění [-]
 $t_{techcheck,2}$ – technická kontrola soupravy po jízdě [min]
 t_{unload} – čas vykládky [min]
 $t_{unload,delay}$ – zpoždění na vykládkce [min]
 $t_{lococheck,2}$ – odstavení lokomotivy (v případě potřeby) [min]

4.4 Environmentální vyhodnocení

Snížení emisí se stalo prioritou, protože doprava významně přispívá ke znečištění ovzduší. Vyvinutý model v současné fázi řeší pouze emise z výfukových plynů (silniční doprava a železniční doprava v nezávislé trakci). Pro železniční dopravu závislé (elektrické) trakce využívá model emisní faktory odvozené z hrubé výroby elektřiny ČR. Mezi hodnocené polutanty se řadí CO₂, CO, NO_x, SO_x, pevné částice a další.

Výpočet produkce emisí úzce navazuje na výpočet teoretické spotřeby energie/paliva, který byl popsán v příslušných kapitolách výše, využívá stanovenou spotřebovanou energii/palivo a násobí ji příslušnými emisními faktory dle rovnice 9.

$$E_i = F_c \cdot EF_i \quad (9)$$

kde: E_i – emise znečišťující látky [g]
 F_c – spotřeba paliva [kg] nebo spotřeba energie (E_{tr}) [kWh]
 EF_i – emisní faktor znečišťující látky specifický pro spotřebu paliva [g/kg] nebo spotřebu energie [g/kWh]

Emisní faktory využívané v modelu pocházejí z příručky [27], kterou vydala Evropská agentura pro životní prostředí. Využívána je Úroveň 1 (Tier 1) pro silniční dopravu a Úroveň 2 (Tier 2) pro železniční dopravu. V obou zmíněných úrovních jsou emisní faktory dány v [g (kg) CO₂/kg paliva]. Lze využít také Úroveň 2 (Tier 2) pro silniční dopravu, která udává emisní faktory v [g/km] a detailněji dělí kategorie vozidel dle typu, hmotnosti, typu paliva a emisní normy EURO.

Vzhledem k velkému výčtu emisních faktorů dle kategorií zde nebudou detailněji rozebrány či uvedeny, zmíněna bude pouze situace pro CO₂. Uvedená příručka udává hodnotu emisního faktoru pro motorovou naftu (diesel) 3,18 kg CO₂/kg paliva pro silniční dopravu, respektive 3,14 kg CO₂/kg paliva pro železniční dopravu. To odpovídá emisnímu faktoru 2,67 kg CO₂/l paliva, respektive 2,64 kg CO₂/l paliva při uvažované hustotě paliva 840 kg/m³ [26]. Pro železniční dopravu v elektrické trakci je uvažován emisní faktor CO₂ na základě hrubé výroby elektřiny v ČR, kdy v roce 2023 byl 0,37 kg/kWh [28].

4.5 Ekonomické vyhodnocení

V návaznosti na podrobné technické vyhodnocení je provedeno ekonomické vyhodnocení z pohledu provozovatele. Náklady jsou rozděleny na fixní a variabilní náklady, přičemž mzdové náklady jsou posuzovány samostatně. Hodnocení nákladů jde zohlednit dvěma přístupy. První z nich je založen na teoretickém využití dopravního systému, což umožňuje stanovit procentuální vyjádření nákladů vzhledem k času potřebnému pro hodnocený dopravní úkol, např. jeden cyklus, viz rovnice 10. Tento přístup umožňuje kombinaci více přepravních úkolů pro jeden dopravní systém a usnadňuje posouzení nákladů na konkrétní přepravní úkol/cyklus.

$$TU = \frac{t_{total}}{t_{fpd} \cdot 60} \quad (10)$$

kde: TU – teoretické vytížení [-]

t_{total} – celkový čas (úkol, cyklus) [min]

t_{fpd} – fond pracovní doby [hod].

Fond pracovní doby je zpravidla uvažován roční, tedy jako součin denní pracovní doby a počtu pracovních dní.

Druhý přístup je založen na využití daného dopravního systému pouze pro daný přepravní úkol. Tzn. že i v případě nevyužití celého časového potenciálu dopravního systému jsou náklady uvažovány v plné výši. Při hodnocení úloh je tak častěji využíván první způsob, tedy uvažování teoretického vytížení s předpokladem, že zbylý čas bude dopravní systém využit pro jiné úlohy.

Fixní náklady zahrnují především výdaje spojené s nákupem či pronájmem jednotlivých prvků dopravních systémů, jejich údržbou (technické prohlídky, pravidelná a nepravidelná údržba), pojištěním či silniční daní v případě silniční dopravy. Náklady na údržbu jsou definovány jako pevná roční částka za předpokladu pravidelné údržby (každý komponent dopravního systému v databázi má předdefinované roční náklady na údržbu). Alternativně lze náklady na údržbu vyhodnotit na základě celkového počtu najetých kilometrů – tento přístup každopádně vyžaduje přesnější definici řešené úlohy z pohledu ročních nájezdů/proběhů. Model také zohledňuje životnost každého prvku dopravního systému. Model umožňuje zadat vlastní kapitál, výše půjčky je následně dopočítána dle nutných investičních výdajů.

Variabilní náklady zahrnují v případě silniční dopravy silniční daň, mýtné a poplatky, náklady na pneumatiky na základě ujetých kilometrů, náklady na palivo a na provozní kapaliny. Mýtné se určuje na základě klasifikace silnic a konkrétních mýtných úseků dle databáze infrastrukturní sítě. Na základě ročního součtu platby mýta je stanovena sleva na mýtném, kterou stejně jako sazby mýta udává nařízení vlády č. 240/2014 Sb. o výši časových poplatků, sazeb mýtného, slevy na mýtném a o postupu při uplatnění slevy na mýtném. V modelu jsou také zahrnuty poplatky za užívání pozemní komunikace, hluk z provozu a poplatek za znečištění ovzduší. Nejvýznamnější část variabilních nákladů tvoří spotřeba paliva, případně provozní kapaliny jako je kapalina AdBlue, která je nezbytná pro snížení emisí výfukových plynů u vznětových motorů.

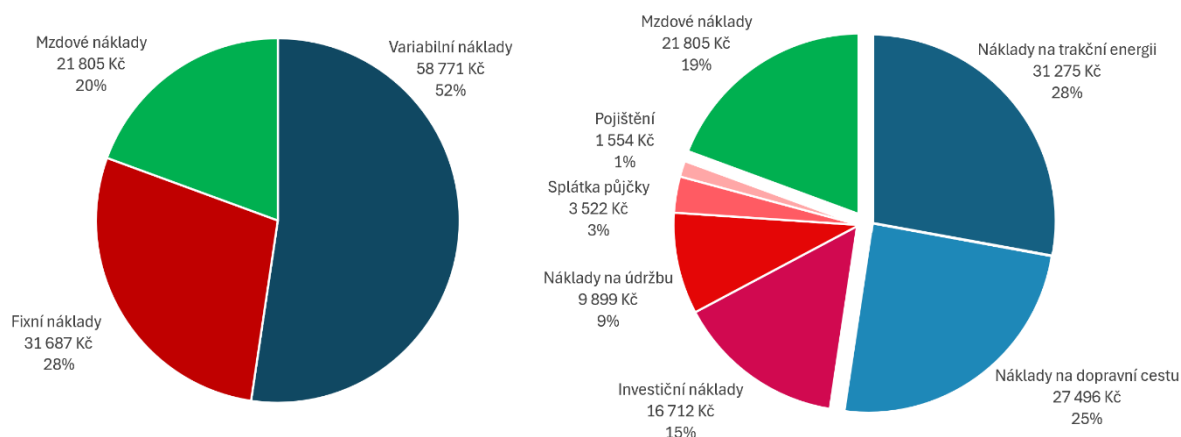
V případě železniční dopravy jsou nejvýznamnější variabilní náklady v podobě nákladů na palivo, respektive trakční energii. Zahrnout je nutné také náklady za využití železniční infrastruktury (cena za použití dráhy), kdy poplatek se platí na celé železniční síti, a také náklady na přidělení dopravní cesty. V základu model uvažuje rozdělení pravidelných přeprav a ad hoc přeprav v poměru 90:10 (ad hoc přepravy mají mírně vyšší sazbu).

