FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA
GEOMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Validace dopravního modelu vybrané oblasti v software TraMod

Plzeň, 2024

Bc. Jan Hromada

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Jan HROMADA**
Osobní číslo:	**A21N0016P**
Studijní program:	**N3602 Geomatika**
Studijní obor:	**Geomatika**
Téma práce:	**Validace dopravního modelu vybrané oblasti vytvořeného v software TraMod**
Zadávající katedra:	**Katedra geomatiky**

Zásady pro vypracování

1. Seznámení se s principy makroskopického modelování dopravy.
2. Nalezení dostupných datových zdrojů pro tvorbu a kalibraci dopravního modelu.
3. Vytvoření a kalibrace dopravního modelu vybrané oblasti.
4. Validace modelu.

Rozsah diplomové práce: **cca 45 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Jitka ONDRÁČKOVÁ, Petr HOFHANSL, Zdeněk MELZER, Jiří DUFEK, Jan VOLEK, Jakub VALTA, Roman ČAMPULA a Marek TÖGEL. *Metodika pro tvorbu a hodnocení makroskopických dopravních modelů: minimální standardy návrhů modelů pro dopravní plánování*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, 2017. ISBN 978-80-88074-52-6
- Michael MCNALLY. *The Four Step Model*. University of California, Irvine: Institute of Transportation Studies, 2007. Dostupné z: https://www.academia.edu/6558260/THE_FOUR_STEP_MODEL
- *Silniční obzor*. 71. Praha : Česká silniční společnost, 2010. ISSN 0322-7154. Dostupné z: https://www.cdv.cz/file/clanek-celostatni-scitani-dopravy-na-silnicich-a-dalnicich-v-cr-v-roce-2010/
- Gabriela MITRAN, Sorin ILIE a Viorel NICOLAE. *The calibration of macroscopic transport sub-models through traffic counting*. University of Pitesti, Romania: Faculty of Mechanics and Technology, Automotive and Transport Department *2014*. Dostupné z: http://metrocount.com/downloads/science/ICTTE.pdf

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Hájek, Ph.D.**
Katedra geomatiky

Datum zadání diplomové práce: **2. listopadu 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2024**

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
L.S.

Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Karel Janečka, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 2. listopadu 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma "*Validace dopravního modelu vybrané oblasti vytvořeného v software TraMod*" vypracoval samostatně pod odborným dohledem vedoucího diplomové práce za použití uvedených zdrojů.

V Plzni dne ....

Bc. Jan Hromada

Poděkování

V této části bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Hájkovi, Ph.D. za jeho cenné rady, které mi poskytl, za vstřícný přístup a zejména za jeho čas, obětavost a trpělivost. Velké poděkování rovněž patří Ing. Karlu Jedličkovi, Ph.D. za odborné rady při zpracování této závěrečné práce a Ing. Radku Fialovi, Ph.D. za pomoc při zpracování dat. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni Mgr. Kristýně Ceralové, která mi byla po celou dobu studia oporou.

Abstrakt

Hlavním cílem této závěrečné práce je vytvoření dopravního modelu v softwaru TraMod a jeho následná validace. Text práce se teoretické části zaměřuje na problematiku dopravního modelování a dopravních modelů jako takových, včetně představení tradičních přístupů k tvorbě makroskopických dopravních modelů. Na základě těchto přístupů je aplikována tvorba dopravního modelu zájmového území za využití principů čtyřstupňového dopravního modelování. Tvorba modelu je provázena detailním popisem vstupních dat a jejich zpracování s následným využití software TraMod, kterým bylo vytvoření dopravního modelu docíleno. Po dokončení dopravního modelu bylo přistoupeno k provedení kalibrace následované validací pomocí GEH statistiky. Výsledky jsou prezentovány v podobě mapových a tabulkových výstupů. V neposlední řadě došlo na základě validačních výsledků k porovnání vytvořeného dopravního modelu v software TraMod vůči dopravnímu modelu EDIP. Na závěr byla diskutována omezení vytvořeného dopravního modelu včetně návrhů na vylepšení.

Klíčová slova

dopravní model, dopravní modelování, čtyřstupňový dopravní model, TraMod, kalibrace, validace, GEH statistika, Plzeňský kraj

Abstract

The main objective of this thesis is to create a traffic model in TraMod software and its subsequent validation. The theoretical part of the thesis focuses on the issues of traffic modelling and traffic models as such, including the introduction of traditional approaches to the creation of macroscopic traffic models. Based on these approaches, the development of a traffic model of the area of interest is applied using the principles of four-step traffic modelling. The creation of the model is accompanied by a detailed description of the input data and its processing, followed by the use of TraMod software, which was used to achieve the creation of the traffic model. Once the traffic model was completed, calibration followed by validation using GEH statistics was undertaken. The results are presented in the form of map and table outputs. The validation results were used to compare the traffic model created in TraMod software against the EDIP traffic model. Finally, the limitations of the developed traffic model were discussed including suggestions for improvements.

Keywords

traffic model, traffic modelling, four-step traffic model, TraMod, calibration, validation, GEH statistics, Pilsen region

Obsah

Seznam zkratek **8**
Seznam obrázků **10**
Seznam tabulek **11**
Úvod **12**
1. Základní pojmy teorie systémů **13**
Systém 13
Model a modelování 13
Simulace modelu 13
Ověření věrohodnosti modelu 14
2. Modelování dopravy **15**
2.1. Dopravní model 15
2.2. Klasifikace dopravních modelů 16
2.2.1. Klasifikace podle úrovně detailu 16
2.2.2. Klasifikace podle počtu dopravní módů 17
2.2.3. Klasifikace podle časového hlediska 17
2.2.4. Klasifikace podle přístupu k modelování dopravní poptávky 18
2.3. Metodika tvorby čtyřstupňového makroskopického dopravního modelu 19
2.3.1. Definice účelu dopravního modelu 20
2.3.2. Parametry dopravního modelu 21
Rozsah zájmového území 21
Zonální struktura 21
Dopravní módy 22
Segmentace modelované populace 22
Časové období 22
Výběr softwaru 23
2.3.3. Vstupní data 23
2.3.4. Tvorba dopravního modelu 24
Trip Generation 24
Trip Distribution 24
Mode Choice 25
Traffic Assignment 25
Shrnutí 26
2.3.5. Kalibrace 26
2.3.6. Validace 27
2.3.7. Predikce 28
2.3.8. Dokumentace dopravního modelu 28

3. Dopravní model zájmového území 29
3.1. Parametry dopravního modelu 29
3.2. Specifikace využitého softwaru 30
3.2.1. ArcGIS Pro 30
3.2.2. ArcGIS Notebooks 30
3.2.3. PostgreSQL 31
3.2.4. TraMod 31
3.2.5. OSM2TraMod 31
3.3. Datová struktura TraMod 32
3.4. Tvorba dopravního modelu 38
3.4.1. Příprava generátorů dopravy 38
3.4.2. Využití nástroje OSM2TraMod 39
3.4.3. Vytvoření a částečné naplnění datového modelu 43
3.4.4. Editace vstupních dat a naplnění datového modelu 44
Propojení databáze s ArcGIS Pro 44
Selekce dat (*Edge*, *Node*) podle polygonu Plzeňského kraje 45
Napojení dat *Node* na nejbližší *Zone* 46
Úprava atributu capacity tabulky *Edge* 46
Editace dat *Edge* a *Node* 46
Export upravených dat do databáze 48
Databázové úpravy 49
3.4.5. Výpočty v API TraMod 50
Spuštění softwaru TraMod 50
TraMod API 50
Výpočet OD matice 51
Přiřazení OD matice na síť 52
3.5. Úprava parametrů dopravního modelu 54
3.5.1. Prvotní analýza *traffic/capacity* 54
3.5.2. Výpočet dopravního výkonu 56
3.5.3. Problematika tranzitních generátorů dopravy 57
3.5.4. Aplikace úprav parametrů 59
Tabulka *Zone* 59
3.5.5. Druhotná analýza *traffic/capacity* 60
3.5.6. Druhotný výpočet dopravního výkonu 61
3.6. Kalibrace dopravního modelu 62
3.6.1. Vstupní data a jejich problematika 62
3.6.2. Zpracování vstupních dat CSD 63
3.6.3. Úprava OD matice 66
3.6.4. Přiřazení kalibrované OD matice na síť 67

3.6.5. Výsledná analýza *traffic/capacity* 68
3.6.6. Výsledný výpočet dopravního výkonu 69
3.7. Validace dopravního modelu 70
3.7.1. Vstupní data 70
IdDetektor 71
DatumCas 72
Intenzita a *IntenzitaN* 72
3.7.2. Zpracování vstupních dat 72
3.7.3. Problematika vstupních dat 77
3.7.4. GEH statistika 78
Převedení na dopravních intenzit 78
3.7.5. Validace dopravního modelu TraMod 79
3.7.6. Validace dopravního modelu EDIP 79
Dopravní model EDIP 80
3.7.7. Validace dopravní modelu TraMod vůči EDIP 82
4. Dosažené výsledky a jejich diskuse 83
Závěr 86
Seznam literatury 87
Přílohy 90

Seznam zkratek

API	Application Programming Interface
CIS_SU	Číslo silničního úseku
CSD	Celostátní sčítání dopravy
CSV	Comma-Separated Values
ČSÚ	Český statistický úřad
EPSG	European Petroleum Survey Group
ETL	Extract Transform Load
FAV	Fakulta aplikovaných věd
FGDB	File Geodatabase
GB	Gigabyte
GIS	Geografický informační systém
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
IT	Informační technologie
KGM	Katedra geomatiky
KODCOB	Kód části obce
KÚPK	Krajský úřad Plzeňského kraje
ODM	Origin Destination Matrix (případně OD matice)
OSM	OpenStreetMap
PBF	Protocollbuffer Binary Format
PDF	Portable Document Format
RAM	Random Access Memory
RPDI	Roční průměr dopravních intenzit
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic
s.r.o.	Společnost s ručením omezeným

SHP	Shapefile
SQL	Structured Query Language
SV	Součet vozidel
SW	Software
TraMod	Traffic Modeler
Vozokm	Vozokilometr
WGS84	World Geodetic System 1984
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
ZSJ	Základní sídelní jednotka

Seznam obrázků

Obrázek 1: Ověření věrohodnosti modelu, převzato z (Glombíková, 2016)..... 14
Obrázek 2: Postup při tvorbě dopravního modelu, převzato z (Melzer a kol., 2017).....20
Obrázek 3: Granularita zonální struktury, převzato (Melzer a kol., 2017).....22
Obrázek 4: Zájmové území.....29
Obrázek 5: Databázové schéma TraMod..... 37
Obrázek 6: Generátory dopravy (*Zone*).....39
Obrázek 7: Proces konverze nástroje OSM2TraMod, převzato z (Vaněk, 2022).....40
Obrázek 8: Vznik pseudouzlu, převzato Andrš (2023)..... 42
Obrázek 9: Rozsah exportovaných OSM dat.....43
Obrázek 10: Připojení PostgreSQL databáze k ArcGIS Pro.....45
Obrázek 11: Třídy silniční sítě (*Edge*) dle reklasifikační tabulky 9..... 47
Obrázek 12: Uzly (*Node*) silniční sítě (*Edge*)..... 48
Obrázek 13: Prvotní poměr *traffic*/*capacity* [%].....55
Obrázek 14: Prvotní histogram poměru *traffic*/*capacity* $\leq$ 100 %.....55
Obrázek 15: Prvotní histogram poměru *traffic*/*capacity* $>$ 100 %.....56
Obrázek 16: Vybrané tranzitní generátory dopravy z dopravního modelu EDIP..... 58
Obrázek 17: Druhotný poměr *traffic*/*capacity* [%] po zapracování úprav..... 60
Obrázek 18. Druhotný histogram poměru *traffic*/*capacity* $\leq$ 100 %..... 61
Obrázek 19. Druhotný histogram poměru *traffic*/*capacity* $>$ 100 %..... 61
Obrázek 20: Polohy sčítačů a silniční úseky Plzeňského kraje.....63
Obrázek 21: Vrstva *measured_flow* představující hrany (*Edge*) s údaji o reálně měřených dopravních intenzitách z CSD..... 65
Obrázek 22. Výsledný poměr *traffic*/*capacity* [%] zkalibrovaného modelu..... 69
Obrázek 23: Výsledný histogram poměru *traffic*/*capacity* [%] $\leq$ 100 % zkalibrovaného modelu..... 69
Obrázek 24: Výsledný histogram poměru *traffic*/*capacity* [%] $>$ 100 % zkalibrovaného modelu..... 69
Obrázek 25: Struktura validačních dat.....71
Obrázek 26: Příklad atributu *IdDetektor*.....71
Obrázek 27: Validační dataset v podobě dopravních kamer Plzeňského kraje..... 77
Obrázek 28: Rozsah silniční sítě (*links*) dopravního modelu EDIP.....81

Seznam tabulek

Tabulka 1: Popis struktury tabulky *Edge*.....33
Tabulka 2: Popis struktury tabulky *Node*.....33
Tabulka 3: Popis struktury tabulky *Zone*.....34
Tabulka 4: Popis struktury tabulky *Turn_restriction*.....34
Tabulka 5: Popis struktury tabulky *ODM*.....35
Tabulka 6: Popis struktury tabulky *Matrix*.....35
Tabulka 7: Popis struktury tabulky *Measured_flow*.....36
Tabulka 8: Popis struktury tabulky *Dataset*.....36
Tabulka 9: Reklasifikace silnic OSM na typologii pozemních komunikací ČR.....41
Tabulka 10: Převod třídy pozemní komunikace na její kapacitu, upraveno dle Kolovský (2016).....46
Tabulka 11. Srovnání dopravních výkonů silniční dopravy (zaokrouhleno na celá čísla)..
.....57
Tabulka 12. Srovnání dopravních výkonů silniční dopravy (zaokrouhleno na celá čísla)..
.....61
Tabulka 13. Srovnání dopravních výkonů silniční dopravy (zaokrouhleno na celá čísla)..
.....69
Tabulka 14: Výsledek statistiky GEH dopravního modelu TraMod.....79
Tabulka 15: Výsledek statistiky GEH dopravního modelu EDIP.....82
Tabulka 16: Výsledek statistiky GEH dopravního modelu TraMod a modelu EDIP....82
Tabulka 17: Porovnání validačních výsledků GEH statistikou.....83

Úvod

V současné době, kdy dochází k neustálému růstu urbanizace a dopravních nároků, je nezbytné, aby dopravní modely reprezentující skutečné chování dopravy poskytovaly co nejpřesnější odraz reality. Validace těchto modelů proto představuje zásadní ověření toho, zda a do jaké míry dopravní model odpovídá skutečným dopravním podmínkám. Hlavní cíl této závěrečné práce spočívá ve validaci dopravního modelu vybrané oblasti. Realizaci tohoto cíle předchází vyhledání dostupných datových zdrojů nezbytných pro tvorbu a následnou kalibraci dopravního modelu.

První kapitola se zabývá vymezením teoretických pojmů potřebných pro tuto závěrečnou práci týkající se oblasti teorie systémů. Tyto pojmy jsou zásadní pro následující kapitoly, zejména v kontextu dopravního modelování, kterému je věnována druhá kapitola.

Ve druhé kapitole je čtenář seznámen s definicí pojmu dopravní model následovaný klasifikací dopravních modelů, kde jsou modely systematicky rozděleny podle různých kritérií a charakteristik. Klíčovou částí této kapitoly je popis metodiky čtyřstupňového dopravního modelování, která představuje základní metodiku pro praktickou tvorby dopravního modelu.

Třetí, a zároveň nejobsáhlejší, kapitola se věnuje praktické aplikaci představených teoretických principů tvorby dopravního modelu. V počátku jsou stanoveny parametry vytvářeného dopravního modelu a představeny softwarové nástroje využité při jeho tvorbě, včetně klíčového softwaru TraMod. Další částí kapitoly je popis a zpracování vstupních dat společně s jejich integrací do datové struktury TraMod. S využitím TraMod API je následně vytvořen a ověřen prvotní dopravní model vykazující nedostatečné výsledky. V důsledku toho jsou provedeny úpravy parametrů modelu společně s jeho přepočtem následovaným druhotnou verifikací, na jejímž základě je dosaženo uspokojujících výsledků. V neposlední řadě se kapitola zaměřuje na kalibraci modelu a problematiku kalibračního datasetu, zakončených aplikací validace modelu GEH statistikou. V té jsou představena tři praktická provedení porovnání modelu TraMod a dopravního modelu EDIP včetně jeho rámcového popisu.