U mzdových nákladů primární roli hrají platy posádky, které jsou definovány pro jednotlivé pozice a počet zaměstnanců. Mzdové náklady na administrativní a provozní režii jsou

uvažovány jako roční pevná cena představující podíl firemních nákladů na tyto zaměstnance/oddělení.

Celkové náklady se pak stanoví jednoduše jako součet fixních, variabilních a mzdových nákladů. V základu jsou stanoveny jako náklady na jeden cyklus, kdy lze jednoduše přepočítat buď na náklady pro kompletní řešenou úlohu (např. je potřeba vykonat 100 cyklů pro převezení daného množství materiálu) či je přepočítat na náklady na 1 tunu [Kč/t] nebo tunokilometr [Kč/tkm].

Ukázkové rozložení nákladů na jeden cyklus je na obr. 10.



Obr. 10: Ukázkové rozložení nákladů na jeden cyklus

Dalším krokem je stanovení peněžního toku (cashflow, CF) v uvažované délce projektu. Model uvažuje čtyři kategorie meziročních nárůstů (příjmy, výdaje, mzdy, investiční výdaje). Potenciální příjmy jsou vypočítány na základě požadované doby návratnosti, čisté současné hodnoty a marže provozovatele, ze kterých je stanovena nabídková cena pro přepravované množství komodity. Nabídková cena odpovídá nákladům se započtenou marží provozovatele. Ve výpočtu peněžního toku jsou zohledněny životnosti prvků dopravního systému, jejich obnova v podobě nových nákupů, rozložení nákladů na údržbu a větší opravy apod.

4.6 Submodel přeložení

Mimo dva hlavní submodely pro silniční a železniční dopravu je součástí hlavního TE modelu submodel přeložení. Ten lze využít k výpočtu přeložení mezi jednotlivými módy dopravy nebo ho lze využít také k výpočtu parametrů nakládky/vykládky pro potřeby submodelu silniční a železniční dopravy.

Překládka mezi různými módy dopravy je klíčovou součástí logistického řetězce. Přeložení se provádí obecně manipulačním zařízením. To může být manipulátor kontejnerů, vysokozdvíhový vozík nebo také kolový nakladač v případě sypkých materiálů. Lze využít také stacionární překládací stanici nebo jeřáb, ať už samohybný, tak stacionární, který je často k vidění např. v přístavech nebo velkých intermodálních terminálech.

Submodel přeložení je jednodušší než dříve popsané submodely pro silniční a železniční dopravu, jelikož nepracuje s velkými vstupními databázemi. V dané problematice také nefiguruje tolik proměnných a vstupních parametrů. Submodel zahrnuje výpočet pro kolový nakladač, manipulátor kontejnerů, vysokozdvíhový vozík a nosič kontejnerů (Abroll/ACTS).

Struktura modelu sleduje stejný princip vyhodnocení, tedy technické, na které navazuje ekonomické vyhodnocení. Environmentální vyhodnocení je shodné, viz kapitola 4.4.

Technické vyhodnocení se vztahuje převážně na spotřebu paliva a čas cyklu jako dva klíčové parametry. Vzhledem k jiné struktuře pohybu manipulátorů není spotřeba vztažena na nájezd

kilometrů, ale na tzv. motohodiny, tedy hodiny práce motoru při jmenovitých otáčkách, což umožňuje uvažovat určitý průběh běžného provozu z pohledu využití manipulátoru. Předpoklad rozložení výkonu motoru během pracovní směny je uvažován jako:

- Maximální zatížení: 20 % – intenzivní činnost, zvedání plných kontejnerů.
- Střední zatížení: 40 % – přesun kontejneru na kratší vzdálenosti, manipulace s lehčími kontejnery.
- Nízké zatížení: 20 % – přesun bez nákladu.
- Volnoběh: 20 % – bez činnosti se spuštěným motorem (moderní manipulátory mají např. systém start/stop, takže procento volnoběhu lze snížit).

Samotná průměrná spotřeba paliva se liší dle zvoleného manipulátoru a je vždy potřeba ji ověřit na základě uvažovaného typu manipulátoru. Současným trendem je elektrifikace manipulátorů, bagrů či celkově těžké stavební techniky, ale obecně i nákladních vozidel. Důvodem je nejenom snížení emisí skleníkových plynů, ale také snížení hluku.

Čas cyklu je podrobněji definovaný dle jednotlivých činností, tedy např. uchycení, přejezd, uložení a přejezd zpět. Tak lze přesně definovat konkrétní cyklus přeložení v rámci hodnoceného scénáře. Na základě doby cyklu, překládaného množství a fondu pracovní doby lze opět stanovit teoretické vytížení.

Ekonomické vyhodnocení pak probíhá obdobně jako bylo popsáno v kapitole 4.5, tedy definováním pořizovacích nákladů, nákladů na údržbu, pojištění, mzdových nákladů nebo nákladů na palivo. Výstupem pak jsou roční náklady, respektive náklady na tunu, motohodinu, cyklus nebo den.

V případě přepravy odpadu a jeho manipulace dokáže navržený submodel hodnotit přeložení pomocí kolového nakladače. Submodel přeložení nezahrnuje náklady na výstavbu zpevněné plochy a areálu, řeší pouze samotné přeložení. Při dlouhodobé přepravě větších objemů stojí za zvážení výstavba pokročilejší překládací stanice s lisem. Tomuto kroku se detailně věnovala disertační práce [16], kdy navržený model zohledňuje celkovou výstavbu, technologii a ekonomiku provozu překládací stanice pro možnost přeložení SKO ze svozových vozidel do kontejnerů. Výstup z tohoto modelu lze zahrnout do hodnocení logistického řetězce pomocí TE modelu z této předkládané disertační práce.

5 IMPLEMENTACE TECHNICKO-EKONOMICKÉHO MODELU

Výše popsané podklady, principy a výpočty je nutné integrovat do uživatelského rozhraní, které bude využitelné širšímu spektru uživatelů. Implementace probíhá v několika krocích, z nichž první krok odpovídá cílům a rozsahu předkládané disertační práce. Navazující dva kroky nejsou součástí práce, pouze popisují postup implementace. Ten lze popsat ve třech hlavních krocích:

- 1) Vytvoření TE modelu, ověření funkčnosti, validace
- 2) Transformace modelu do vybraného programovacího jazyka
- 3) Vytvoření finálního nástroje.

Postup implementace



Obr. 11: Postup implementace

Jak již bylo zmíněno, krok 2 a 3 není součástí rozsahu disertační práce. Vzhledem k vývoji jednotlivých submodelů již byl pro dílčí části zahájen krok 2, tedy transformace do vybraného programovacího jazyka.

Krok 1 – vytvoření TE modelu, ověření funkčnosti, validace

Vzhledem k historickému vývoji jednotlivých modelů a zároveň snazší interpretaci byly všechny submodely vytvořeny v programu Microsoft Excel, v případě komplexnějších výpočtů za využití programovacího jazyka Visual Basic for Applications (VBA).

Všechny tři submodely (silniční doprava, železniční doprava, přeložení) jsou dokončeny. Základní struktura celkového TE modelu byla navržena. Jednotlivé submodely byly ověřeny využitím v případových studiích, viz kapitola 7.

Krok 2 – transformace do vybraného programovacího jazyka

Tento krok je nad rámec disertační práce, popisuje pouze krok implementace modelu do finálního nástroje.

Smyslem transformace modelu je jeho další optimalizace a usnadnění jeho integrování do dalších nástrojů. Byl vybrán programovací jazyk Python, a to především díky jeho široké rozšířenosti, snadnému použití, možnosti přímé implementace do dalších aplikací a mimo jiné také autorova základní znalost tohoto jazyka. Jazyk Python se také využívá v dalších nástrojích vyvíjených na autorově pracovišti a navržený kód TE modelu tak lze snáze implementovat do jednotlivých nástrojů v případě potřeby.

Jak již bylo zmíněno, tento krok je nad rámec předkládané disertační práce. Vzhledem k vývoji jednotlivých submodelů a omezení programu Excel byl krok již zahájen. Transformace byla dokončena pro submodel silniční dopravy a submodel přeložení. V případě submodelu železniční dopravy je transformace časově náročná vzhledem ke komplexnosti celého submodelu. U submodelu silniční dopravy byla funkcionální postupně dále rozšiřována již

výhradně v Python vzhledem k omezení Excelu – především z důvodu práce s daty pro kombinace projetých úseků, které se pohybují v jednotkách milionů záznamů. Verze v Python tak již neodpovídá 1:1 verzi v Excelu (hlavní odlišnost je především vstupní databáze infrastruktury). Výstupní parametry jsou ale shodné, takže i tuto verzi v Python lze snadno zapojit do celkového vyhodnocení.

Důležitým krokem transformace je napsání kódu, který lze využít z velké části pro všechny submodely, především v případě submodelu pro silniční a železniční dopravu. To umožní především snazší optimalizaci kódu a jednodušší implementaci.

Krok 3 – vytvoření finálního nástroje

Tento krok je nad rámec disertační práce, popisuje pouze krok implementace modelu do finálního nástroje.

Uvažovány jsou tři možnosti výsledné podoby nástroje:

- 1) Uživatelské rozhraní i výpočetní kód v programovacím jazyce Python
- 2) Uživatelské rozhraní v programu Excel, kód v programovacím jazyce Python
- 3) Webová aplikace.

U prvních dvou variant zůstane finálním programovacím jazykem Python. V případě webové aplikace je nutné mít nejdříve připravený kód – vzhledem k posloupnosti kroků implementace – v programovacím jazyce Python. Následně bude vybrán vhodný programovací jazyk pro přípravu webové aplikace.

5.1 Integrace do optimalizačních úloh

Navržený model či jednotlivé submodely lze zapojit do optimalizačních úloh, např. za využití nástroje NERUDA¹, který je vyvíjen na autorově pracovišti. Nástroj NERUDA umožňuje hodnotit matematickou optimalizaci daného problému, např. rozmístění překládacích stanic v daném regionu, navržení svozových oblastí, určení svozových tras či na základě poptávky navrhnout místa nakládky na dané svozové trase.

TE modely mohou sloužit jako podpora optimalizačního výpočtu především ve dvou rovinách. Tou první je pre-processing, tedy lze pomocí nich vyhodnotit vstupní technické parametry, náklady na jednotlivé svozové trasy či náklady na dopravní systém. Druhou možností je jejich zapojení do post-processingu, pro upřesnění finálních výsledků, přepočet nákladů na dané svozové trasy přesně dle míst nakládky/vykládky a daného loženého množství. Možností je také integrování TE modelu přímo do optimalizační úlohy. Vzhledem ke komplexnosti modelů a výpočetní náročnosti optimalizační úlohy, je ale spíše častější využití TE modelů pro pre/post-processing odděleně mimo optimalizační úlohu.

6 ZÁSADY POUŽITÍ

Představený technicko-ekonomický model, respektive jednotlivé submodely, dokáže eliminovat potenciální nepřesnosti a špatně nastavené vstupní parametry díky automatické kontrole parametrů a jejich vlivu na ostatní hodnoty. Vzhledem k tomu, že lze hodnotit široké spektrum přeprav, kdy každá může mít svoje specifika, je nutné zohlednit i tuto část. Důležitou částí jsou tak zásady a pravidla, jak pracovat s modelem, využít jeho jednotlivé části a spolehlivě ho integrovat do řešeného procesu. Pravidla zajišťují, že model bude použit konzistentně a správně k dané problematice, což zajistí dosažení relevantních výsledků.

Níže uvedené body mají uvést do povědomí univerzální postup a pravidla, která by si měl uživatel uvědomit a zohlednit. Body jsou následně detailněji rozebrány.

Metodika použití a integrování modelu do řešené problematiky

1. Definice cíle

- Důvod přepravy
- Manažerské požadavky

2. Definice scénářů

- Definice základních požadavků
- Zohlednění kritérií a omezujících parametrů
- Sestavení SWOT analýzy
- Popis scénářů

3. Výpočet – nastavení modelu a příprava dat

- Nastavení parametrů
- Režimy modelu
- Typ a zdroj dat

4. Validace a diskuse výsledků

- Zpětná kontrola nastavení
- Ověření správnosti
- Analýza výsledků.

Prvním krokem je definování cíle, respektive jaký je důvod přepravy, jaké jsou hlavní požadavky, zda jsou nějaká výrazná manažerská omezení či požadavky, např. preference železniční dopravy vzhledem k už tak velkému silničnímu provozu v okolí areálu či že hlavní motivace je dosažení snížení emisní stopy dopravního řetězce. Důvodem je tak mít především představu o tom, co bude dále hodnoceno a jaký je očekávaný hlavní výsledek.

Od definovaného cíle se odvíjí další krok, v zásadě ten nejdůležitější, a to nastavení hodnocených scénářů a příslušného dopravního řetězce. Disertační práce uvádí soubor otázek reprezentující hlavní body, které je důležité si odpovědět. Nejedná se o výčet všech otázek a uvedené otázky nemají za cíl poskytnout všechny rozhodovací možnosti. Mají za cíl pomoci uvést uživatele do dané problematiky. Odpovědi na uvedené otázky pomohou specifikovat parametry důležité pro potřeby nastavení modelu. V případě, kdy uživatel nezná odpověď či neumí odpovědět na některou z otázek, je nutné provést alespoň základní rešerši dané oblasti, tak, aby se s ní seznámil. Jako jeden z podkladů může posloužit i předkládaná disertační práce, např. kapitola 2.2, která se zabývala technickou rešerší. Výstupem odpovědí by měla být schopnost provést základní úvahu nad daným problémem, sepsat stručné znění uvažovaného scénáře, definovat důležité body pro přepravu a sestavit odpovídající dopravní řetězec. Během sestavování řetězce je nezbytné zvážit všechny nutné kroky/části, tak, aby

bylo možné dopravu reálně provést. **Zahrnutí všech kroků řetězce je nutnou podmínkou pro odpovídající vyhodnocení dopravní úlohy.** Výhodné by také mělo být sestavení SWOT analýzy, tedy uvést silné stránky (S), slabé stránky (W), příležitosti (O) a hrozby (T) uvažovaného řešení.

Po provedení výpočtu pomocí TE modelu je důležité v rámci validace výsledků doporučeno provést zpětnou kontrolu nastavení modelů, zda nikde nevznikla chyba z nepozornosti, zda jsou všechny údaje vyplněny správně apod. Je také vhodné porovnat výsledky s podobným typem přeprav či porovnat jednotlivé dílčí části řetězce, pro které jsou známy údaje. Pokud uživatel nemá vlastní data, se kterými by mohl výsledky porovnat, např. cena současné přepravy, je vhodné provést základní rešerši. Pro získání základní představy o cenové hladině lze také využít různé internetové kalkulátory, viz disertační práce, kapitola 2.1. Jejich výsledky je ale nutné brát s rezervou, jelikož jsou založené pouze na omezené definici daného problému. Pro základní porovnání jsou ale dostačující. Vhodným zdrojem pro validaci výsledků jsou také případové studie. Na závěr vyhodnocení je důležité provést diskusi výsledků, zda splňují dříve nastavené cíle či zda výsledky odpovídají navržené SWOT analýze.