Závěrečná kapitola se věnuje diskusi nad dosaženými výsledky zahrnující návrhy pro možná zlepšení procesu tvorby dopravního modelu, jakož i specifických technických aspektů užitých v souvislosti se softwarem TraMod.

1. Základní pojmy teorie systémů

V první řadě je třeba vymezit základní pojmy teorie systémů. Ačkoliv se nejedná o oblast, která je přímým předmětem této práce, neodmyslitelně však souvisí s problematikou dopravního modelování. Téma teorie systémů je velmi složité a komplexní samo o sobě, a proto se mu tato kapitola bude věnovat pouze okrajově a výhradně v souvislosti s dopravním modelováním.

Systém

Definice systému se může v různých oblastech lišit, což platí i pro jeho vlastnosti. Obecně se ale jedná o množinu prvků propojenými vazbami (vztahy, relacemi), mezi kterými funguje vzájemná interakce (Jančíková, 2012). Návrh každého systému má specifický účel, který závisí na cíli nebo výsledku, kterého má být dosaženo (Law, 2015). Podle (Klement, 2022) si pod systémem můžeme například představit lidské tělo a jeho skupinu tělesných orgánů. Za systém lze mimo jiné považovat také vesmír, počasí, ale i dopravu. V uvedených případech se jedná o velmi složité a komplexní systémy, se kterými se někteří z nás setkáváme v běžném životě dnes a denně, což v minulosti dalo podnět k motivaci, pokusit se takové systémy modelovat.

Model a modelování

Model je zjednodušená reprezentace reálného systému, která zachovává jeho podstatné vlastnosti (Jančíková, 2012).

Pod pojmem modelování rozumíme proces tvorby modelu, jehož hlavním účelem je snaha o co nejvěrohodnější reprezentaci reality (systému). Realitu však ve většině případech nelze doposud modelovat zcela dokonale, což vede k nezbytnému zanedbání některých jejích faktorů, které v konečném důsledku snižují realističnost a kvalitu modelu. I přesto by ale chování modelu mělo, pokud možno, co nejvíce odpovídat reálnému prostředí. Právě odchylka modelu od skutečnosti bývá častým předmětem zkoumání a zároveň může sloužit jako kritérium pro hodnocení jeho kvality. Obecně platí, že v závislosti na účelu a cíli modelu je třeba zvolit vhodných modelovacích metod a technik (Žampa, nedatováno; Law, 2015).

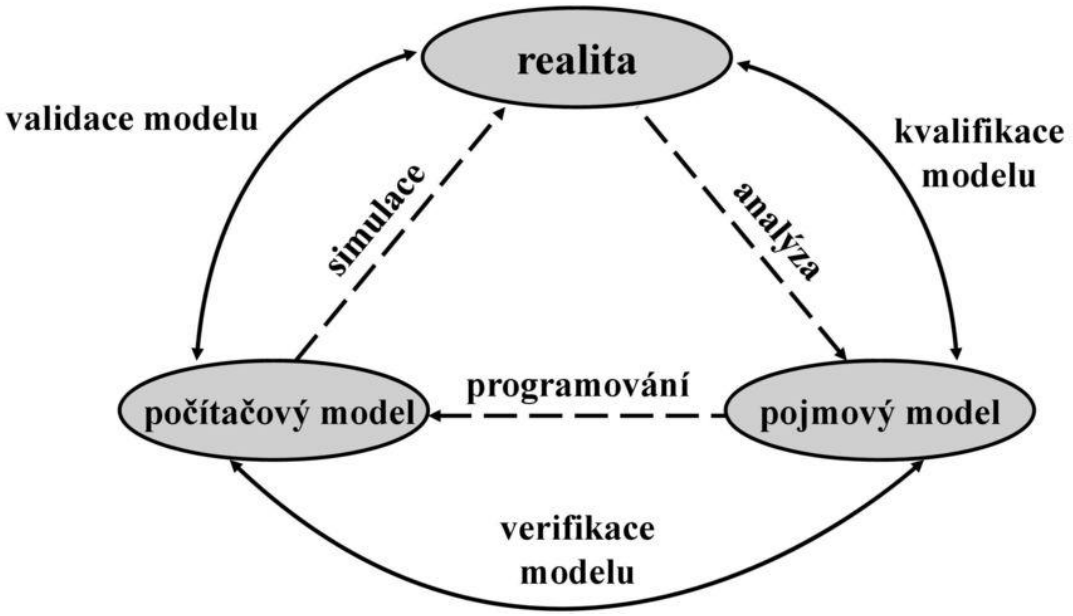
Simulace modelu

Procesem simulace modelu dochází k vytvoření umělého prostředí, ve kterém se pozoruje a zkoumá chování a vlastnosti modelu za různých podmínek. Simulace

umožňuje v tomto prostředí testovat různé scénáře aniž by bylo nutné experimenty provádět v reálném světě, což v konečném důsledku může mít vliv například na nižší ekonomickou nákladnost nebo na předvídání a následnou prevenci různých katastrof (Kelton & Law, 1991).

Ověření věrohodnosti modelu

Ověření věrohodnosti modelu je proces, při kterém se testuje, nakolik se chování modelu shoduje se skutečným systémem, který model reprezentuje. Cílem je získat jistotu v podobě dostatečně věrohodného a přesného modelu vzhledem ke konkrétnímu účelu, za kterým byl vytvořen (Law, 2015).



Obrázek 1: Ověření věrohodnosti modelu, převzato z (Glombíková, 2016)

Podle obrázku 1 lze ověření věrohodnosti modelu shrnout do několika kroků – kvalifikace, verifikace a validace. Kvalifikací modelu dochází k analytickému převedení reality do pojmového modelu, který abstraktně popisuje vztahy a vazby v reálném prostředí (systému). Pomocí programovacích technik verifikujeme model převodem jeho pojmové formy na počítačový model, jehož popis se skládá z programovacích jazyků a datových struktur. V posledním kroku využitím odhadu chování modelu (simulace), dokážeme provést validaci modelu, která by v ideální případě měla odrážet reálné prostředí (Zítek, 1990; Hušek & Lauber, 1987).

2. Modelování dopravy

Dopravní modelování je proces umožňující simulaci a analýzu dopravních toků v dopravním systému řadící se mezi mezi disciplínu dopravního inženýrství. Obecně se jedná se o vzájemně propojené oblasti, kde dopravní inženýrství lze vnímat jako rozsáhlý komplexní obor a dopravní modelování jako jeden z jeho nástrojů (Ortúzar a Willumsen, 2011). Účelem této kapitoly není zkoumat celkové spektrum dopravního inženýrství, nýbrž zaměřit se na jeho konkrétní oblast, a to na dopravní modelování.

2.1. Dopravní model

Pokud použijeme jednu z možných definic modelu uvedenou v kapitole 1. a termín "systém" nahradíme termínem "dopravní systém", mluvíme o dopravním modelu. Takový model slouží jako analytický nástroj pro systematické zobrazení vývoje dopravy na základě proměnných vstupních předpokladů. Popis dopravního chování obyvatel pomocí různých matematických funkcí umožňuje predikci budoucího stavu v závislosti na změnách a vývoji dopravy (Melzer a kol., 2017).

Každý dopravní model se skládá ze tří základních částí: (1) dopravní nabídka; (2) dopravní poptávka a (3) generalizované náklady. Za dopravní nabídku lze považovat dopravní síť obsahující dopravně inženýrské charakteristiky jednotlivých úseků, křižovatek a křižovatkových pohybů. Mezi takové charakteristiky se řadí například délka, rychlost, počet pruhů nebo kapacita úseků. Dopravní poptávka představuje v dopravním modelu tzv. matici přepravních vztahů[1] definující počet cest mezi dopravními zdroji a dopravními cíli. V rámci jednoho modelu se obvykle vyskytuje více matic přepravních vztahů, jelikož dopravu lze distribuovat podle skupin obyvatelstva a účelu cesty (např. cesty studentů do škol nebo cesty pracujících lidí do zaměstnání). Třetí částí jsou generalizované náklady (cost), kterým rozumíme jako nákladům cesty převedené na společnou jednotku času. Mezi všemi třemi základními částmi modelu přitom funguje vzájemná interakce.

[1] Matice přepravních vztahů, v překladu Origin Destination Matrix, je někdy zkráceně označována jako ODM, OD matrix, případně OD matice.

2.2. Klasifikace dopravních modelů

Klasifikace dopravních modelů může být prováděna z různých úhlů pohledu, což vede k existenci mnoha způsobů, jak je rozlišovat. Klíčovými faktory, které ovlivňují jejich klasifikaci, jsou účel a využití, za kterým jsou vytvořeny.

2.2.1. Klasifikace podle úrovně detailu

V rámci základního členění dopravních modelů dle úrovně popisu dopravních systémů jsou rozlišeny mikroskopické, makroskopické a mezoskopické.

Mikroskopické modely popisují dopravní systém a jeho interakce ve vysoké míře detailů. Tyto modely zkoumají chování jednotlivých vozidel a jejich vzájemné ovlivňování s ostatními vozidly v dopravním proudu a s dopravní infrastrukturou. Pod objektem zkoumání makroskopického dopravního modelu si lze představit například manévr změny jízdního pruhu, jehož dobu lze matematicky vypočítat (Transportation Research Board, 2015; Rathi, 1997; Melzer a kol., 2017).

Makroskopické modely se soustředí na popis dopravního systému na mnohem obecnější úrovni, kdy není zkoumáno jednotlivé vozidlo, ale dochází k určitému zjednodušení detailů. Provoz je v tomto případě brán jako kontinuální tok s agregovanými proměnnými jako jsou průměrná intenzita dopravy nebo průměrná rychlost. Makroskopické dopravní modely jsou dále děleny podle tříd, které zohledňují různé typy vozidel. Mohou se například zabývat pouze osobními vozidly, pouze nákladními vozidly, pouze hromadnou dopravou nebo kombinací těchto typů (Transportation Research Board, 2015; Rathi, 1997).

Mezoskopické modely vyplňují pomyslnou mezeru mezi dvěma uvedenými modely a jsou v podstatě kombinací těchto modelů. Mezoskopický dopravní model se zaměřuje na detailní popis jednotlivých vozidel podobně jako mikroskopický model, ale k popisu jejich aktivity a interakce využívá vlastností makroskopického modelu, jehož detaily jsou mnohem nižší (Transportation Research Board, 2015; Rathi, 1997).

Autoři Melzer a kol. (2017) však navíc uvádějí tzv. nanoskopické a hybridní modely. *Nanoskopické modely* jsou založeny na mikroskopických modelech. Kladou však větší důraz na detailnější specifikaci dalších parametrů modelu a umožňují tak podrobnější analýzu jízdního chování jednotlivých vozidel.

Hybridní modely kombinují různé techniky základních modelů. Jedním z možných způsobů je například použít vysokou úroveň detailu, která je specifická pro

mikroskopický model, pouze na zájmových místech v rámci makroskopického modelu. To umožňuje zachování přiměřené velikosti modelu společně se zvýšením jeho efektivity a možností optimálního výpočtu, a proto se tento typ modelu stává v současné době stále populárnějším.

2.2.2. Klasifikace podle počtu dopravní módů

Dopravní mód označuje konkrétní způsob přepravy osob z jednoho místa na druhé zahrnující různé typy dopravy. Každý dopravní mód má své specifické charakteristiky a může využívat odlišnou dopravní infrastrukturu.

Unimodální model se zaměřuje na analýzu dopravy v rámci jednoho konkrétního způsobu dopravy. V současné době jsou využívány zejména pro modelování silniční dopravy nebo veřejné hromadné dopravy. Tento typ modelu umožňuje simulaci dopravních intenzit na dané trase nebo síti tras, a to především v souvislosti se změnou směrováním dopravy. Jelikož unimodální modely nezahrnují rozhodovací algoritmus volby dopravního prostředku, mohou predikovat dopravní poptávku pouze omezeným způsobem (Melzer a kol., 2017).

Multimodální model slouží k porovnání více typů dopravy tak, aby zachytil změny dopravní poptávky v důsledku konkurence mezi nimi. K typickému příkladu patří modelování nákladní dopravy, která zahrnuje jak silniční, tak železniční nebo vodní dopravu. Podobným příkladem je také modelování dopravy města, kdy se lidé rozhodují mezi volbou dopravy automobilem, městskou hromadnou dopravou, chůzí nebo jízdou na kole. Porovnání jednotlivých módů probíhá na základě tzv. ukazatele generalizovaných nákladů cesty. V případě nákladní dopravy se může jednat například o dobu cesty, podléhavost zboží zkáze, cenu pohonných hmot nebo náklady související se skladováním (Melzer a kol., 2017).

2.2.3. Klasifikace podle časového hlediska

Časové hledisko, zejména způsob, jakým jsou zohledněny časové faktory a proměnné, hraje v rámci dopravních modelů významnou roli.

Statické modely se zaměřují na popis dopravy v daném okamžiku a nezahrnují tak změny modelu týkající se průběhu v čase, jako jsou vlivy způsobené dopravními nehodami, uzavírky apod. (Cascetta, 2009). Ve statistických modelech je dopravní tok modelován konzistentně v časovém rozpětí 24 hodin nebo špičkové hodině provozu. Zároveň jsou tyto typy modelů nepříliš vhodné pro predikci budoucího vývoje dopravy (Melzer a kol., 2017).

Dynamické modely představují alternativní přístup k časové analýze dopravy, která dokáže kompenzovat nedostatky statických modelů. Tyto modely umožňují sledovat vývoj dopravní situace v čase, což zahrnuje i dynamické změny během dne (Cascetta, 2009). Základní odlišnost dynamických a statických modelů spočívá ve využití tzv. hustoty dopravy jako vstupního parametru modelu, který odráží počet vozidel na 1 kilometr silnice. Díky tomu mají dynamické modely lepší schopnost simulovat dopravní provoz a poskytují spolehlivější predikce vývoje dopravy v budoucnu (Melzer a kol., 2017).

2.2.4. Klasifikace podle přístupu k modelování dopravní poptávky

Klasifikace podle přístupu k dopravní poptávce představuje různé způsoby, jak se přistupuje k odhadu a analýze poptávky v dopravě.

Trip-based přístup je založen na jednotlivých cestách (*trips*), které lidé v rámci dopravy podnikají. Tento typ přístupu se věnuje jednotlivým atributům cest, jako jsou zdroj a cíl cesty, délka cesty nebo způsob dopravy. Obecně platí vzájemná nezávislost mezi cestami z hlediska času a pořadí. Trip-based modely jsou aktuálně nejčastěji používané především kvůli dostupnosti dat (Institute of Transportation Engineers, 2016; Melzer a kol., 2017).

Tour-based přístup klade důraz na soubor cest (*tours*) mezi různými aktivitami. Tento přístup se vyznačuje tím, že bere v úvahu interakce mezi jednotlivými cestami v rámci jednoho souboru (nikoliv mezi soubory cest mezi sebou), což umožňuje analýzu celkového využití dopravní sítě a návyků jednotlivců (Institute of Transportation Engineers, 2016).

Oba tyto přístupy však mají svá omezení, neboť předpokládají, že poptávka po cestování je odvozena od poptávky po účasti na aktivitě. Zaměřují se na jednotlivé cesty/soubory cest (trips/tours) a ignorují prostorové a časové vztahy mezi všemi aktivitami a cestami, které jednotlivec během dne absolvoval. Tyto přístupy také přehlížejí kontext domácnosti a berou jednotlivce jako izolovaného rozhodovatele. Z toho důvodu byl zaveden *Active-based* přístup, který přináší nový způsob pohledu na problematiku dopravy, kdy se zaměřuje na jednotlivé aktivity, jako je práce, nákupy nebo volný čas a jejich prostorové a časové uspořádání. Obecně lze Active-based přístup shrnout do pěti důležitých vlastností (Chu a kol., 2012):

(1) Cestování je odvozeno od účasti na aktivitě;

(2) Active-based přístup se zaměřuje na sekvenci vzorců činností;

(3) Aktivity jednotlivce jsou plánovány a prováděny v kontextu s domácností (rodinou);

(4) Aktivity jsou rozloženy v časovém intervalu 24 hodin nepřetržitě, namísto toho, aby byly pouze kategorizovány jako "špičkové" a "mimo špičku";

(5) Cestování a volba míst jsou podmíněny časovými a prostorovými omezeními, jakož i individuálními omezeními jednotlivce.