7 APLIKACE A VYUŽITÍ MODELU

Výše uvedené modely již byly využity v řadě studií či projektech, kde sloužily jako hlavní hodnotící nástroj nebo jako pre/post-processing optimalizační úlohy. Níže jsou představeny vybrané studie. Studie byly převážně zhotoveny ve spolupráci s komerčními partnery, v následujícím textu tak nebudou uváděny výsledné dopravní náklady.

V rámci projektu Národní centrum pro energetiku (NCE)⁵ byla ve spolupráci se společností Veolia Energie Kolín a.s. optimalizována doprava palivového mixu do teplárny v Kolíně za účelem dekarbonizace. Nový mix zahrnuje biomasu, sušené čistírenské kaly a peletizované tuhé alternativní palivo (TAP). Železniční doprava byla prioritizována pro biomasu (79 kt/rok) a TAP (26 kt/rok), zatímco čistírenské kaly (10 kt/rok) byly určeny k silniční přepravě. Analýzy vyústily v doporučení využít systém Inno freight pro železniční dopravu. Pro biomasu bylo dále doporučeno spoléhat na stávající výrobce a zajišťovat pouze dopravu na místo zajištění vlastní výroby. Bylo vyhodnoceno, že rozdělení přepravy na železniční i silniční odpovídá požadavkům a lokalitám. V rámci závěrečné zprávy bylo uděleno několik doporučení, které je dobré zvážit. Především se jednalo o navazující detailní místní šetření vytipovaných lokalit, jelikož v rámci studie se pracovalo často s teoretickými úvahami, které nebyly garantem přesněji specifikovány.

Navazující část projektu NCE se zaměřila na hodnocení návozu palivového mixu do teplárny Olomouc, zahrnující 20 kt/rok biomasy a 80 kt/rok peletizovaného TAP. Železniční doprava byla preferována pro TAP, u biomasy byly uvažovány dva scénáře, kdy jeden zahrnoval silniční dopravu z lokální výroby a druhý se zaměřil na železniční dopravu od jednoho vzdálenějšího dodavatele. Analýzy byly provedeny pomocí TE modelů pro silniční a železniční dopravu. Scénáře zahrnovaly hodnocení nákladů, přičemž doprava vlastními železničními soupravami vycházela ekonomicky výhodněji.

Svozová studie pro projekt EVO Planá – Energie z odpadu Táborska analyzovala regionální dopravu směsného komunálního odpadu (SKO) a dřevního odpadu do plánovaného zařízení ZEVO v Plané nad Lužnicí s kapacitou 80 kt/rok. Studie se zaměřila na prognózu produkce odpadu do roku 2027 a následnou analýzu svozových tras pro společnosti Rumpold, Compag Votice a SOMPO Hrádek, které aktuálně obsluhují danou oblast. Hlavním výstupem bylo zhodnocení produkovaných emisí CO₂. Studie rovněž zhodnotila alternativu přesměrování odpadu do jiných projektů ZEVO, jako např. ZEVO Malešice v Praze, v případě nevybudování zařízení v Plané nad Lužnicí.

Rozsáhlá studie přepravy SKO pro partnera ze severozápadních Čech byla rozdělena do čtyř etap: prognóza produkce do roku 2035, analýza systémů silniční a železniční dopravy z obcí s rozšířenou působností (ORP) a návrh optimálního systému dopravy požadovaného množství odpadu ročně. Pro silniční dopravu byly řešeny možnosti lisovaného i nelisovaného odpadu, zatímco železniční doprava byla zaměřena výhradně na lisovaný odpad. Studie využila TE model pro stanovení nákladů na dopravu a překládání odpadu a optimalizační nástroj NERUDA pro rozmístění překládacích stanic a kombinaci dopravních cest.

V rámci projektu CEVOOH⁶ byl vytvořen model PruSym propojující dopravu průmyslových odpadů a jejich nakládání. Klíčovým prvkem byl TE model silniční dopravy, který byl

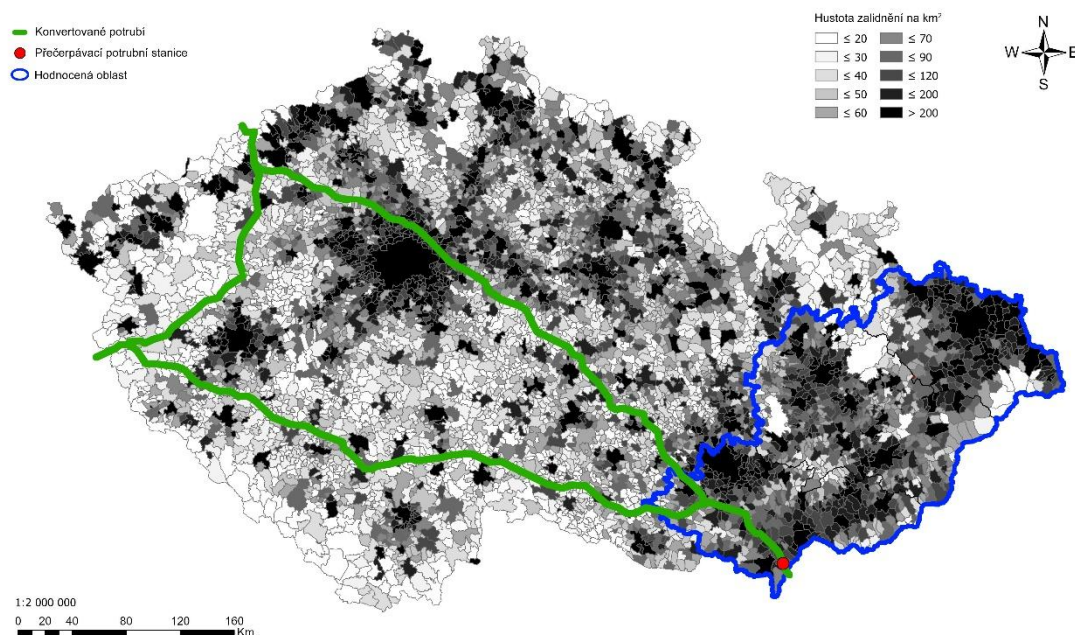
⁵ Výzkumný projekt č. TN01000007 „Národní centrum pro energetiku“, dostupné z <https://starfos.tacr.cz/cs/project/TN01000007>

⁶ Výzkumný projekt č. SS02030008 „Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost“, dostupné z <https://cevooh.cz>

zjednodušen do jedné cenové funkce pro snadnou integraci do aplikací s omezeným počtem vstupních parametrů. Zvoleno bylo osm klíčových parametrů, jako výchozí a cílový bod, typ dopravního systému, sypná hmotnost nebo cena paliva. Analýza ukázala, že faktory jako sypná hmotnost, cena paliva a mzdové náklady na řidiče mají výrazný vliv na výsledné náklady.

7.1 Hodnocení regionální distribuce vodíku

TE model byl využit také v publikovaném článku, který se věnoval regionální dopravě vodíku. Na rozsáhlou řešerši technologií dopravy navazovala případová studie. Česká republika očekává vývoj poptávky a produkce vodíku v několika etapách. Ta první, zhruba do roku 2030, očekává lokální poptávku po vodíku a stejně tak výrobu. Ta tedy bude probíhat primárně v místech poptávky, nebude tak vyžadováno výrazné zapojení dopravy. V další fázi, od roku 2030 (2035) se očekává výrazný nárůst poptávky. Vzhledem k omezenému potenciálu pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů na území ČR se počítá s výrazným importem vodíku ze zahraničí. Kapacitní doprava ze zahraničí bude probíhat pomocí potrubí. Aby to bylo umožněno a ČR zároveň využila svoji výhodnou polohu uprostřed Evropy, je v plánu konverze části potrubní sítě pro zemní plyn. Z obr. 12 je vidět, že uvažované konvertované vodíkové potrubí se týká hlavně jihozápadní části. Mapa také znázorňuje rozložení hustoty obyvatelstva, což bylo využito pro vybrání vhodné oblasti pro případovou studii, jelikož odhad budoucí poptávky dle regionů není dostupný. Výrazná hustota obyvatelstva je na jihovýchodní Moravě a ve Slezsku, pokrytí této oblasti vodíkovým potrubím ale zatím není uvažováno. V této oblasti tak bude nutné vodík dopravovat pomocí silniční nebo železniční dopravy.



Obr. 12: Hustota obyvatel, konvertované vodíkové potrubí a vybraná oblast řešené případové studie (modře)

Ve vybrané oblasti žije asi třetina obyvatel ČR (cca 3 miliony obyvatel) a zahrnuje druhé a třetí největší město ČR. Součástí je také Metropolitní oblast Ostrava (982 000 obyvatel), historicky energeticky náročná průmyslová oblast (doly, výroba oceli). Oblast v současnosti prochází průmyslovou transformací, kdy jednou z klíčových iniciativ je právě využití vodíku. Hodnocenou oblastí prochází mimo jiné hlavní elektrifikovaná železniční trať, která je součástí sítě TEN-T a nabízí potenciál pro uvažování multimodální dopravy. Hodnocená oblast leží v okruhu 50 km od zmíněné železniční trati.

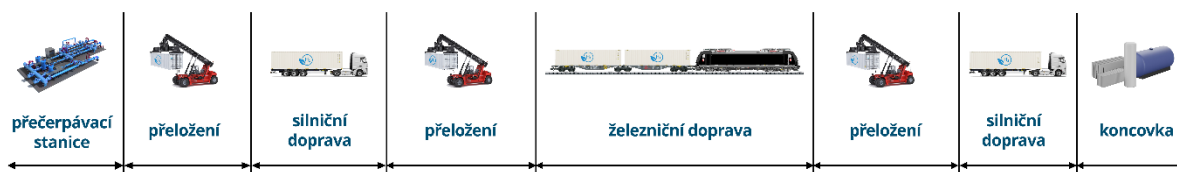
Hlavní vodíkový logistický uzel je navržen u města Břeclav, poblíž hranic s Rakouskem a Slovenskem. Nachází se zde důležitá kompresorová a předávací stanice zemního plynu, což nabízí příležitost rozvíjet zde klíčovou vodíkovou infrastrukturu, jako jsou čerpací stanice, manipulační zařízení či skladovací prostory. Navržený logistický uzel se nachází 3 km od dálnice, nejbližší železniční stanice je vzdálena 5 km.

Navržené scénáře se zabývaly dvěma logistickými řetězci – první zahrnoval pouze silniční dopravu, druhý využíval multimodální přepravu s využitím železnice, viz obr. 13. V obou případech byl zvolen vodík v plynném stavu, stlačený do nádob o tlaku 380 bar. Tlakové nádoby jsou umístěny v ISO kontejneru s celkovou přepravovanou hmotností 1,029 t vodíku. Systém se nazývá Multi Element Gas Container (MEGC). Díky využití ISO kontejneru je možné využít standardní intermodální návěsy a železniční vozy, které mohou být využity i pro jiné typy přeprav. Pro přeložení je využit manipulátor kontejnerů.

SILNIČNÍ DOPRAVA



MULTIMODÁLNÍ DOPRAVA

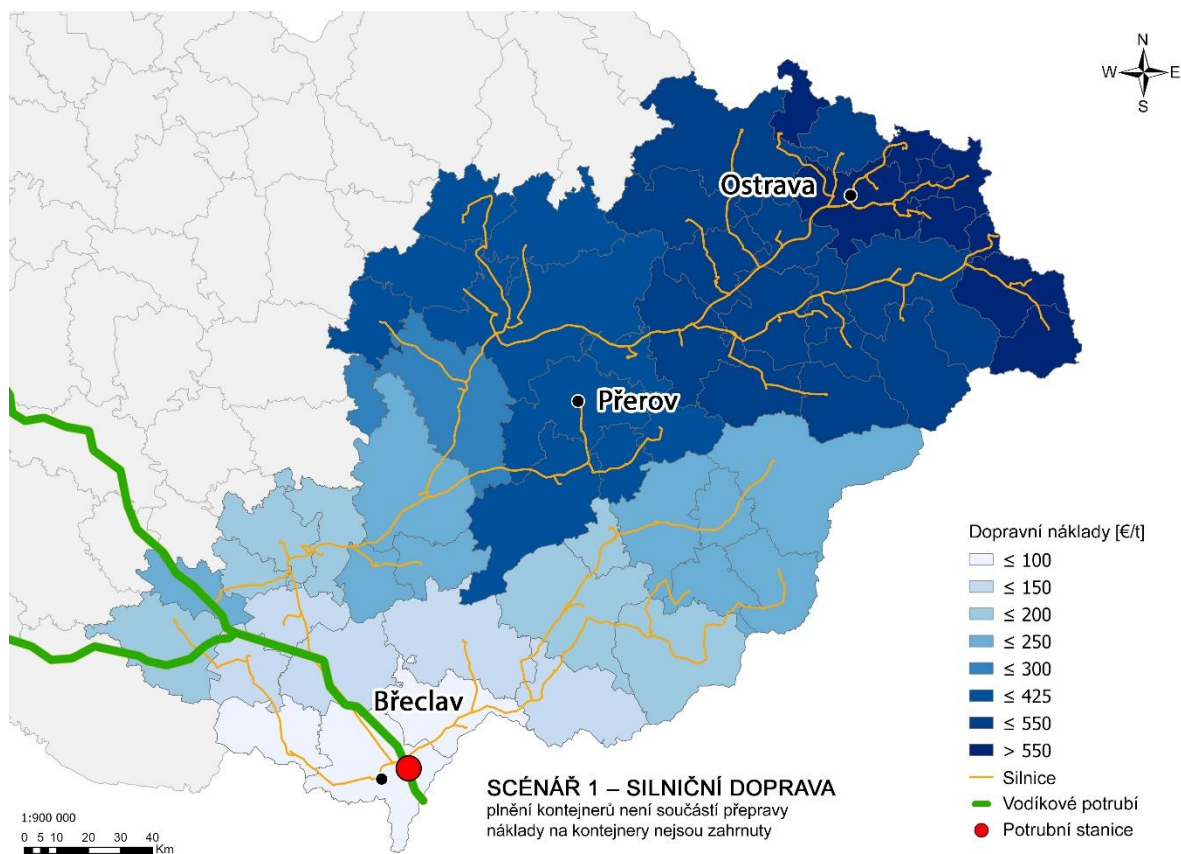


Obr. 13: Navržené scénáře logistického řetězce (cesta do destinace)