Active-based přístup je dokonce částečně založen na sociologické Chapinově teorii[2] předpokládající, že poptávka po aktivitě je motivována základními lidskými touhami, jako jsou přežití, sociální setkávání, uspokojení ega, závazků, zdraví apod. Celkově lze říci, že Active-based přístup představuje komplexnější a realističtější pohled na problematiku dopravy, než poskytují přístupy Trip-based a Tour-based (Chu a kol., 2012).

2.3. Metodika tvorby čtyřstupňového makroskopického dopravního modelu

Vytvoření každého makroskopického dopravního modelu obvykle vyžaduje určité provedení posloupnosti kroků, které se mohou mírně lišit v závislosti na konkrétní literatuře nebo metodice. Podle autorů Melzer a kol. (2017) je tvorba modelu provázena 8 kroky:

(1) *Definice účelu dopravního modelu*

(2) *Parametry dopravního modelu*

(3) *Vstupní data*

(4) *Tvorba dopravního modelu*

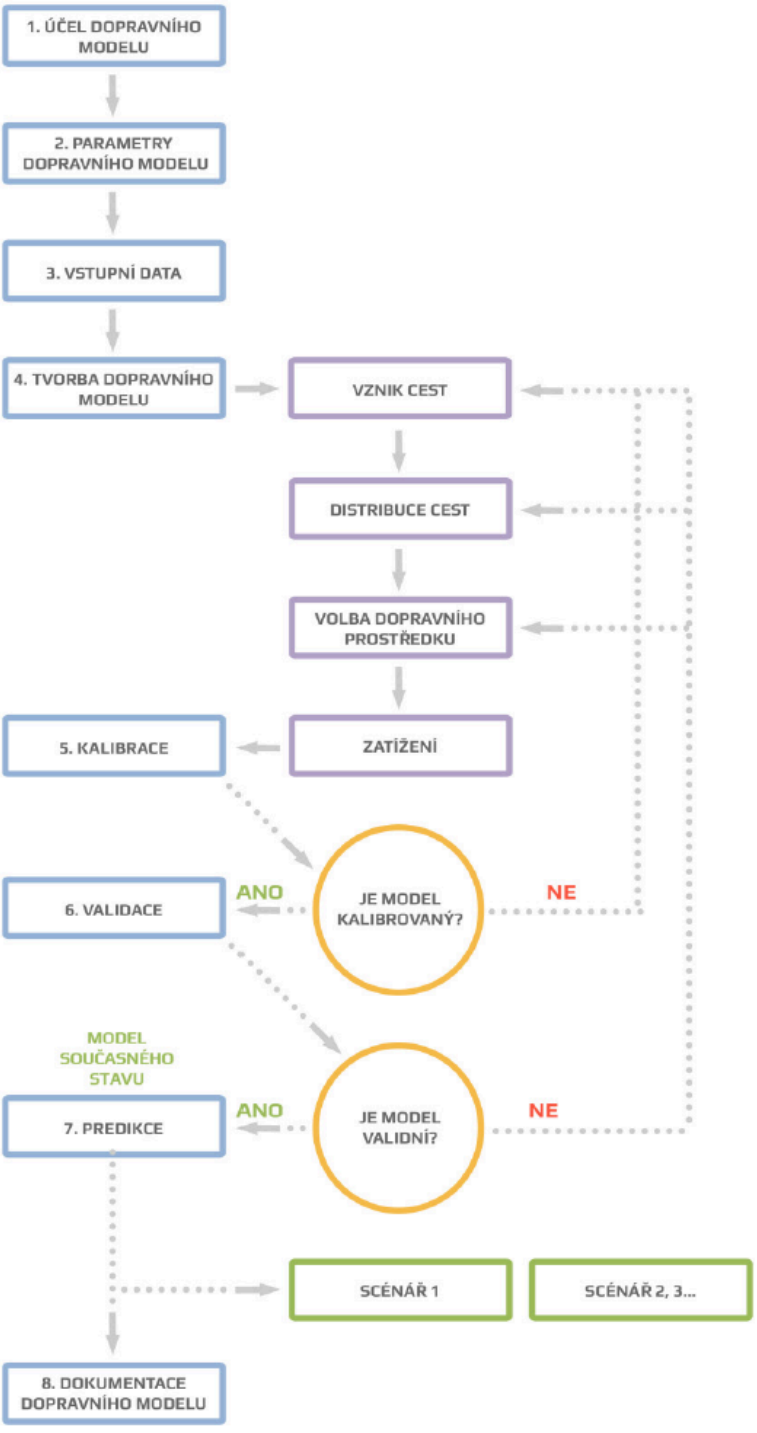
(5) *Kalibrace*

(6) *Validace*

(7) *Predikce*

[2] Chapinova teorie je sociologická teorie, která se zabývá vztahem mezi člověkem a prostředím.

(8) *Dokumentace dopravního modelu*



Obrázek 2: Postup při tvorbě dopravního modelu, převzato z (Melzer a kol., 2017)

2.3.1. Definice účelu dopravního modelu

Prvním krokem při tvorbě dopravního modelu je jasná specifikace toho, pro jaký účel je dopravní model vytvářen a čeho má dosáhnout. Účel modelu by měl vhodně reflektovat potřeby jeho budoucích uživatelů a stanovit konkrétní výstupy, které by

model měl generovat. Na základě těchto požadavků jsou definovány parametry modelu (viz oddíl 2.3.2.). K určení definice účelu dopravního modelu je vhodné provedení předběžné a důkladné analýzy (studie) identifikující klíčovou problematiku (Melzer a kol., 2017).

2.3.2. Parametry dopravního modelu

Stanovením účelu dopravního modelu je možné přejít k definici parametrů, kterými by měl disponovat. Mezi klíčové parametry se řadí rozsah modelovaného území, zonální struktura, modelované dopravní módy, segmentace modelované populace, časové období a výběr softwaru (Melzer a kol., 2017). V praxi může docházet k paralelnímu provedení tohoto kroku s krokem definice účelu dopravního modelu (viz oddíl 2.3.1).

Konkrétní parametry dopravního modelu tvořeného v rámci této závěrečné práce jsou představeny v podkapitole 3.1. Parametru zonální struktury je věnován samostatný oddíl 3.4.1.

Rozsah zájmového území

Jedním z důležitých parametrů dopravního modelu je rozsah zájmového území. To představuje geografické vymezení oblasti, ve které se předpokládá, že dochází k projevu významných změn v přepravních vztazích (Melzer a kol., 2017).

Zonální struktura

V kontextu dopravního modelování představují zóny popis reálného světa z hlediska využití území a umístění v dopravní síti. V makroskopických modelech se zonální struktura obvykle definuje pomocí administrativních celků, což umožňuje využití jejich socioekonomických dat. Stanovení zonální struktury by v ideálním případě mělo odpovídat úrovni detailu dopravního modelu. Zároveň musí být navržena tak, aby umožňovala přesnou analýzu dopravních toků v rámci modelovaného území. S tím souvisí tzv. granularita zonální struktury znázorněná na obrázku 3 (Melzer a kol., 2017; McNally, 2008).

MODEL S VÍCE ZÓNAMI (ZÓNY JSOU MENŠÍ)	MODEL S MÉNĚ ZÓNAMI (ZÓNY JSOU VĚTŠÍ)
Výstupy jsou více podrobné	Kratší čas při výpočtu
Zóny jsou jednotné z hlediska využití území	Menší citlivost při detailním pohledu na síť
Méně intra-zonálních cest	Objem vstupních dat je pro každou zónu větší, je tedy statisticky více robustní
Je jednodušší zajistit, aby zónou neprocházela řeka či železnice	Jednodušší získání demografických dat
	Je snadnější získat empirická data (ze směrových dopravních průzkumů)

Obrázek 3: Granularita zonální struktury, převzato (Melzer a kol., 2017)

Dopravní módy

Dalším parametrem dopravního modelu je diverzita zahrnutých dopravních módů, která přímo ovlivňuje rozsah a detailnost modelované dopravní sítě. Pro podrobné zonální struktury je nezbytné, aby hustota a detailnost sítě odpovídaly úrovní zonální detailnosti. Dopravní síť by přitom měla být složena z infrastruktury všech vybraných módů dopravy pro daný model (například individuální automobilová doprava, veřejná hromadná doprava, nákladní doprava, cyklistická a pěší), což umožňuje realističtější reprezentaci chování dopravních toků (Melzer a kol., 2017; Rathi, 1997).

Segmentace modelované populace

Segmentaci modelované populace rozumíme rozdělení obyvatel do různých skupin podle jejich dopravního chování. Nejčastější segmentace obyvatelstva zahrnuje rozdělení dle příjmů, počtu vlastněných dopravních prostředků, účelu cest, volby dopravního prostředku nebo ekonomické aktivity. Je proto zřejmé, že segmentace je limitována dostupnými zdroji dat o obyvatelstvu. Některé z nich je možné získat pouze z průzkumů dopravní poptávky prováděných formou výběrového šetření, které doplňují chybějící informace o charakteristikách obyvatelstva z hlediska dopravního chování. Některé dopravní modely nepracují se segmentací populace a jsou označovány jako modely zjednodušené (Melzer a kol., 2017).

Časové období

Existence proměnlivosti dopravy v průběhu celého roku, týdne i dne vyžaduje určité zjednodušení modelování v podobě agregace výstupů modelu do standardních časových úseků, obvykle průměrný den v roce reprezentovaný jako roční průměr denních intenzit (RPDI). Využití RPDI má i praktický význam ve srovnání s daty celostátního

sčítání dopravy (CSD), ve kterém rovněž dochází k přepočtu na tento normovaný ukazatel (Melzer a kol., 2017).

Přetížené dopravní sítě jsou specifické pro velká města, kde často dochází k překračování jejich kapacit. Z toho důvodu je vhodnější modelovat dopravní špičky, které lépe odráží realitu kapacitních omezení, než 24 hodinové dopravní intenzity. Model dopravní špičky se v těchto případech stává přesnější, jelikož lépe vystihuje chování dopravního proudu (Melzer a kol., 2017).

Výběr softwaru

Posledním parametrem modelu je volba konkrétního softwarového řešení, které bude použito pro tvorbu dopravního modelu (Melzer a kol., 2017).

2.3.3. Vstupní data

Před zahájením realizace dopravního modelu je nezbytné zajistit adekvátní sběr a přípravu vstupních dat, na kterých závisí kvalita celého modelu. Parametry modelu v předchozím kroku určují, jaká data jsou potřebná. Vyhledání vhodných dat a jejich zpracování představují z časového hlediska nejnáročnější část celého procesu tvorby dopravního modelu. Dle Melzer a kol. (2017) základní datové vstupy čtyřstupňového dopravního modelu obvykle zahrnují:

- data o dopravní síti (silniční síť, železniční, síť, pěší a cyklistická síť, jízdní řády a trasy linek veřejné dopravy)
- data o využití území (vlastnosti zástavby v území z hlediska atraktivity návštěvnosti)
- demografická a socioekonomická data (počet obyvatel, ekonomická aktivita, stupeň automobilizace a motorizace atd.)
- sčítání dopravy a cestujících a jiné dopravně-inženýrské průzkumy (směrové průzkumy, sčítání ve veřejné dopravě, sčítání dopravy v klidu, průzkumy kvality dopravy – cestovní časy, rychlost vozidel apod.)
- data o dopravním chování obyvatelstva (informace o cestách, tedy kam, kdy a za jakým účelem lidé cestují)
- data o nákladní dopravě (zdroje a cíle cest nákladní dopravy, přepravní vztahy v nákladní dopravě)
- data pro konstrukci predikce (data o socioekonomických a demografických poměrech ve společnosti, data o ekonomicko-politických poměrech a data o poměrech v dopravních systémech v určitém scénáři vývoje)

Praktická realizace vyhledání a zpracování vstupních dat je popsána zejména v podkapitole 3.4. Data týkající se kalibrace a validace jsou popsána v oddílech 3.6.1. a 3.7.1.

2.3.4. Tvorba dopravního modelu

Princip čtyřstupňového dopravního modelu (z angl. *Four-step traffic model*) je jednou z nejrozšířenějších metod dopravního modelování, která se skládá ze čtyř po sobě jdoucích kroků viz fialově orámované kroky na obrázku 2 (Melzer a kol., 2017; Institute of Transportation Engineers, 2016; McNally, 2008):

(1) *Trip Generation*

(2) *Trip Distribution*

(3) *Mode Choice*

(4) *Traffic Assignment*

Trip Generation

Trip generation (vznik cest) je první fází čtyřstupňového dopravního modelu, ve které dochází k určení zdrojových a cílových dopravních proudů. Cílem je určit co nejpřesnější odhad celkového počtu cest každé zóny, která představuje produkci dopravní poptávky v určitém území. Určování probíhá na základě dopravních průzkumů, často založených na teoretickém modelu, s využitím různých socioekonomických a demografických proměnných, mezi které patří například velikost domácnosti, vlastnictví a dostupnost automobilu, ale i faktory jako hustota osídlení nebo vzdálenost od centra města (Melzer a kol., 2017; Institute of Transportation Engineers, 2016; McNally 2008).

Trip Distribution

Trip Distribution (distribuce cest) je druhým krok v čtyřstupňovém dopravním modelu, který zahrnuje rozdělování cest generovaných v prvním kroku (*Trip Generation*) ke konkrétním zdrojům a cílům dopravy v rámci studované oblasti. Tento proces spočívá v použití vstupních dat získaných z předchozího kroku (cest) k odhadu toho, kde cesty z prostorového hlediska končí. Hlavními parametry ovlivňující rozdělení cest, jsou atraktivita zón a generalizované náklady cest. Atraktivitě zón rozumíme jako počtu cest končících v dané zóně, které mohou záviset například na počtu pracovních míst či počtech zákazníků v obchodech a nákupních centrech. Tento parametr lze

považovat za indikátor toho, jak moc je daná zóna schopna přitahovat cestující z jiných oblastí. Generalizované náklady představují celkové náklady spojené s vykonáním cesty, nejčastěji vyjádřené v podobě cestovního času nebo vzdálenosti. Z hlediska těchto parametrů vyplývá, že atraktivita zón je přímo úměrná jejich vzájemné vzdálenosti v případě, že atraktivita pro danou aktivitu je mezi těmito zónami srovnatelná. V praxi to znamená, že cestující upřednostňují kratší a rychlejší cesty, v případě, že jejich cílová oblast je podobně atraktivní jako vzdálenější alternativy (Melzer a kol., 2017; McNally, 2008).

Proces distribuce cest zároveň provází tvorba matice přepravních vztahů (OD matice), k jejímuž výpočtu lze využít metod růstového faktoru nebo gravitačních metod (příp. metod přitažlivosti). Metody růstového faktoru spočívají v aplikaci koeficientů růstu, aby odhadly budoucí přepravní vzorce způsobené růstem populace, ekonomiky nebo změnami v infrastrukturním rozvoji. Jedná se však o velmi zjednodušený přístup. Daleko sofistikovanějšími jsou metody gravitační vycházející z principu, že počet cest mezi dvěma zónami závisí na jejich atraktivitě a je nepřímo úměrný vzdálenosti mezi nimi. Tedy čím atraktivnější a blíže k sobě zóny jsou, tím větší je mezi nimi dopravní tok. Kromě vzdálenosti se berou v úvahu i další faktory, jako cestovní čas nebo cena dopravy. Parametry pro tyto výpočty se stanovují pro různé demografické a sociální skupiny, v závislosti na důvodech cesty, počtu lidí v zónách a jejich atraktivitě (Melzer a kol., 2017, McNally, 2008).

Mode Choice

V případě komplexnějších dopravních modelů uvažujících vícero dopravních módů je nezbytné přistoupit ke kroku *Mode Choice* (volba dopravního prostředku). Tento krok se snaží reflektovat chování přepravovaných osob na základě jejich preference dopravního prostředku, která je odhadována pravděpodobnostní funkcí. Typicky se jedná o rozdělení cestujících, kteří vykonávají cestu osobním automobilem, veřejnou hromadnou dopravou, na kole, pěšky nebo jiným dopravním prostředkem. Výsledkem tohoto kroku jsou vypočítané OD matice jednotlivých uvažovaných dopravních módů (Melzer a kol., 2017; McNally, 2008).