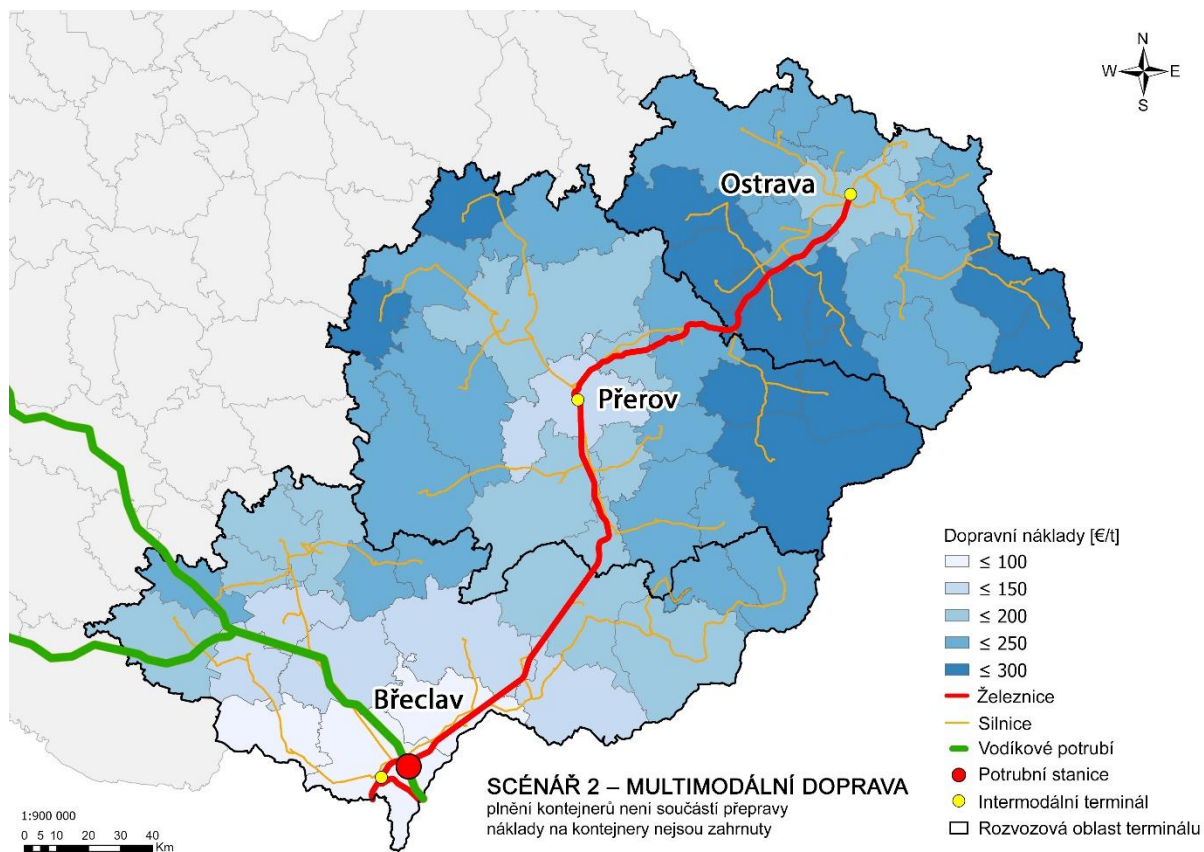
Vzhledem k obtížně zjistitelné ceně těchto speciálních kontejnerů (MEGC) a zároveň neznámé poptávce v regionu, byly kontejnery vyčleněny z hodnocení. Hodnocení se tak zabývalo čistě náklady za dopravní prostředky jako takové.

Pro scénář 1, tedy pouze silniční dopravu, zobrazuje výsledné náklady obr. 14. Je vidět, že dle očekávání náklady rostou s přibývajícím vzdáleností. U krátkých vzdáleností se náklady pohybují cca 55 EUR/t do 10 km a 100 EUR/t pro vzdálenosti do 30 km. U vzdáleností kolem 100 km se náklady na dopravu vyšplhají na cca 220 EUR/t. Nejdelší vzdálenost v hodnoceném území je 256 km s náklady na dopravu 607 EUR/t. Zejména metropolitní oblast Ostrava, kde se očekává značná poptávka po vodíku, má podle odhadů vysoké náklady na dopravu v rozmezí od 425 do 600 EUR/t. Průměrné náklady na dopravu pro hodnocené území jsou 348 EUR/t.

Druhý scénář řešil využití multimodální přepravy za využití železnice. Po naložení kontejnerů ve stanici Břeclav byly dále přepraveny do Přerova, respektive Ostravy, kde se uvažovalo s regionálními intermodálními terminály. Z nich poté budou jednotlivé kontejnery distribuovány k cílovým zákazníkům. Oblast kolem Břeclavi byla hodnocena stejně jako ve scénáři 1, tedy s využitím silniční dopravy. Ve srovnání se scénářem 1 došlo k výraznému snížení dopravních nákladů, především pro vzdálenější oblasti, viz obr. 15. Je vidět také rovnoměrnější rozložení nákladů. ORP, které obsluhuje intermodální terminál v Přerově, mají průměrné náklady 214 EUR/t (339 EUR/t ve scénáři 1), což představuje pokles o 37 %. ORP, které obsluhuje intermodální terminál v Ostravě, mají dopravní náklady v průměru 244 EUR/t (541 EUR/t ve scénáři 1), jedná se tak o 55% snížení. Nejvyšší hodnota ve scénáři 2 poklesla na 292 EUR/t a průměrné náklady na dopravu jsou 205 EUR/t. V průměru tak cena poklesla o 41 % při využití multimodální přepravy, o 55 % pro ORP obsluhované z terminálu Ostrava.



Obr. 14: Výsledné dopravní náklady pro scénář 1 – silniční doprava



Obr. 15: Výsledné dopravní náklady pro scénář 2 – multimodální doprava

8 DISKUSE

Předkládaná disertační práce se zaměřuje na technicko-ekonomické hodnocení multimodální dopravy se zahrnutím silniční a železniční dopravy. Její hlavní cíle se zaměřily na:

- **Přípravení podkladů pro vytvoření nástroje**, který umožní snadné vyhodnocení multimodální přepravy pro celý dopravní řetězec.
- **Vytvoření základních modelů** pro implementaci do výsledného nástroje.
- **Ověření modelů** a jejich dílčích částí, především při řešení případových studií.
- **Sestavení pravidel použití** modelů a jejich integrace do reálných případů.

Představený technicko-ekonomický model, respektive jednotlivé submodely věnující se silniční dopravě, železniční dopravě a přeložení, jsou navrženy jako komplexní a robustní řešení, což je jejich hlavní silná stránka. Umožňují zahrnout široké spektrum dopravních prostředků/systémů a na jejich základě přizpůsobit výpočet. Důležitým prvkem modelu je také integrovaná silniční a železniční infrastrukturní síť, která umožňuje zvýšit detail řešení. Samotné vyhodnocení zahrnuje desítky, především technických parametrů, které dokáží ovlivnit navržené řešení, výsledné dopravní náklady či produkované emise z výfukových plynů.

Navazující kroky budou směřovat k dokončení implementace modelu představené v kapitole 5, především pokračování v transformaci jednotlivých submodelů do programovacího jazyka Python, což se týká primárně submodelu pro železniční dopravu. Finální implementace nástroje je zamýšlena v několika variantách. Jednou z možností je model plně v Python s navrženým uživatelským rozhraním pomocí některé z knihoven. Druhou možností je Python kód integrovaný na pozadí Excel sešitu. Třetí uvažovaná možnost je vytvoření webové aplikace, ať už pro celkový model, tak také případně pro některé submodely, např. model železniční dopravy. Zvažovaným krokem je také přímá integrace modelu do optimalizačního nástroje NERUDA vyvíjeného na autorově pracovišti. U této možnosti je nutné zvážit vliv na výpočetní nároky, jelikož zahrnutí dalších desítek vstupních parametrů do jednotlivých kroků optimalizační úlohy může mít výrazný vliv na schopnosti a stabilitu výpočtu.

I přes navržené řešení modelu, které dokáže spolehlivě a podrobně hodnotit danou problematiku, je žádoucí do budoucna věnovat pozornost částem modelu, které byly v aktuální verzi částečně zjednodušeny. První takovou oblastí je zahrnutá dopravní infrastruktura. V případě silniční sítě nebyly uvažovány všechny obce v ČR. Zároveň také databáze, respektive výpočet, neumožňuje omezit některé úseky. Nelze tak modelovat uzavírky tak jako u vyhodnocení železniční dopravy. Cílem je tak připravit novou databázi, která by zahrnovala všechny obce ČR. Jednou z možností může být vytvoření lokální databáze integrované do modelu. To s sebou ale nese rizika velkých výpočetních nároků na vyhodnocení kombinace projetých úseků při každém spuštění výpočtu. Druhou možností je využití Open Street Maps v podobě napojení na online routingové nástroje, např. [openrouteservice](https://openrouteservice.org/)⁷. Výhodou tohoto řešení je vyhodnocení trasy mezi libovolnými body a zahrnutí nabízených parametrů jako např. rozměry vozidla, zatížení na nápravu či doprava nebezpečného nákladu. Omezení mohou představovat licenční podmínky, ať už současné nebo do budoucna, či nutné připojení k internetu.

V případě železniční dopravy je aktualizace databáze infrastrukturní sítě také plánována. Nová databáze již bude uvažovat více Kolejné úseky a bude tak možné rozlišit parametry jednotlivých kolejí, např. maximální rychlost. Aktualizovaná databáze také bude mít větší detail na úrovni

⁷ Dostupné z <https://openrouteservice.org/>

geometrického tvaru koleje, především s rozlišením oblouků, tak aby mohly být uvažování podrobnější jízdní odpory. K tomu je ale nutné znát poloměr oblouků, což je parametr, který nezahrnují žádná veřejně dostupná data. Potenciální možností je využití GIS programu a výpočet na základě geometrické křivky koleje. Vypočítaný údaj ale bude zahrnovat nepřesnost danou kvalitou podkladových dat.

Další možností pro aktualizaci železniční sítě je opatření digitalizovaných tabulek traťových poměrů, které vydává a spravuje Správa železnic. Ty by měly obsahovat klíčové parametry železniční infrastruktury, ne však všechny. K jejich získání je ale nutné navázání spolupráce se Správou železnic, jelikož tato data nejsou veřejně dostupná. Aktuálně není dostupný žádný online routingový nástroj pro železniční dopravu, databázi tak bude nutné vytvořit.

Zahnutá databáze infrastruktury by do budoucna měla být také snadno aktualizovatelná v případě výstavby nových silničních či železničních úseků či oprav těch stávajících. Důležité tak bude navrhnout řešení, které umožní snadnou aktualizaci databáze bez nutnosti výrazných a zdoluhavých manuálních zásahů.

Další oblastí, která je v aktuální verzi modelu zjednodušena, je stanovení teoretické spotřeby silničního vozidla (dopravního systému), která je aktuálně založena na průměrné spotřebě motorového vozidla a koeficientu zatížení. V ideálním stavu by do budoucna měl být tento výpočet založen na stanovení jízdních odporů, především vlivu odporu vzduchu na základě rychlosti, a na geometrickém profilu silniční infrastruktury, tedy zohledňovat sklonové poměry jakožto nejdůležitější parametr, případně křižovatky nebo zatáčky. U posledních dvou zmíněných parametrů je ale obtížné určit jejich přesný vliv, tedy vliv konkrétních křižovatek nebo zatáček, jelikož nikde není definováno, jakou rychlostí jimi dané vozidlo může projet (tak, jak je to definované pro železniční infrastrukturu). Pozornost výpočtu dynamiky jízdy silničního vozidla tak bude věnována především na zahrnutí sklonových poměrů a závislosti spotřeby na koeficientu zatížení. Ostatní faktory, jako např. pohyb chodců, kvalita komunikace, stav pneumatik apod. není prozatím v plánu integrovat do výpočtu vzhledem k jejich obtížné definici, ale také k zaměření modelu. Vzhledem k trendu elektrifikace nákladních vozidel, ale i manipulátorů nebo bagrů je důležité model rozšířit také o výpočet elektrického pohonu silničních vozidel. Model je na to již v zásadě připraven, jedná se tak o doplnění vhodných metrik a podmínek do výpočetního algoritmu.

V případě železniční dopravy, respektive výpočtu dynamiky jízdy vlaku, je v úvaze celkově optimalizovat algoritmus výpočtu. Výpočet dynamiky jízdy vlaku byl ověřen na reálných údajích, které bylo možné nalézt ve veřejných zdrojích, jejich počet je ale velmi omezen. V plánu je tak provést další ověření výpočtu při porovnání se záznamy z reálného provozu pro jednotlivé typy lokomotiv. K tomu je ale nutné získat dané údaje od železničních dopravců, což je předmětem jednání o spolupráci.

Klíčovým požadavkem celkového vyhodnocení dané problematiky jsou validní vstupní data. Ať už se jedná o technické parametry, tak především pořizovací ceny jednotlivých dopravních elementů. Technické parametry lze alespoň částečně dohledat z veřejných zdrojů a následně je doplnit o zkušenosti odborníků z praxe, případně na základě vlastního zjištění. V případě určení pořizovacích nákladů je ale situace značně komplikovanější. Výrobci v rámci obchodní strategie zpravidla nezveřejňují pořizovací ceny a náklady na údržbu, tudíž je velmi obtížné získat aktuální údaje. Některé cenové údaje lze dohledat např. ve studentských závěrečných pracích, které byly zhotoveny ve spolupráci s dopravci či výrobcí. U silničních dopravních prostředků lze pořizovací náklady také částečně dohledat na online prodejních portálech, kde jsou často nabízeny skladové zásoby. U železničních vozů či lokomotiv, ale i prvků intermodálních systémů, je zjištění pořizovacích cen velmi problematické, místy až nemožné. Možnosti určení cen tak jsou velmi limitované, často pouze na základě cenového odhadu v podobné kategorii produktů.

9 ZÁVĚRY

Doprava je klíčovou součástí logistických řetězců, nejenom v rámci odpadového hospodářství, ale víceméně u všech komodit. S přibývajícím vzdáleností či množstvím dané komodity roste význam dopravy a je nutné se zabývat její efektivitou a environmentální stopou.

Disertační práce se věnovala vývoji technicko-ekonomického modelu multimodální přepravy a jednotlivých částí z pohledu silniční dopravy, železniční dopravy a překládky. Model si klade za cíl být podpůrným nástrojem pro hodnocení dopravy v rámci logistického řetězce, například při plánovaném převodu přeprav ze silniční dopravy na železniční v rámci snižování emisních dopadů dopravy.

Navržený model se zabývá oblastmi, které nebyly v předchozích výzkumech plně řešeny, jako je integrace reálné infrastruktury či podrobný výpočet teoretické spotřeby energie – zejména pro železniční dopravu. Tento přístup také umožňuje přesnější stanovení emisí z výfukových plynů. Základem je detailní vyhodnocení technických parametrů, na které navazuje podrobné technické vyhodnocení. Výpočet je pak zakončen zhodnocením ekonomických parametrů. Hlavní přínosy modelu spočívají především v jeho robustním a komplexním výpočtu. Model je tvořen jako univerzální, umožňuje tak hodnotit široké spektrum přeprav bez nutných modifikací výpočtu.

Disertační práce také specifikovala zásady použití modelu a jeho integraci do reálných úloh. Byla navržena sada otázek, které mají za cíl uživatele provést sestavením dopravního řetězce, definováním okrajových podmínek řešené úlohy a obecně uvést uživatele do dané problematiky.

Model, respektive jednotlivé submodely, již byly využity v řadě studií a projektů, kde potvrdily svoji důležitou roli a díky svému detailu umožnily vyhodnocení rozličných parametrů, které mají vliv na dané dopravní úlohy.

Navazující práce bude směřovat k dokončení transformace jednotlivých submodelů do programovacího jazyka Python a následné přípravě finálního nástroje pro hodnocení multimodální přepravy. Důraz bude také kladen na zpřesnění jednotlivých výpočtů a rozšíření databáze infrastruktury do většího detailu.