Traffic Assignment

Čtvrtým a posledním krokem čtyřstupňového dopravního modelu je *Traffic Assignment* (zatížení dopravní sítě), ve kterém dochází k aplikaci metod přiřazení přepravních vztahů na síť na OD matice získaných na základě provedení předchozích kroků *Trip Generation*, *Trip Distribution* a *Mode Choice*. Metod k přístupu zatěžování

dopravní sítě existuje hned několik[3]. Patří mezi ně například přírůstkové zatížení sítě (*Incremental Assignment*), rovnovážné zatížení sítě (*Equilibrium Assignment*), metoda ICA (*Impedance Calculation*) kladoucí důraz na modelování křižovatek nebo metoda TRIBUT využívající se při modelování mýtného systému (Melzer a kol. 2017).

Nejčastějším řešením problematiky *Traffic Assignment* je tzv. rovnovážné zatížení sítě (*Equilibrium Assignment* nebo *User Equilibrium*), který je založen na Wardropově prvním principu. Tento princip uvádí: „*Každý účastník silničního provozu volí svou trasu tak, že cestovní doba na všech alternativních trasách je stejná a přechodem na jinou trasu by se zvýšila osobní cestovní doba.*“ Z tohoto konceptu vyplývá, že pro každý pár výchozího a cílového místa bude optimální cesta charakterizována stejnou minimální dobou cestování. V případě existence rychlejší alternativy dochází k migraci účastníků na tuto trasu, až do bodu, kdy se zvýší doba jízdy kvůli zvýšenému provozu a dosáhne doby ostatních tras. Tento samovyrovnávací mechanismus zajišťuje, že rozložení provozu v síti dosáhne stavu rovnováhy, kdy jsou jízdní doby vyvážené na všech používaných trasách. Časová náročnost výpočtu je přitom odvozena od poměru intenzita/kapacita v dopravní síti (Melzer a kol. 2017; Correa a Stier-Moses, 2010).

Shrnutí

Celý proces principu čtyřstupňového dopravního modelu zahrnující provedení kroků *Trip Generation*, *Trip Distribution*, *Mode Choice* a *Traffic Assignment* lze shrnout jako odpovědi na klíčové otázky “*Vykonám cestu?*”, “*Kam Budu cestovat?*”, “*Čím budu cestovat?*” a “*Kudy pojedu?*” (Melzer a kol., (2017).

Praktická realizace kroku *Trip Generation* je popsána v oddíle 3.4.1., s dalšími úpravami uvedenými v oddíle 3.5.2. Krok *Trip Distribution* je nastíněn v oddíle 3.4.5. (Výpočet OD matice). Třetí krok *Mode Choice* je vysvětlen v podkapitole 3.1. A nakonec krok *Traffic Assignment* ,který je obsažen v oddíle 3.4.5. (Přiřazení OD matice na síť).

2.3.5. Kalibrace

Dopravní modely jsou obecně tvořeny za určitých základních předpokladů, matematických funkcí a dostupných vstupních dat. Přestože je každý takový model po svém dokončení co nejlepší věrohodnou reprezentací skutečných dopravních podmínek, nemůže nikdy dosáhnout úplně přesné reprezentace reality. To je dáno diverzitou každého modelovaného území a neustálou proměnlivostí dopravních podmínek. Z toho

[3] Vzhledem k parametrům vytvářeného dopravního modelu jsou představeny pouze metody týkající se silniční sítě.

důvodu je nezbytné model podrobit procesu zvaným kalibrace. Tento proces zahrnuje dva dílčí kroky – ověření (verifikaci) postupů a samotná kalibrace, která má za úkol model upravit tak, aby co nejpřesněji reflektoval reálný stav (Melzer a kol., 2017).

Verifikace představuje krok, při kterém je pečlivě kontrolováno a ověřováno zda nastavení modelu odpovídá očekáváním. Tento krok může zahrnovat prověření možných softwarových chyb, ověření správnosti vstupních dat a vizuální kontrolu modelu. Z toho důvodu je verifikace klíčovým krokem pro odstraněná potenciálních problémů, které by mohly vzniknout během procesu kalibrace (Centrum dopravního výzkumu, 2017; Rathi, 1997)). Dle Melzer a kol. (2017) je doporučeno podrobit model takzvanému otestování citlivosti modelu, které má za úkol odhalit, jakým způsobem se model chová v případě změny vstupních parametrů.

Kalibrace je zásadní proces, ve kterém dochází k úpravě jednotlivých parametrů modelu tak, aby se chování dopravního modelu co nejvíce podobalo skutečnému chování dopravy v dopravní síti. Dopravní modely zahrnují mnoho parametrů a nastavení, a proto kalibrace vyžaduje několik specifických kroků, jako je výběr spolehlivých výchozích parametrů, omezení počtu parametrů pro zpracování, upřednostnění globálních parametrů mající vliv na model jako celek, a následná kalibrace specifických parametrů ovlivňující například konkrétní úsek. Modely jsou tvořeny s konkrétními cíli a jsou navrženy tak, aby odpovídaly svým účelům, což se odráží v jejich struktuře a úrovni detailů. Avšak není možné, aby jeden model kompletně zahrnoval všechny proměnné nebo sledované aspekty, jelikož detailnost modelu může omezit jeho schopnost přesně mapovat všechny ukazatele. Tyto nejistoty v modelu mohou pramenit z různých zdrojů, jako jsou měřicí chyby, nepřesné informace, nesprávné použití dat, statistické odchylky, výpočetní nepřesnosti, chybná definice modelu nebo chyby v algoritmech a ve zpracování dat. Tyto faktory mohou vést k chybám v modelu, což zdůrazňuje důležitost provádění kalibrace a následné validace, aby bylo zajištěno, že model co nejvěrněji odráží realitu. Na závěr je nutné zdůraznit, že při kalibraci dochází k porovnání odpovídajících hodnot z modelu s hodnotami zaznamenanými v realitě. Pro tyto účely je vhodné použít například intenzity dopravy z modelu ve srovnání s daty z dopravních průzkumů (Melzer a kol., 2017; Rathi, 1997).

Za krok verifikace dopravního modelu můžeme částečně označit praktickou část v podkapitole 3.5. Samotné kalibraci je poté věnována podkapitola 3.6.

2.3.6. Validace

Validace je často zaměňována s kalibrací dopravního modelu, jelikož oba procesy zahrnují porovnání modelovaných výsledků s měřenými daty. Zatímco kalibrace se snaží

model upravit tak, aby odpovídal kalibračním datům, hlavním cílem validace je ověřit, zda model skutečně reprezentuje modelovaný dopravní systém, a nejen že reprodukuje data použitá pro kalibraci. Z toho důvodu je nezbytné, aby pro validaci byla použita data nezávislá na těch kalibračních. Z určitého úhlu pohledu se jedná o finální test správnosti modelu, jehož výsledkem je kritérium kvality modelu z hlediska schopnosti simulovat skutečné dopravní poměry (Melzer a kol. 2017).

Praktická realizace toho bodu je uvedena v podkapitole 3.7.

2.3.7. Predikce

Dokončením kroků kalibrace a validace, pokud dopravní model vykazuje spolehlivé výsledky, je možné přejít ke kroku predikce. Ta zahrnuje úpravy vstupních dat parametrů modelu tak, aby bylo možné simulovat různé hypotetické scénáře budoucí dopravní poptávky. Cílem predikce je identifikovat potenciální problémy, které by mohly vzniknout v dopravním systému, nebo posoudit možné dopady navrhovaných dopravních projektů či politik před tím než budou implementovány. Toto prediktivní hodnocení využívá analýzu současně dostupných dat z reálného provozu a spoléhá se na odhady a modelované simulace, neboť data budoucího stavu ještě neexistují (Melzer a kol., 2017).

Tento krok nebyl v rámci závěrečné práce realizován.

2.3.8. Dokumentace dopravního modelu

Každý vypracovaný dopravní model by měl být podložen komplexní dokumentací popisující podrobný postup výše specifikovaných kroků, na základě kterých byl model vytvořen.

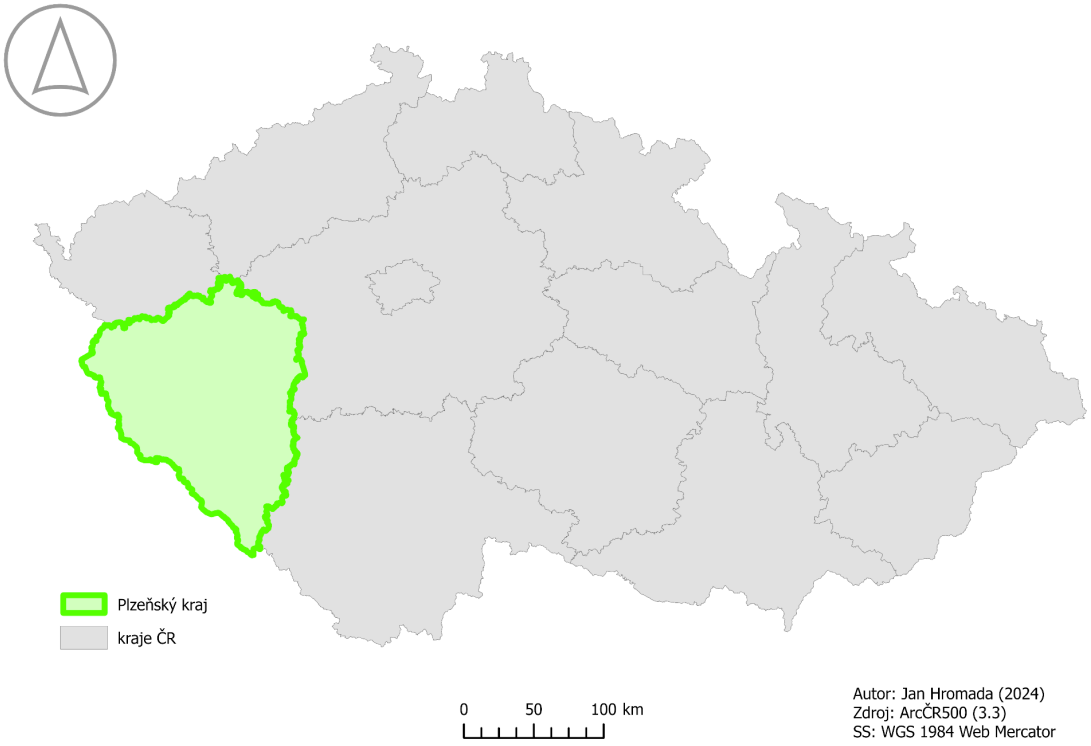
Za praktické provedení tohoto kroku lze považovat samotnou závěrečnou práci, zejména její praktickou část (viz kapitola 3).

3. Dopravní model zájmového území

Tato kapitola se věnuje praktické části závěrečné práce, která spočívá ve vytvoření dopravního modelu, jeho kalibraci a následné validaci. Postup vychází z metodiky čtyřstupňové tvorby dopravního modelu, která je popsána v oddíle 2.3.4.

3.1. Parametry dopravního modelu

Pro účely vytvoření dopravního modelu v softwaru TraMod bylo zvoleno zájmové území Plzeňského kraje. Vedle předem stanoveného cíle, kterým je porovnání výsledného modelu s reálnými daty (validace), se naskytla příležitost porovnání s existujícím dopravním modelem Plzeňského kraje datovaným k roku 2016, poskytnutým společností EDIP s.r.o., specializující se na oblast dopravního inženýrství (viz https://www.edip.cz/). Této možnosti bylo v závěrečné práci využito, a proto je vytvářený dopravní model rovněž vztahován k roku 2016, aby došlo k co největší míře podobnosti obou dopravních modelů co se časového hlediska týče, a bylo možné je vzájemně porovnat.



Obrázek 4: Zájmové území

Dle podkapitoly 2.2., která se zabývá klasifikací dopravních modelů, je patrné, že existuje celá řada dopravních modelů, které je možné vytvořit. Výběr vytvářeného dopravního modelu částečně vychází z principů čtyřstupňového dopravního modelování popsaného v oddílu 2.3.4., které jsou typické pro makroskopické dopravní modely (Akademie městské mobility, 2024).

V této závěrečné práce byl vzhledem k rozsahu zájmového území zvolen *makroskopický* dopravní model zabývající se pouze silniční dopravou bez ohledu na kategorii dopravního vozidla, tedy *unimodální*. Z časového hlediska se jedná o model *statický*, který uvažuje intenzitu dopravy za 24 hodin. Vzhledem k tomu, že stávající implementaci softwaru TraMod, který byl v rámci této závěrečné práce využit pro modelování dopravy (viz oddíl 3.2.4), uvažuje dopravní poptávku na úrovni jednotlivých cest, a proto bylo nezbytné zvoli *Trip-based* přístup.

3.2. Specifikace využitého softwaru

Proces vytvoření dopravního modelu se neobešel bez využití klíčových softwarů a softwarových nástrojů, pomocí kterých došlo k efektivnímu zpracování dat, včetně jejich editace, vizualizace, analýzy a dalších operací.

3.2.1. ArcGIS Pro

ArcGIS Pro je desktopový software vyvinutý americkou společností Esri. Jedná se o geografický informační systém (GIS) umožňující uživateli vytvářet, editovat, analyzovat, vizualizovat a ukládat geografická data. Jeho využití je možné nalézt v celé řadě oborů. ArcGIS Pro však disponuje značnou nevýhodou, a sice, že se jedná o *closed-source*[4] software. Jinými slovy, společnost Esri poskytuje tento software jako placenou službu prostřednictvím licenčních podmínek (Esri, 2024a). Proto bylo využito školní licence tohoto softwaru, která je dostupná pro studenty KGM FAV ZČU zdarma.

Na základě dlouhodobých zkušeností autora této závěrečné práce s ArcGIS Pro došlo k upřednostnění tohoto softwaru před alternativními geografickými informačními systémy, přičemž byla použita verze ArcGIS Pro 3.0.3.

3.2.2. ArcGIS Notebooks

Jednou ze součástí softwaru ArcGIS Pro jsou tzv. ArcGIS Notebooks. Jedná se o komponentu, která je postavena nad *open-source*[5] webovou aplikací Jupyter

[4] Pojem closed-source představuje software, který není volně dostupný.

[5] Výraz open-source naproti tomu označuje volně dostupný software.

Notebooks, umožňující automatizaci nativních geoprocesingových nástrojů za využití programovacího jazyka Python. Velká výhoda je spatřena v možnosti snadné tvorby a dokumentace skriptů bez potřeby použití dalšího softwaru, jelikož ArcGIS Notebooks jsou integrovány přímo v desktopovém softwaru ArcGIS Pro (Esri, 2024b).

3.2.3. PostgreSQL

PostgreSQL je *open-source* objektově-relační databázový systém umožňující snadné ukládání a manipulaci s daty. Pro řízení databáze se využívá správcovského nástroje pgAdmin 4 umožňující přístup k databázi pomocí grafického uživatelského nástroje (GUI) (PostgreSQL, 2024).

S ohledem na již existující integraci softwarového řešení TraMod na databázový systém PostgreSQL by jakákoliv jiná alternativa databázového systému postrádala smysl. Využita byla verze PostgreSQL 15 a nástroj pgAdmin 4 o verzi 6.15.

3.2.4. TraMod

TraMod, úplným názvem Traffic Modeller, je softwarovým nástrojem dopravního modelování, který vznikl ve spolupráci s dopravními inženýry, IT specialisty a specialisty na GIS. Tento nástroj může být implementován v serverovém prostředí s aplikačním programových rozhraním (API) pro mobilní a webové aplikace, což umožňuje nejen samotnou tvorbu dopravních modelů, ale zejména testování různých dopravních scénářů běžnými uživateli, aniž by bylo nutné používat desktopový software (Traffic Modeller, 2024). Řešení softwaru TraMod ve webové aplikaci například využívá město Plzeň, jakožto nástroj pro systematického plánování dopravních uzavírek ve městě (dostupný na https://intenzitadopravy.plzen.eu/).

Pro účely této závěrečné práce bylo poskytnuto lokální řešení softwaru TraMod o verzi 2.0 včetně přístupu k výpočetnímu API.

3.2.5. OSM2TraMod

OSM2TraMod je tzv. ETL[6] nástroj, který umožňuje automatický převod vybraných volně dostupných dat OpenStreetMap (OSM) do datové struktury TraMod. Nástroj byl vyvinut ve spolupráci se ZČU a jeho detailní popis je možné nalézt v závěrečné práci Jakuba Vaňka (2022).

[6] ETL je zkratka z anglického Extract, Transform and Load. Jedná se o proces zajištění konzistence dat při jejich integraci a přesunu z různých zdrojů do cílového úložiště.

3.3. Datová struktura TraMod

Než bude možné přistoupit k tvorbě samotného dopravního modelu, je třeba představit datovou strukturu TraMod, která ve vstupních datech a jejich následném zpracování hraje významnou roli. Tato datová struktura dostupná z https://gitlab.com/tramod/tramod-data-model se skládá z několika databázových tabulek, mezi které patří:

- Tabulka *Edge* (hrana) obsahuje linie reprezentující silniční úseky. Záznam v tabulce odpovídá silničnímu úseku jednoho směru. V případě, že se jedná o obousměrný úsek, existuje k němu geometricky identický úsek s odlišným identifikátorem *edge_id* a obráceným pořadí identifikátoru počátečního (*source*) a koncového (*target*) bodu úseku tzv. uzlů (*Node*). Je tedy patrné, že v takovém případě, jsou uzly, respektive jejich identifikátory, sdíleny v obou záznamech tabulky *Edge*. Ve výjimečných případech obousměrných úseků, jako například úseky dálnic, nedochází ke geometrickému sdílení úseků.

Tabulka 1: Popis struktury tabulky *Edge*

Název	Datový typ	Popis	Reference
edge_id	serial	unikátní identifikátor hrany	primární klíč
source	int	počáteční uzel hrany	cizí klíč odkazující na *Node* (*node_id*)
target	int	koncový uzel hrany	cizí klíč odkazující na *Node* (*node_id*)
capacity	real	maximální únosnost vozidel hrany	
cost	real	náklady na průjezd hranou (v daném směru) v hodinách	
isvalid	boolean	True: úsek je uvažován ve výpočtu False: úsek není uvažován ve výpočtu	
turn_restriction	text	zákaz odbočení	
speed	real	maximální rychlost [km/h]	
road_type	int	typ hrany dle OSM	
geometry	geometry (LineString, 4326)	LineString geometrie v souřadnicovém systém WGS84 (EPSG: 4326)	

- Tabulka *Node* (uzel) představuje počáteční respektive koncový bod silničního úseku s geometrickým charakterem.

Tabulka 2: Popis struktury tabulky *Node*

Název	Datový typ	Popis	Reference
node_id	int	unikátní identifikátor uzlu	primární klíč
geometry	geometry (Point, 4326)	Point geometrie v souřadnicovém systém WGS84 (EPSG: 4326)	

- Tabulka *Zone* (zóna) reprezentuje bodové prvky představující generátory dopravy. Uvádí se, že software TraMod umožňuje pracovat se zónami v podobě polygonových prvků. V obou případech je patrné, že se jedná o tabulku obsahující geometrie jednotlivých prvků.

Tabulka 3: Popis struktury tabulky *Zone*

Název	Datový typ	Popis	Reference
zone_id	int	unikátní identifikátor zóny	primární klíč
node_id	int	unikátní identifikátor nejbližšího uzlu	cizí klíč odkazující na *Node*
trips	real	celkový počet cest	
incoming_trips	int	počet cest do zóny	
outgoing_trips	int	počet cest ze zóny	
geometry	geometry (Point, 4326)	Point geometrie v souřadnicovém systém WGS84 (EPSG: 4326)	

- Tabulka *Turn_restriction* předtavuje novější a vylepšené řešení zákazů odbočení. Předchozí způsob reprezentace těchto omezení byl zachycen v tabulce *Edge*. Nicméně kvůli zpětné kompatibilitě musel být atribut *turn_restriction* v tabulce ponechán.

Tabulka 4: Popis struktury tabulky *Turn_restriction*

Název	Datový typ	Popis	Reference
node_id	int	unikátní identifikátor uzlu	primární klíč; cizí klíč odkazující na *Node*
from_edge_id	int	úsek, ze kterého platí zákaz odbočení	cizí klíč odkazující na *Edge*
to_edge_id	int	úsek, do kterého je zákaz odbočení	primární klíč; cizí klíč odkazující na *Edge*
cost	real	náklady na průjezd křižovatkou (v daném směru) v hodinách hodnota -1: zakázané odbočení	

- Tabulka *ODM* reflektuje počet cest mezi jednotlivými zónami v dopravní síti. V matematickém smyslu si lze takovou tabulku představit jako matici o rozměrech $n \times n$, kde n představuje počet zón. Každý prvek této matice odpovídá počtu cest mezi určitými páry zón, přičemž řádky značí zóny zdroje a sloupce zóny cíle. Například hodnota na pozici $[i, j]$ v tabulce *ODM* udává počet cest ze zóny i do zóny j.

Tabulka 5: Popis struktury tabulky *ODM*

Název	Datový typ	Popis	Reference
source	int	počet cest do zóny	primární klíč; cizí klíč odkazující na *Zone* (*zone_id*)
source_node	int	unikátní identifikátor uzlu odpovídající zóně generující dopravu	cizí klíč odkazující na *Node* (*node_id*)
target	int	počet cest ze zóny	primární klíč; cizí klíč odkazující na *Zone* (*zone_id*)
target_node	int	unikátní identifikátor uzlu odpovídající zóně, do které proudí doprava	
flow	real	hodnota z OD matice	
matrix_id	int	vazba na tabulku *ODM* prostřednictvím tabulky *Matrix*	primární klíč; cizí klíč odkazující na *Matrix*

- Tabulka *Matrix* slouží jako seznam OD matic, kdy jeden záznam představuje právě jednu matici. Tím umožňuje snadnější manipulaci a organizaci pro další zpracování v případě, že dopravní model uvažuje více OD matic.

Tabulka 6: Popis struktury tabulky *Matrix*

Název	Datový typ	Popis	Reference
matrix_id	int	unikátní identifikátor matice	primární klíč
name	string	název matice	
description	string	popis matice	
is_default	boolean	definice, zda se jedná o výchozí matici	
valid_from	timestamp	platnost od	
valid_to	timestamp	platnost do	
dataset_id	int	vazba na dataset, kterým je matice kalibrována	cizí klíč odkazující na *Dataset*

- Tabulka *Measured_flow* nese kalibrační význam. Konkrétně se jedná o propojení s tabulkou *Edge* a jde tedy o hrany, na kterých proběhlo reálné měření dopravního provozu, a díky nimž je možné přistoupit ke kalibraci modelu.

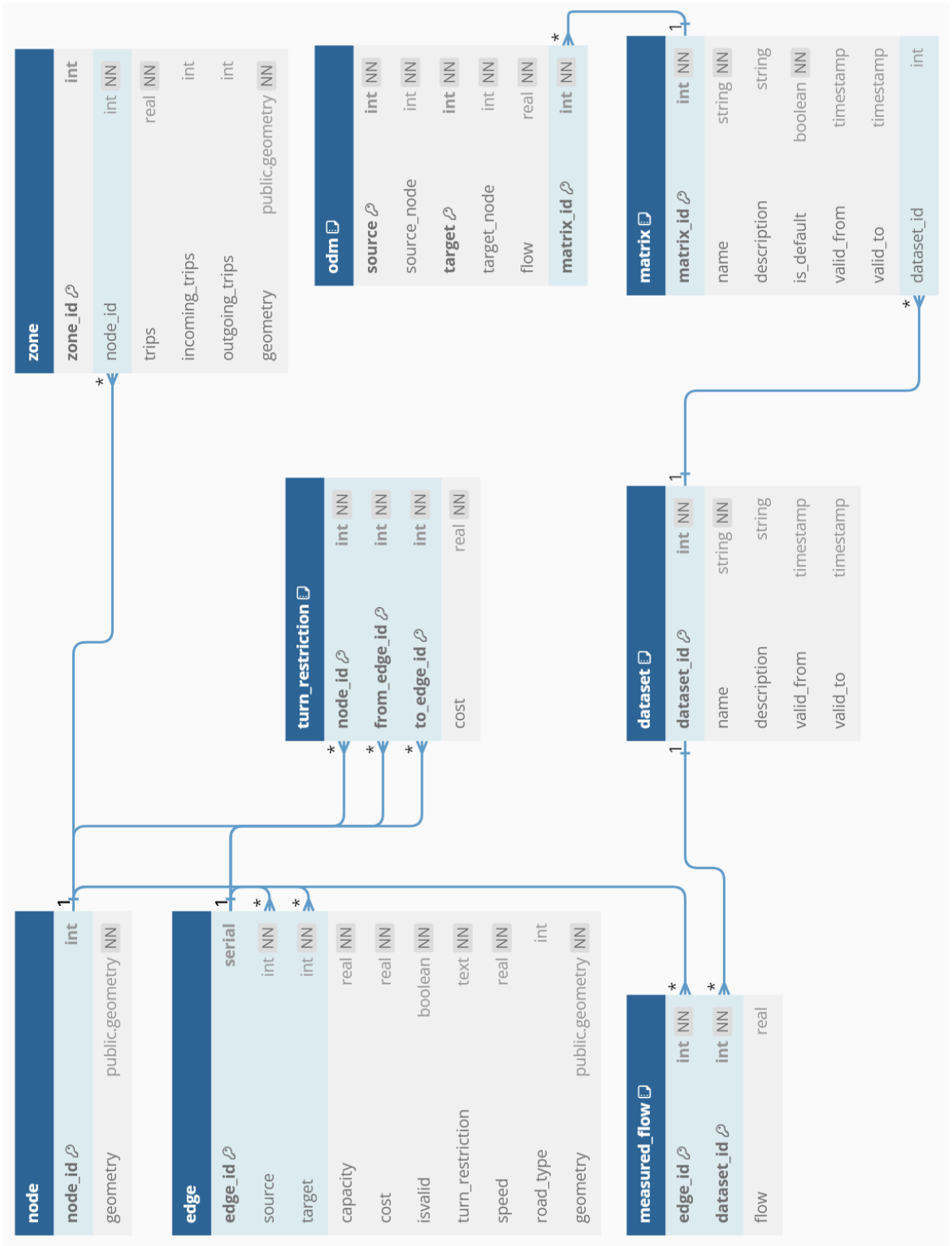
Tabulka 7: Popis struktury tabulky *Measured_flow*

Název	Datový typ	Popis	Reference
dataset_id	int	unikátní identifikátor datasetu	primární klíč; cizí klíč odkazující na *Dataset*
edge_id	int	vazba na tabulku *Edge*	primární klíč; cizí klíč odkazující na *Edge*
flow	real	měřený provoz na hraně	

- Tabulka *Dataset* plní obdobnou funkci jako tabulka *Matrix*, v tomto případě se ale jedná o seznam datasetů odkazujících se na tabulku *Measured_flow*. To fakticky umožňuje selekci hran s informací o reálném provozu, se kterými lze provádět kalibrační proces v rámci jednoho dopravního modelu.

Tabulka 8: Popis struktury tabulky *Dataset*

Název	Datový typ	Popis	Reference
dataset_id	int	unikátní identifikátor datasetu	primární klíč
name	string	název datasetu	
description	string	popis datasetu	
valid_from	timestamp	platnost od	
valid_to	timestamp	platnost do	



Obrázek 5: Databázové schéma TraMod

3.4. Tvorba dopravního modelu

Proces tvorby dopravního modelu zahrnuje vyhledání relevantních datových zdrojů nezbytných pro jeho vytvoření. Získaná vstupní data musí být následně upravena a převedena do datové struktury TraMod popsané v podkapitole 3.3. Vzhledem k tomu, že kvalita vstupních dat má přímý vliv na vytvoření spolehlivého dopravního modelu, byla této části věnována značná pozornost.

3.4.1. Příprava generátorů dopravy

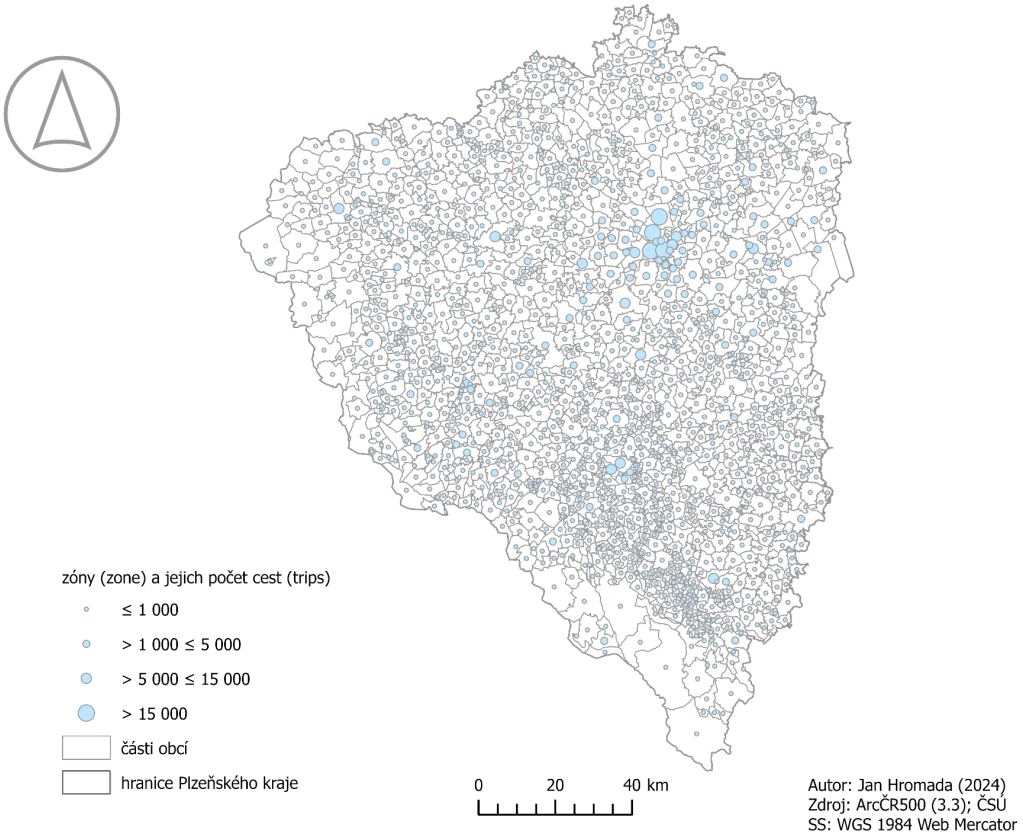
Mezi důležitý zdroj dat pro vytvoření dopravního modelu patří generátory dopravy. Jedná se o místa (oblasti) reálného světa, ve kterých dopravní nabídka vzniká a do kterých směřuje. Zpravidla jde o území administrativních jednotek, kvůli dostupnosti různých socioekonomických údajů, které je možné v rámci tvorby generátorů dopravy využít. V některých zdrojích (Melzer a kol., 2017), včetně softwaru TraMod, se generátory dopravy nazývají zónami (*Zone*) a jsou nejčastěji reprezentovány bodovými prvky.

V našem případě představují zóny části obcí, které byly převzaty z geodatabáze ArcČR500 z roku 2016 (verze 3.3) (ARCDATA PRAHA, 2024) v podobě vrstvy polygonů v rozsahu území ČR a následně přidány do softwaru ArcGIS Pro. Zde došlo pomocí nástroje *Clip* společně se selekcí podle atributů k jejich oříznutí na části obcí Plzeňského kraje. Kvůli datové struktuře tabulky *Zone* byly polygony převedeny na centroidy částí obcí nástrojem *Feature to Point* o celkovém počtu 1 545 prvků. K těmto centroidům byla následně nástrojem *Add Join* připojena statistická data o počtech obyvatel z cenzu[7] 2011 na základě atributu kódu části obce (KODCOB) sdíleným napříč oběma datovými sadami. Informace o počtech obyvatel částí obcí v roce 2011 byla převzata z Historického lexikonu obcí ČR - 1869 - 2011 Českého statistického úřadu (ČSÚ, 2024). Jak ale bylo zmíněno v kapitole 3., data je třeba vztahovat pokud možno k roku 2016. Proto bylo využito také nejnovějšího sčítání lidu, domů a bytů z roku 2021, díky čemuž bylo možné data interpolovat k roku 2016, a to zprůměrováním hodnot počtu obyvatel z roku 2011 a 2021. Výsledkem je 1 545 generátorů dopravy v podobě bodové vrstvy, který představuje centroidy částí obcí s informací o interpolované hodnotě počtu obyvatel k roku 2016.

To dává prostor přikročit k prvnímu kroku tradiční tvorby čtyřstupňového dopravního modelu, kterým je *Trip generation* (vznik cest). Pro účely této závěrečné práce bylo rozhodnuto pracovat s denním počtem cest, jakožto s počtem obyvatel

[7] Cenzus je označení pro sčítání lidu, domů a bytů.