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Transport and mobility. Online. European Environment Agency. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/transport-and-mobility?activeTab=fa515f0c-9ab0-493c-b4cd-58a32dfaae0a>. [cit. 2025-04-02].
- [2] Emise skleníkových plynů v ČR podle sektorů. Online. Fakta o klimatu. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-cr>. [cit. 2025-04-02].
- [3] SONGA, Malin; ZHANG, Guijun; ZENG, Wuxiong; LIU, Jianhua a FANG, Kuangnan. Railway transportation and environmental efficiency in China. Online. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2016, č. 48. ISSN 1361-9209. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920915000954>. [cit. 2020-06-09].
- [4] Nákladní doprava - časové řady | ČSÚ. Online. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/nakladni_doprava_casove_rady. [cit. 2022-10-20].
- [5] Ročenka dopravy České republiky 2023. Online. Ministerstvo dopravy České republiky. Dostupné z: <https://www.sydos.cz/cs/rocenka-2023/index.html>. [cit. 2025-04-01].
- [6] Ročenka dopravy České republiky 2004. Online. Ministerstvo dopravy České republiky. Dostupné z: <https://www.sydos.cz/cs/rocenka-2004/index.htm>. [cit. 2025-04-01].
- [7] Ročenka dopravy České republiky 2009. Online. Ministerstvo dopravy České republiky. Dostupné z: <https://www.sydos.cz/cs/rocenka-2009/index.html>. [cit. 2025-04-01].
- [8] Ročenka dopravy České republiky 2014. Online. Ministerstvo dopravy České republiky. Dostupné z: <https://www.sydos.cz/cs/rocenka-2014/index2014.html>. [cit. 2025-04-01].
- [9] Ročenka dopravy České republiky 2019. Online. Ministerstvo dopravy České republiky. Dostupné z: <https://www.sydos.cz/cs/rocenka-2019/index.html>. [cit. 2025-04-01].
- [10] Ministerstvo dopravy ČR - kombinovaná doprava. Online. 2016. Dostupné z: [https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Kombinovana-doprava-\(2\)/kombinovana-doprava-\(1\)](https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Kombinovana-doprava-(2)/kombinovana-doprava-(1)). [cit. 2020-06-15].
- [11] HYLAND, Michael F.; MAHMASSANI, Hani S. a BOU MJAHEH, Lama. Analytical models of rail transportation service in the grain supply chain: Deconstructing the operational and economic advantages of shuttle train service. Online. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2016, roč. 93, s. 294-315. ISSN 13665545. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.06.008>. [cit. 2025-03-31].
- [12] Zweckverband Müllverwertung Schwandorf. Online. Dostupné z: <https://www.z-m-s.de/muellkraftwerk/umweltschutz/logistik/index.html>. [cit. 2020-05-30].
- [13] Waste-By-Rail Services. Online. WIN Waste. Dostupné z: <https://www.win-waste.com/green-by-design/waste-by-rail/>. [cit. 2025-04-02].
- [14] Austria: New TransFER streamlines waste transport by rail. Online. Railmarket.com. Dostupné z: <https://cs.railmarket.com/news/technology-innovation/3250-austria-new-transfer-streamlines-waste-transport-by-rail>. [cit. 2025-04-02].

- [15] Komunální odpad na železnici. Online. ČD Cargo. Dostupné z: https://www.cdcargo.cz/cs/aktuality/-/asset_publisher/eJwZFZ6uHkBH/content/komunalni-odpad-na-zeleznici. [cit. 2020-06-03].
- [16] GREGOR, Jiří. Pokročilé modely logistiky v oblasti odpadového hospodářství. Online, Disertační práce, vedoucí Petr Stehlík. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního inženýrství, 2019. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/139107>. [cit. 2022-10-19].
- [17] POUL, David. Využití železniční dopravy v oblasti odpadového hospodářství. Online, Diplomová práce, vedoucí Ing. Jiří Gregor, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 2020. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/125755>. [cit. 2022-10-20].
- [18] Data50. Online. Geoportál ČÚZK. 2025. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(mg11raoulyefgenzdbpyaah3\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=mapy_data50&text=dSady_mapyData50&head_tab=sekce-02-gp&menu=2290](https://geoportal.cuzk.cz/(S(mg11raoulyefgenzdbpyaah3))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=mapy_data50&text=dSady_mapyData50&head_tab=sekce-02-gp&menu=2290). [cit. 2025-03-06].
- [19] FAMFULÍK, J. a spol. Scripta: Lokomotivní simulátor. Online. Dostupné z: http://www.342.vsb.cz/loksim/LS_skripta.htm. [cit. 2022-10-25].
- [20] Matematický model jízdy vlaku. Online. Dostupné z: <http://diplom.utc.sk/wan/1881.pdf>. [cit. 2022-10-25].
- [21] HERING, Tomáš. Návrh výpočetního software pro trakční energetické výpočty. Online, Diplomová práce, vedoucí Ing. Ladislav Mlynařík, Ph.D. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, 2018. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/70460/HeringT_Navrh_vypocetniho_software_LM_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y. [cit. 2022-10-25].
- [22] EDOCUN: Elektrická trakce. Online. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015022101>. [cit. 2022-10-25].
- [23] VINTR, Martin. Trakční vlastnosti lokomotivy s velkým instalovaným výkonem. Online, Diplomová práce, vedoucí Ing. Martin Pittermann, Ph.D. Plzeň: Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni, 2017. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/28814/1/Trakcni%20vlastnosti%20lokomotivy%20s%20velkym%20instalovany%20vykonem.pdf>. [cit. 2022-10-25].
- [24] FOJTŮ, Ondřej. Modelování provozních parametrů posunovacích lokomotiv. Online, Diplomová práce, vedoucí Ing. Petr Nachtigall, Ph.D. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, 2018. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/71237/FojtuO_Modelovani%20parametru_PN_2018.pdf?sequence=4&isAllowed=y. [cit. 2022-10-25].
- [25] SCHEJBAL, Karel. Analýza spotřeby trakční energie kontejnerového vlaku. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Tomáš Michálek, Ph.D. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita pardubice, 2020. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstreamupce/handle/10195/75927/SchejbalK_AnalyzaSpotreby_TM_2020.pdf?sequence=4. [cit. 2022-10-25].
- [26] Motorová nafta třídy B, D, F (MN tř. B,D,F). Online. ORLEN Unipetrol RPA. Dostupné z: <https://www.unipetrolrpa.cz/CS/NabidkaProduktu/rafinerske-produkty/PohonneHmoty/Nafty/Stranky/Motorov%C3%A1-nafta-t%C5%99%C3%ADdy.aspx>. [cit. 2025-01-07].

- [27] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Online. European Environment Agency. 2023. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023>. [cit. 2025-01-07].
- [28] Emisní faktor CO₂ z výroby elektřiny za léta 2010–2023. Online. Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic. 2024. Dostupné z: <https://mpo.gov.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/emisni-faktor-co2-z-vyroby-elektriny-za-leta-2010-2023--280262/>. [cit. 2025-01-07].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Průměrná přepravní vzdálenost pro silniční a železniční dopravu v rámci ČR, na základě dat Ministerstva dopravy ČR [5], [6], [7], [8], [9]	7
Obr. 2: Ukázka možného dopravního řetězce.....	11
Obr. 3: Struktura technicko-ekonomického submodelu silniční a železniční dopravy.....	13
Obr. 4: Silniční síť technicko-ekonomického modelu a) ČR; b) úroveň měst.....	14
Obr. 5: Železniční síť technicko-ekonomického modelu a) ČR; b) úroveň měst.....	15
Obr. 6: Vyhodnocení dopravních cest pro různé kategorie dopravního systému.....	17
Obr. 7: Silové působení pro hodnocenou dopravní cestu	21
Obr. 8: Průběh rychlosti v závislosti na vzdálenosti pro hodnocenou dopravní cestu.....	21
Obr. 9: Výškový profil hodnocené dopravní cesty	22
Obr. 10: Ukázkové rozložení nákladů na jeden cyklus.....	25
Obr. 11: Postup implementace	27
Obr. 12: Hustota obyvatel, konvertované vodíkové potrubí a vybraná oblast řešené případové studie (modře)	32
Obr. 13: Navržené scénáře logistického řetězce (cesta do destinace).....	33
Obr. 14: Výsledné dopravní náklady pro scénář 1 – silniční doprava.....	34
Obr. 15: Výsledné dopravní náklady pro scénář 2 – multimodální doprava.....	34

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Základní přehled silniční a železniční přepravy v ČR pro rok 2023, na základě dat Ministerstva dopravy ČR [5],[6],[7],[8],[9]	7
Tab. 2: Kategorie silničních vozidel (dopravních systémů)	16