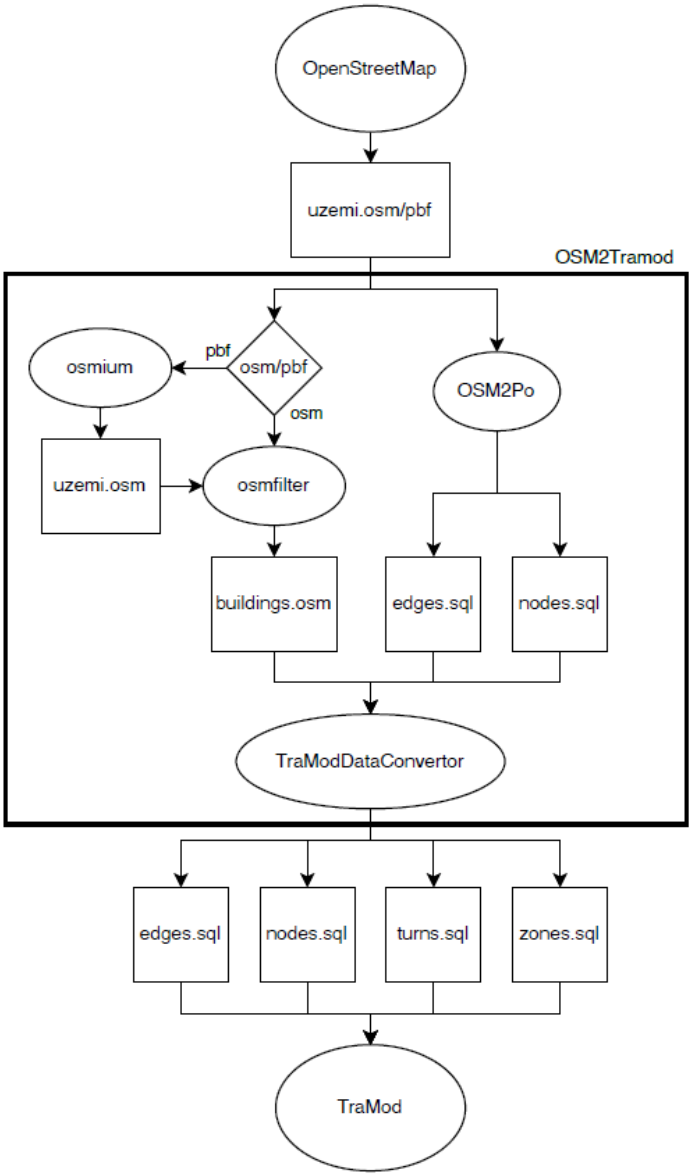
příslušné zóny. Na jednoho obyvatele tedy připadá právě jedna cesta/den. Zóny (22x) generující 0 počet cest, tj. části obce s nulovým počtem obyvatel, byly z důvodu možných výpočetních chyb v softwaru TraMod odstraněny. K problematice vzniku cest se však v následujících podkapitolách budeme ještě vracet.



Obrázek 6: Generátory dopravy (*Zone*)

3.4.2. Využití nástroje OSM2TraMod

Další klíčovou datovou sadou je dopravní síť. Ta byla získána pomocí nástroje OSM2TraMod a je tedy patrné, že zdrojem dopravní sítě je OpenStreetMap. Pro účely tvorby tohoto dopravního modelu se za dopravní síť považuje síť silnic o pozemních komunikacích typu dálnice a silnice I., II. a III. třídy. Místní a účelové komunikace jsou v modelu zanedbány, a to hned ze dvou důvodů. Prvním z nich je minimální dopad těchto komunikací na výsledný dopravní model, ve kterém nehrají z hlediska objemu intenzity dopravy tak významnou roli. Druhým důvodem je snaha minimalizovat výpočetní náročnost vstupních dat.



Obrázek 7: Proces konverze nástroje OSM2TraMod, převzato z (Vaněk, 2022)

Vstupními daty nástroje OSM2TraMod rozumíme data OSM ve formátu *PBF*[8], která jsou nástrojem převedena do datové struktury TraMod. Autorem tohoto nástroje je doporučeno vstupní data ve formátu *PBF* generovat pomocí webového exportního nástroje dostupného z https://extract.bbbike.org/ (dále jen *bbbike*), nicméně v rámci této práce byl použit alternativní exportní nástroj dostupný z https://export.hotosm.org/en/v3/exports/new/select/treetag (dále jen *hotosm)* umožňující nejen pohodlnější vytvoření tzv. *bounding boxu*, jenž definuje rozsah dat ke stažení, ale také možnost selekce dat na základě atributů před samotným stažením dat.

[8] Formát PBF je jedním z typických formátů pro ukládání geografických dat využívaný zejména OSM. Jedná se o zkratku Protocolbuffer Binary Format představující komprimovaný binární formát.

Právě té bylo využito vzhledem apriorní znalosti o zanedbání místních a účelových komunikací, kdy po výběru dat *Data – Tag Tree – Transportation – Road* byl do výčtu výběru atributů *Data – YAML – Feature Selection* přidán příkaz v jazyce SQL[9] filtrující požadovanou typologii silniční sítě na základě jejich reklasifikace (tabulka 9) obsahující podmínku[10]:

```
 where:

        - highway  IN ("motorway", "motorway_link", "trunk", "trunk_link",
"primary",  "primary_link",  "secondary",  "secondary_link",  "tertiary",
"tertiary_link")
```

Tabulka 9: Reklasifikace[11] silnic OSM na typologii pozemních komunikací ČR

motorway	11	dálnice
motorway_link	12	
trunk	13	
trunk_link	14	
primary	15	silnice I. třídy
primary_link	16	
secondary	21	silnice II. třídy
secondary_link	22	
tertiary	31	silnice III. třídy
tertiary_link	32	

Je třeba poznamenat, že další důvod výběru exportního nástroje *hotosm* souvisí se zmíněnou snahou minimalizace objemu vstupních dat. V případě tohoto exportního nástroje došlo k odstranění místních a účelových komunikací před aplikací nástroje OSM2TraMod, čímž bylo zabráněno vzniku tzv. pseudouzlů (*pseudonodes*)[12]. Na rozdíl od toho při využití nástroje *bbbike* dochází k absenci možnosti selekce dat. To znamená, že odstranění místních a účelových komunikací je možné provést až po použití nástroje OSM2TraMod a nutně vede ke vzniku *pseudonodes*. Ačkoliv je nástroj OSM2TraMod

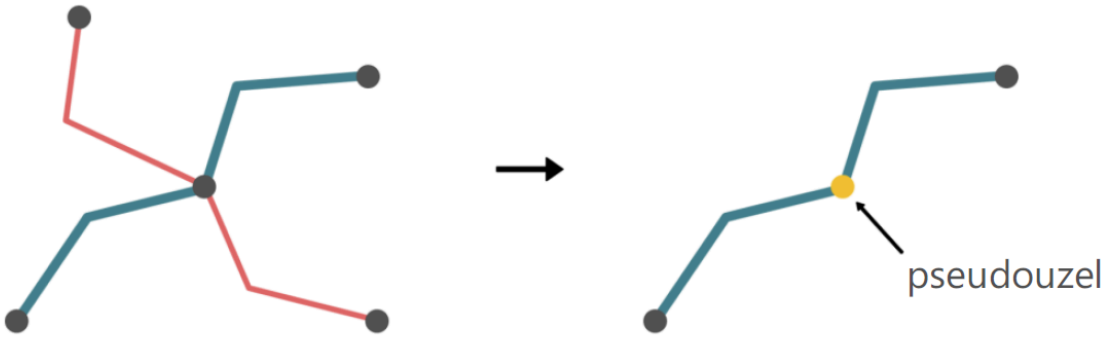
[9] SQL, z anglického překladu Structured Query Language, je standardizovaný programovací jazyk využívaný v relačních databázích.

[10] Kompletní filtrační skript s názvem *00-hotosm-data-filtration.sql* je obsahem přílohy A.

[11] Vytvořená reklasifikace vychází z https://gis.stackexchange.com/questions/116701/what-does-the-values-in-column-clazz-osm2po-mean a https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Cs:Key:highway

[12] *Pseudonodes* je označení pro pozůstatky uzlů odstraněných hran mající vliv na geometrickou i atributovou definici hran stávajících.

koncipován tak, že hrany reprezentují silniční úseky od křižovatky ke křižovatce, výstupy přes exportní nástroj *hotosm* tomuto předpokladu ne zcela odpovídají. I přes tento nedostatek byl zejména kvůli snížení objemu dat (včetně pseudouzlů) využit právě tento exportní nástroj.

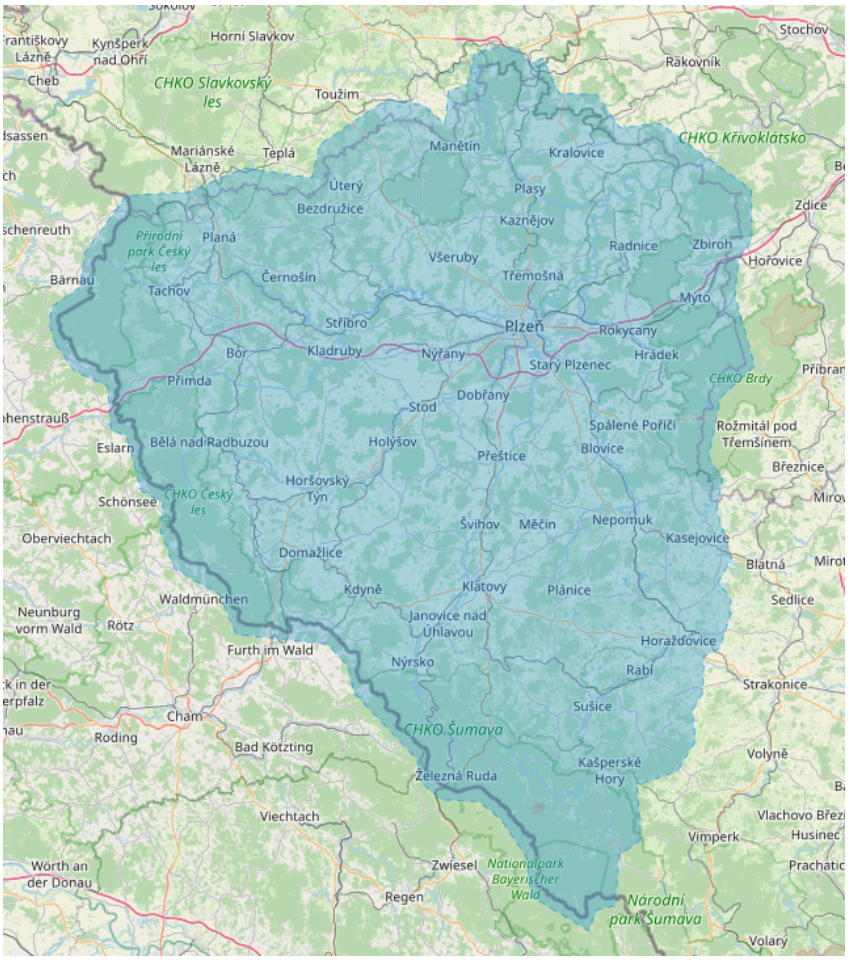


Obrázek 8: Vznik pseudouzlu, převzato Andrš (2023)

Další zjištění se týká dat *turn_restriction*, kdy vstupní data exportovaná pomocí *hotosm* narozdíl od *bbbike* neobsahují na výstupu žádná data. Nicméně v kontextu tvorby rozsáhlých dopravních modelů, včetně toho, kterému se tato závěrečná práce věnuje, se zákazy odbočení nezohledňují.

Soubor ve formátu *PBF*, exportovaný výše popsaným způsobem, byl poskytnut správci nástroje OSM2TraMod, kterým je Ing. Radek Fiala, Ph.D. z KGM FAV ZČU. Po zpracování vstupních dat tímto nástrojem byly poskytnuty výsledné výstupy.

Z obrázku 7 vyplývá, že nástroj OSM2TraMod poskytuje výstupy v podobě skriptů v jazyce SQL. Tyto skripty nejen že zakládají databázové tabulky *Edge*, *Node* a *Turn_restriction*, ale dochází také k jejich naplnění konvertovanými daty OSM do datové struktury TraMod. Výstupní data jsou kvůli ručně vytvořenému *bounding boxu* v rozsahu přesahujícím území Plzeňského kraje viz obrázek 9. Pečlivý čtenář si může všimnout, že jedním z výstupů je i tabulka *Zone*, která vzniká ze vstupních OSM dat budov. Této tabulky nebylo vzhledem k dříve vytvořeným zónám odlišnou metodikou popsanou v oddílu 3.4.1. využito.



Obrázek 9: Rozsah exportovaných OSM dat

3.4.3. Vytvoření a částečné naplnění datového modelu

Software TraMod je integrován na databázovém systému PostgreSQL, který byl nainstalován lokálně. Pomocí správcovského rozhraní pgAdmin 4 byla založena databáze s názvem *dp_tramod*. S ohledem na potřebu pracovat s geografickými daty je nezbytné doinstalování rozšíření PostGIS, které je třeba aktivovat v databázovém *Query* rozhraní pomocí příkazu:

```
CREATE EXTENSION PostGIS;
```

Příkaz zapříčiní naplnění schématu *public*[13], nacházejícího se uvnitř databáze, různými prostorovými funkcemi. Je proto důležité se vyvarovat odstranění tohoto schématu, aby nedošlo k narušení funkčnosti a konzistence využívaných prostorových operací. Tímto způsobem je databáze připravena pro import datového modelu.

[13] Schéma public se vytváří automaticky společně se založením databáze.

Za dobu existence softwaru TraMod pochopitelně proběhlo několik změn datového modelu. Změny bezprostředně nastávaly i během zpracování této závěrečné práce, a proto došlo autorem ke sjednocení datového modelu z různých zdrojů. Datový model byl v databázi vytvořen sekvencí několika SQL skriptů, které jsou součástí přílohy A[14]. Tabulky *Edge* a *Node* byly zároveň naplněny daty získanými z výstupů nástroje OSM2TraMod. Pořadí, ve kterém byly skripty spuštěny, má svou logiku. Přehled skriptů a jejich vlastností:

01-create-schema.sql:	založení schématu[15] s názvem *tm_pk_hromada* včetně vytvoření PostGIS rozšíření
02-create-tables.sql:	založení veškerých klíčových tabulek datového modelu TraMod společně s funkcí *tm_compute_cost* a jejího triggeru, který při updatu záznamu tabulky *Edge* na databázové úrovni automaticky přepočítá atribut *cost*
03-nodes.sql:	výstup z nástroje OSM2TraMod; import dat do tabulky *Node*
04-edges.sql:	výstup z nástroje OSM2TraMod; import dat do tabulky *Edge*

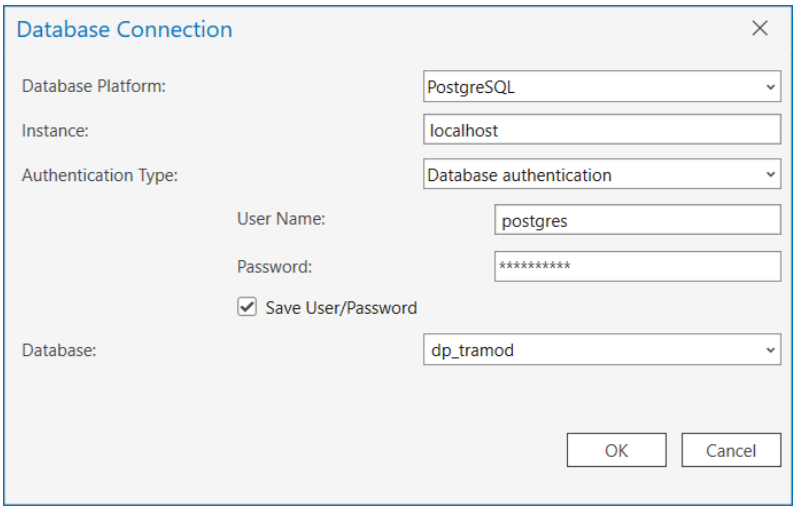
3.4.4. Editace vstupních dat a naplnění datového modelu

Propojení databáze s ArcGIS Pro

V první řadě byl pro editaci vstupních dat třeba zajistit import databázových tabulek *Edge* a *Node* obsahující geometrie do softwaru ArcGIS Pro. Ten nabízí rozhraní připojení databázového systému do GIS. Jednou z možností, jak připojení docílit, je skryto v horní liště menu, záložka *Insert – Connections – Database – New Database Connection*.

[14] Veškeré SQL skripty jsou v textu závěrečné práce patřičně oznanečny a přiloženy v příloze A.

[15] V terminologii softwaru Tramod je ekvivalentem k takovému schématu pojem “model”.



Obrázek 10: Připojení PostgreSQL databáze k ArcGIS Pro

Po zadání validních přístupových údajů k databázi se vytvoří databázové připojení, které nalezneme v okně *Catalog View – Databases*. To obsahuje veškeré tabulky připojené databáze včetně těch negeometrických. Pro další práci s daty byly tabulky *Edge* a *Node* vyexportovány pomocí nástroje *Feature Class to Feature Class* do lokální geodatabáze ArcGIS Pro, takzvané *File Geodatabase* (zkráceně *FGDB*)[16]. Při tomto exportu však došlo ke ztrátě klíčových atributů obou tabulek *edge_id* a *node_id*, které byly převedeny v atribut *ObjectID*, tedy unikátní identifikátor záznamu typický pro třídy prvků v softwaru ArcGIS Pro. Problém nastává v tom, že *ObjectID.Edge* ≠ *edge_id* a *ObjectID.Node* ≠ *node_id*. Z toho důvodu došlo k vytvoření duplicitního sloupce *id_edge* respektive *id_node* na úrovni databáze, které odpovídají původním identifikátorům *edge_id* a *node_id*. Po zopakování celého procesu byly již unikátní identifikátory obou tabulek zachovány v podobě atributů *id_edge* respektive *id_node*.

Selekce dat (*Edge*, *Node*) podle polygonu Plzeňského kraje

Z obrázku 9 vyplývá že, rozsah exportovaných dat OSM nástrojem OSM2TraMod přesahuje hranice Plzeňského kraje. Administrativní území Plzeňského kraje v podobě polygonové vrstvy bylo získáno z geodatabáze ArcČR500. Přímým oříznutím dat *Edge* a *Node* tímto polygonem by došlo k narušení konzistence dat, zejména hran ležících částečně uvnitř a vně polygonu, u kterých by došlo k narušení atributové vazby se začátečním respektive koncovým uzlem. Z toho důvodu bylo využito prostorových dotazů *Select By Location*, kdy pomocí operace *Intersect* byly vybrány hrany protínající se s polygonem. Hrany, které nebyly součástí výsledku prostorového dotazu byly odstraněny. Identickou operací byl výsledný výběr hran porovnán s vrstvou uzlů, čímž

[16] Z neznámého důvodu nebylo možné linová data přidat do ArcGIS Pro napřímo (přetáhnutím do mapy). U bodových prvků byl tento postup však funkční.

jsme získali pouze uzly ležící na výsledných hranách. Ostatní uzly byly rovněž odstraněny. Těmito kroky byla zajištěna konzistence dat *Edge* a *Node*.

Napojení dat *Node* na nejbližší *Zone*

Dalším důležitým krokem je (nepřímé) napojení generátorů dopravy na dopravní síť. Jinými slovy hledáme nejbližší místa (uzly) k místům odkud je generována doprava (zóny), přes které je možné se připojit na dopravní síť (hrany). Toho bylo docíleno za využití geoprocessingového nástroje *Near*, který vyhledává uzel v nejkratší vzdálenosti od zóny a tuto vzdálenost společně s atributem *ObjectID* (!) uzlu propisuje k příslušnému záznamu zóny. Nutno připomenout, že vstupní data jsou uložena v souřadnicovém systému WGS84, tudíž je nutné nastavit volitelný parametr method nástroje *Near* na *GEODESIC* beroucí v úvahu zakřivení sféroidu. Na základě získaného atributu *ObjectID.Node* ve vrstvě *Zone* došlo nástrojem *Add Join* k propojení těchto vrstev a nástrojem *Calculate Field* k přenesení identifikátoru *id_node* do vrstvy *Zone*. Tím dostáváme požadovanou vazbu mezi *Zone* a *Node* přesně podle datové struktury TraMod.

Úprava atributu *capacity* tabulky *Edge*

Nástroj OSM2TraMod je koncipován tak, že atribut *capacity* tabulky *Edge* vyjadřuje maximální únosnost vozidel hrany za hodinu. Vzhledem k tvorbě dopravního modelu s denní intenzitou dopravy proto bylo nutné kapacity hran přepočítat na denní hodnoty. To bylo provedeno na základě následující tabulky 10.

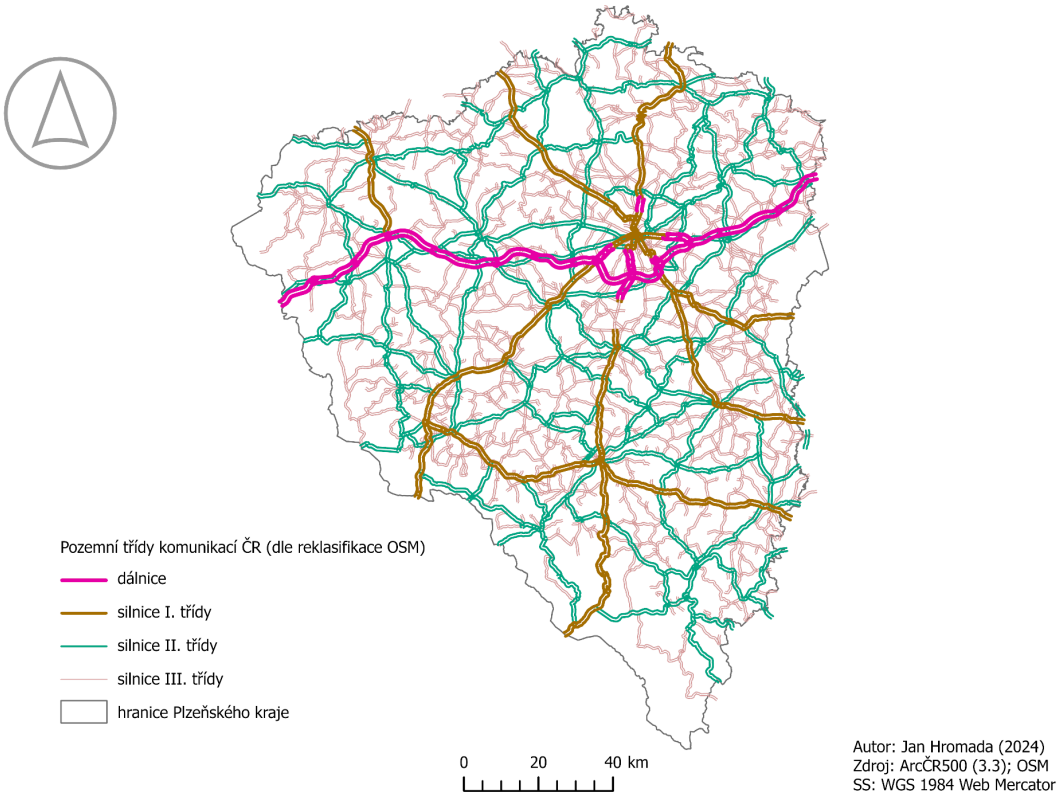
Tabulka 10: Převod třídy pozemní komunikace na její kapacitu, upraveno dle Kolovský (2016)

Typ pozemní komunikace (podle anglické notifikace OTM)	**Ekvivalent typologie ČR**	**Kapacita [voz/24h]**
mainRoad	dálnice	45 000
firstClass	silnice I. třídy	15 000
secondClass	silnice II. třídy	8 000
thirdClass	silnice III. třídy	6 000

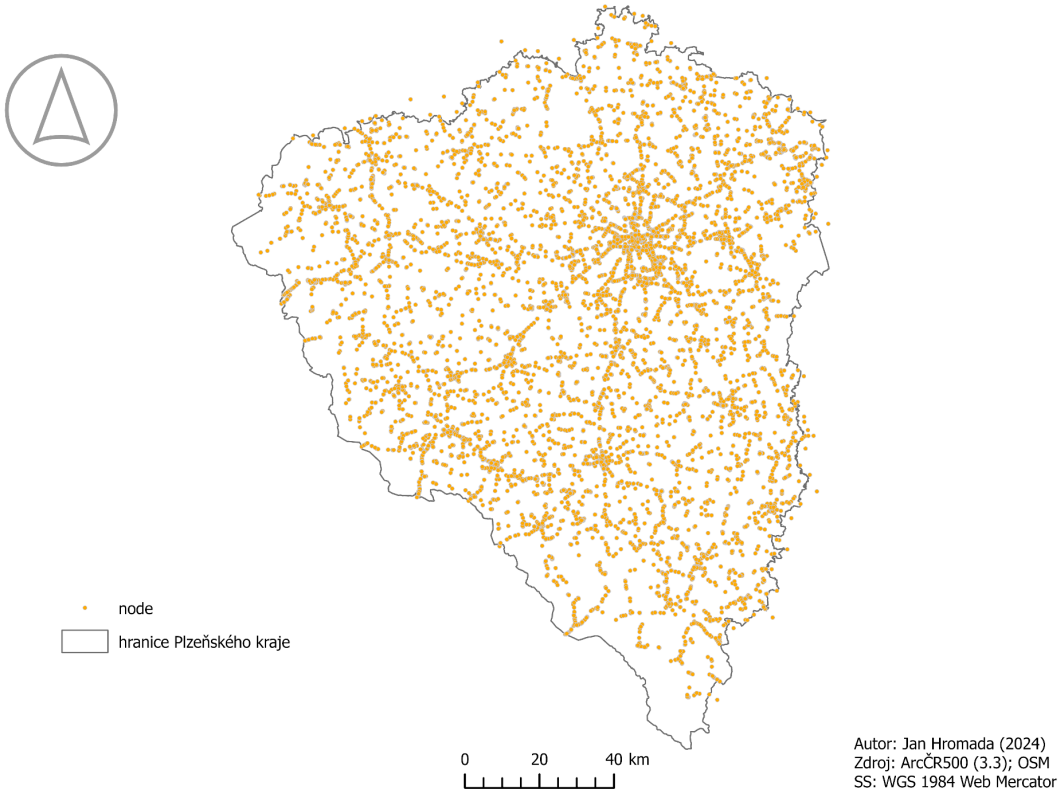
Editace dat *Edge* a *Node*

Dalším problémem je časové hledisko dat *Edge* a *Node*. Původně se jedná o OSM data, která byla konvertována nástrojem OSM2TraMod, vztahující se k roku 2024. Abychom zajistili co nejvěrohodnějšího porovnání dopravního modelu vytvořeném

v softwaru TraMod s modelem poskytnutým firmou EDIP, bylo nezbytné tato data upravit. Z toho důvodu došlo k editaci hran a uzlů do stavu připomínající stav v roce 2016. Z důvodu náročnosti ruční editace, při které musela být udržena konzistence mezi daty hran a uzlů tak, aby odpovídala datové struktuře Tramod, byly v rámci Plzeňského kraje odstraněny pouze významnější dopravní tahy vzniklé po roce 2016. Mezi ně patří Západní obchvat, obchvat kolem Boleveckého rybníka a obchvat u Horní Lukavice. Při úpravě dat bylo využito geometrií silničních úseků (*links*) dopravního modelu EDIP (2016).



Obrázek 11: Třídy silniční sítě (*Edge*) dle reklasifikační tabulky 9



Obrázek 12: Uzly (*Node*) silniční sítě (*Edge*)

Export upravených dat do databáze

Po provedení těchto úprav bylo možné data *Edge*, *Node* a *Zone* exportovat zpět do databáze *dp_tramod*. Nejprve byly tyto třídy prvků exportovány do formátu *shapefile*[17](SHP), čímž bylo možné využít desktopový nástroj, který je součástí nainstalovaného rozšíření PostGIS, s názvem *Shapefile and DBF Loader Exporter*. Ten umožňuje skrze GUI rozhraní nastavit připojení k databázi a následný import SHP souborů do databázového systému PostgreSQL. Při importu je nutné datům nastavit patřičný EPSG[18] kód. V našem případě se jedná o EPSG:4326 odpovídající souřadnicovému systému WGS84. Data byla importována do databázového schématu s názvem *public* a odtud pomocí následujících skriptů (*05-zone.shp-to-zone.sql*, *06-node.shp-to-node.sql* a *07-edge.shp-to-edge.sql*) přehrána do modelu *tm_pk_hromada*.

[17] Shapefile (SHP) je nativní formát pro ukládání geografických dat společnosti Esri.

[18] EPSG (European Petroleum Survey Group) označuje kódový systém identifikující referenční souřadnicové systémy.

```
-- Zone
INSERT INTO tm_pk_hromada.zone (zone_id, node_id, trips, geometry)
SELECT gid, id_node, trips, geom
FROM public.zone_shp;

-- Node
INSERT INTO tm_pk_hromada.node (node_id, geometry)
SELECT id_node, geom
FROM public.node_shp;

-- Úpravy Edge[19]
-- Změna datového typu sloupce isvalid
ALTER TABLE public.edge_shp
ADD COLUMN isvalid_new BOOLEAN;

UPDATE public.edge_shp
SET isvalid_new = (isvalid = 1);

ALTER TABLE public.edge_shp
DROP COLUMN isvalid;

ALTER TABLE public.edge_shp
RENAME COLUMN isvalid_new TO isvalid;

-- Vyplnění sloupce turn_restr prázdným řetězcem
UPDATE public.edge_shp
   SET turn_restr = '';
COMMIT;

-- Edge
INSERT INTO tm_pk_hromada.edge (edge_id, source, target, capacity, cost,
isvalid, turn_restriction, speed, road_type, geometry)
SELECT id_edge, source, target, capacity, cost, isvalid, turn_restr, speed,
road_type, geom
FROM public.edge_shp;
```

Uvedenými skripty došlo k importu 1 523 zón, 11 422 uzlů a 23 131 hran.

Databázové úpravy

Poslední úprava vstupních dat se týká tabulky *Zone*. Tato tabulka obsahuje atribut *trips* (cesty) odpovídající počtu obyvatel dané zóny. Pro účely výpočtu OD matice (viz Výpočet OD matice v oddílu 3.4.5.) bylo nezbytné vyplnit také atributy *incoming_trips* a *outgoing_trips*, tedy cesty do zóny a ze zóny. V rámci závěrečné práce bylo stanoveno, že OD matice, která s těmito atributy bezprostředně souvisí, bude symetrická. Jinými

[19] Před přehráním tabulky Edge ze schématu public bylo nezbytné provést následující úpravy. V opačném případě docházelo k chybovým hláškám.

slovy počet cest ze zóny je shodný s počtem cest do zóny, a proto *trips* = *incoming_trips* = *outgoing_trips* pomocí SQL příkazu *08-zone.trips.sql*:

```
UPDATE tm_pk_hromada.zone
SET incoming_trips = trips, outgoing_trips = trips;
```

3.4.5. Výpočty v API TraMod

Spuštění softwaru TraMod

Po úpravách dat a jejich načtení do databáze *dp_tramod* můžeme přistoupit k výpočetní části. Pro tuto část je nezbytné využít software TraMod, který se spouští prostřednictvím příkazové řádky. Před jeho spuštěním je třeba nastavit připojení k databázi, ve kterém se model nachází. Součástí poskytnutého softwaru TraMod je "maskovaný" ZIP[20] soubor *lib\api-1.0.2.jar*. V tomto zazipovaném souboru je třeba upravit soubor *BOOT-INF\classes\application.properties*, konkrétně jeho parametr[21]:

```
tm.db.url=jdbc:postgresql://server:5432/stm?user=user&password=password
```

tak, aby obsahoval platné údaje pro připojení k databázi. Část **server:5432** označuje server, na kterém je databáze umístěna. Typicky se jedná o název serveru nebo lokální zařízení, označované jako localhost, spolu s portem, na kterém databáze naslouchá. **stm** představuje název databáze, **user** název vlastníka databáze a **password** heslo k databázovému systému nastaveném při jeho instalaci. Při úpravě tohoto parametru je důležité zajistit, aby údaje odpovídaly aktuálním přihlašovacím údajům pro přístup k cílové databázi PostgreSQL. Tímto způsobem je software TraMod schopen úspěšně navázat spojení s databází. V našem případě vypadají platné údaje následovně:

```
tm.db.url=jdbc:postgresql://localhost:5432/dp_tramod?user=postgres&password
=********
```

S validně nastaveným databázovým připojením je možné spustit software TraMod z příkazové řádky. Jeho spuštění nám umožňuje přístup k výpočetnímu webovému API s uživatelským rozhraním dostupné z http://localhost:8080/swagger-ui.html. Pro plnohodnotné využití API je nutná autorizace pomocí klíče, který byl poskytnut správci softwaru TraMod.

[20] ZIP je souborový formát umožňující kompresi a archivaci dat.

[21] Parametr je nezbytné upravit přímo v ZIP souboru aniž by byl tento soubor extrahován (např. pomocí programu WinRAR).

TraMod API

API TraMod obsahuje řadu funkcí rozdělených do sekcí. Každá sekce se věnuje odlišné problematice a může obsahovat funkce typu GET, PUT, DELETE a POST. Ty naznačují obecnou funkcionalitu jednotlivých funkcí, kde GET představuje získání (existujících) dat, PUT jejich aktualizaci a DELETE jejich odstranění v databázi. POST má charakter vytvoření nových dat. Obsahuje-li například konkrétní funkce **POST/zones/{model}**, přidávající novou zónu, značí část se složenými závorkami **{model}** povinný vstupní parametr funkce. Před prvním použitím každé konkrétní funkce je třeba stisknout

odemykající nastavení vstupních parametrů a parametrů samotné funkce ve způsobu zápisu *JSON*. Seznam veškerých API TraMod sekcí:

- shortest paths (Jobs management)
- caches (Cache management)
- flow (Flow management)
- matrix (OD matrices management)
- zones (Zones management)
- turns restriction (Turns restriction management)
- ODM (Origin-Destination matrix pairs management)
- edges (Edges management)
- nodes (Node management)
- jobs (Jobs management)
- model (Model management)
- info (Actual information about system status)

Mezi jedny z využitých funkcí patří funkce **GET/health** v sekci **info** kontrolující komunikaci mezi API a databází a **GET/models/** v sekci **model**, která vypisuje seznam modelů uložených v databázi. V našem případě se jedná o schéma (model) *tm_pk_hromada*. Veškerá dokumentace API TraMod je dostupná z https://gitlab.com/tramod/traffic-modeler/-/blob/master/doc/api_new.md.

Výpočet OD matice

Klíčovou součástí každého dopravního modelu je OD matice, kterou představuje tabulka *ODM*. API umožňuje tuto matici vypočítat pomocí funkce *Trip_distribution*, kterou nalezneme v sekci **matrix** - **POST/matrix/{model}/trip_distribution**. Ze samotného názvu funkce lze odvodit, že se jedná o druhý krok tradiční čtyřstupňové tvorbě dopravního modelu, a to rozdělení cest. V případě softwaru TraMod je

problematika rozdělení cest řešena gravitační metodou viz oddíl 2.3.4 (*Trip Distribution*). Funkce *Trip_distribution* byla spuštěna s následujícími parametry:

```
{"action": "saveToDB",
"deterrence_max": 6.43,
"deterrence_wideness": 2.94,
"matrix_name": "final",
"matrix_id": 1,
"matrix_is_default": true[22]}
```

Klíčovými parametry této funkce jsou *deterecence_max* a *deterrence_wideness*. Jejich určení spočívá v optimalizaci tvaru křivky tak, aby odpovídala histogramu cest získaných z dat směrového průzkumu (Česko v pohybu, 2022) pro Plzeňský kraj. Optimalizace byla provedena s využitím metody nejmenších čtverců (MNČ). Výsledný odhad parametru *deterecence_max* určuje délku nejčastější cesty v Plzeňském kraji, zatímco *deterrence_wideness* udává vzdálenost mezi inflexními body dané funkce. Výpočet těchto parametrů byl proveden Ing. Radkem Fialou, Ph.D, který se problematikou funkce *Trip_distribution* zabývá podrobněji.

Použitím funkce *Trip_distribution* dojde v tabulce *Matrix* k vytvoření záznamu s atributy *matrix_id* = 1 a *name* = 'final' (viz parametry funkce *Trip distribution*) a zároveň k naplnění tabulky *ODM* záznamy o celkovém počtu 2 318 006 představující počet cest mezi jednotlivými zónami v silniční síti. Jak však bylo popsáno v podkapitole 3.3., rozsah tabulky *ODM* si lze představit jako $n \times n$, kde n představuje počet zón a tedy rozměr $1\,523 \times 1523$ (2 319 529) neodpovídá vypočtenému rozměru. Odlišný rozměr spočívá ve způsobu výpočtu matice, kdy nedochází k ukládání jejích nulových prvků. Z datové struktury TraMod vyplývá, že vypočtené záznamy obsahují v tabulce *ODM* atribut *matrix_id* = 1, který odkazuje na tabulku *Matrix*.

Přiřazení OD matice na síť

Jedním z posledních kroků k úspěšnému vytvoření prvotního (nekalibrovaného) dopravního modelu je přiřazení OD matice na síť. Jedná se o čtvrtý a poslední krok čtyřstupňového dopravního modelování zvaný *Traffic Assignment*. Ten je v rámci softwaru TraMod řešen metodou *Equilibrium Assignment* (rovnovážným zatížením sítě) viz oddíl 2.3.4. Před tímto krokem je vhodné provést načtení modelu do paměti pomocí API funkce **GET/models/{model}/** v sekci **model**, což zapříčiňuje rychlejší výpočty funkcí, ve kterých vystupuje OD matice jako vstupní parametr. Samotný krok jejího

[22] API TraMod umožňuje výchozí nastavení (*is_default* = *true*) pouze u jedné matice. Proto je nutné pamatovat na tento parametr v případě, že model obsahuje vícero OD matic. Změnu lze provádět jak pomocí API funkce PUT/matrix/{model}/{matrix_id}, tak přímo v databázi.

přiřazení na síť se poté provádí úlohou (jobem) v sekci **jobs** - **POST/jobs/{model}** s parametry:

```
{"jobType": "traffic",
"matrixName": "final",
"gateway": false}
```

Po spuštění této úlohy je vygenerován unikátní identifikátor *job_id*, díky kterému můžeme pomocí funkce **GET/jobs/{model}/{job_id}/status** v sekci **jobs** sledovat stav výpočtu vracející hodnoty {“RUNNING”, “ERROR” nebo “FINISHED”}.

Změní-li se stav na “FINISHED”, přiřazení OD matice na síť je dokončeno. Výsledek se poté získává pomocí funkce **GET/JOBS/{model}/{job_id}/result** v sekci **jobs**, ve které je potřeba vyplnit název modelu a získaného identifikátoru úlohy (*job_id*). To umožňuje zobrazit a stáhnout výsledek ve formátu *JSON*[23]. Obsahem tohoto výstupu jsou hodnoty dopravních intenzit (*traffic*) veškerých hran modelu s přiřazeným identifikátorem *edge_id*. Na základě *edge_id* je možné propojit tato data s geometrickými daty hran v ArcGIS Pro pomocí nástroje *Add Join*. Před propojením je nezbytné převést formát *JSON* do formátu *CSV*[24], který je kompatibilní s operací *Join*. Pro tento účel byl vytvořen skript v ArcGIS Notebooks s názvem *01-JSON-2-CSV.ipynb*, který zajišťuje konverzi mezi těmito formáty do potřebné podoby:

```
# Import knihoven
import json
import csv

# Vstupní JSON soubor
traffic = r'cesta ke vstupnímu souboru.json'[25]

# Definice výstupního CSV soubor
csv_file = r'cesta k výstupnímu souboru.csv'

# Otevření JSON souboru
with open(traffic, 'r') as json_file:
    data = json.load(json_file)
```

[23] *JSON* (JavaScript Object Notation) představuje textový formát reprezentující strukturovaná data jako sady dvojic klíč-hodnota nebo jako seznamy

[24] *CSV* (Comma-Separated Values) je textový formát vhodný pro ukládání tabulkových dat. Jednotlivé hodnoty jsou odděleny oddělovači (například čárkou).

[25] Prefix ‘r’ (*raw string*) způsobuje, že speciální znaky v řetězci, jako jsou zpětná lomítka v syntaxi ‘\\’, mohou být interpretována v doslovném tvaru. Zpětné lomítko je pak umožněno zapsat jako ‘\’.

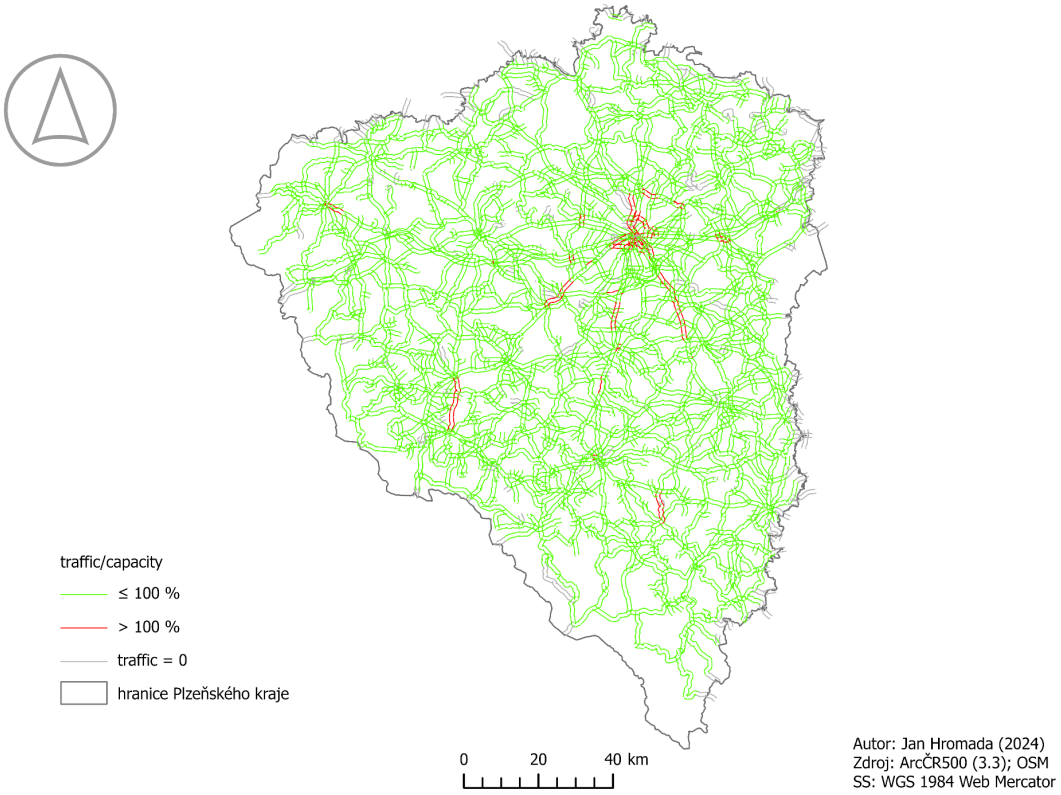
```
# Extrakce dat
traffic_data = data['result']['traffic']

# Definice názvů polí
fieldnames = ['traffic', 'edge_id']

# Zápis extrahovaných dat do výstupního souboru
with open(csv_file, 'w', newline='') as csvfile:
    writer = csv.DictWriter(csvfile, fieldnames=fieldnames)

    # Vytvoření hlavičky
    writer.writeheader()

    # Zápis každého extrahovaného řádku
    for item in traffic_data:
        writer.writerow(item)
```

3.5. Úprava parametrů dopravního modelu

3.5.1. Prvotní analýza *traffic/capacity*

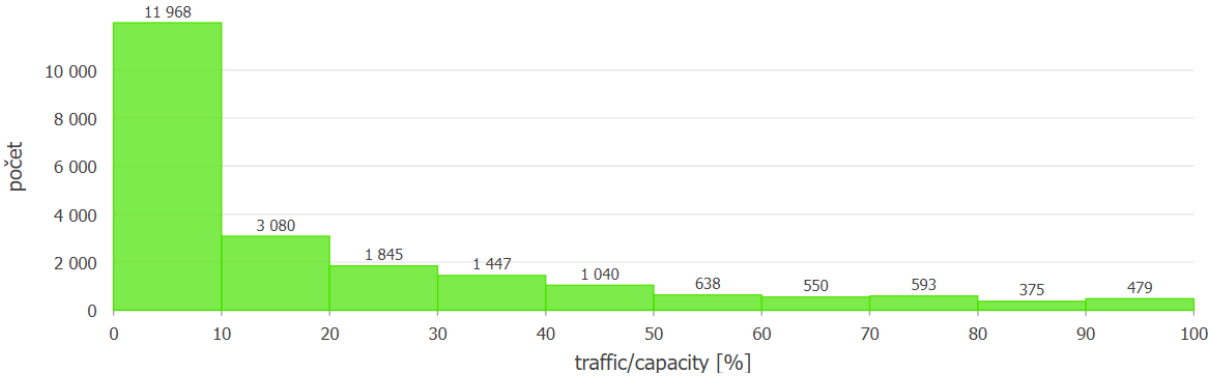
Po připojením dopravních intenzit (*traffic*) ke geometrickým datům hran (*Edge*) byla v softwaru ArcGIS Pro provedena analýza poměru dopravních intenzit hran vůči jejím kapacitám v rámci celé dopravní sítě. Pro snadnější interpretaci byl poměr *traffic/capacity* vyjádřen v % (viz obrázky 15, 17 a 22). K těmto účelům byla vytvořena nová atributová pole pomocí nástroje *Add Field* a jejich výpočet pomocí *Calculate Field*.

Hypotéza této analýzy spočívá v pravděpodobném překračování kapacit silničních úseků provozem v centrech měst a na hlavních dopravních tazích, kde dochází k vysoké míře koncentrace dopravy.

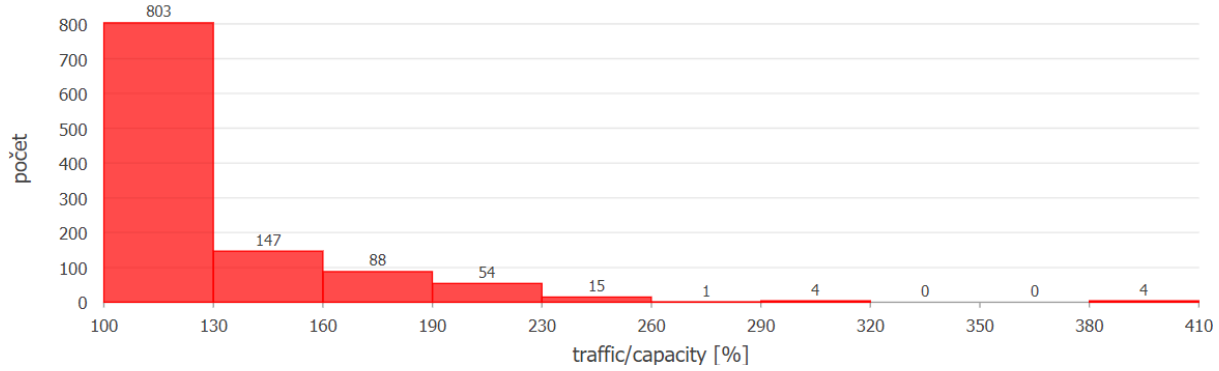


Obrázek 13: Prvotní poměr *traffic/capacity* [%]

Výsledkem analýzy *traffic/capacity* je obrázek 13 zobrazující 20 339 hran, jejichž dopravní intenzita nepřesahuje jejich kapacitu ($\leq$100 %). Opačná situace nastává u 1 116 hran ($>$100 %). Počet 1 616 představuje hrany s nulovým provozem, které se typicky vyskytují zejména na okraji modelu (*traffic* $= 0$).



Obrázek 14: Prvotní histogram poměru *traffic/capacity* $\leq$ 100 %



Obrázek 15: Prvotní histogram poměru *traffic/capacity* > 100 %

3.5.2. Výpočet dopravního výkonu

Další důležitou analýzou je výpočet dopravního výkonu, který slouží ke kvantifikaci míry provozu dopravy vzhledem k jiným proměnným. Dopravní výkon může být definován různými způsoby a je klíčovým ukazatelem pro posouzení efektivity dopravního systému.

V našem konkrétním případě byl použit dopravní výkon zohledňující denní provoz vzhledem k přepraveným vzdálenostem, vyjádřený v jednotkách vozokilometrů (vozokm) viz Vzorec 1:

$$D = \Sigma_{i=1}^{n}(s_i \cdot t_i) \quad (1)$$

kde D = dopravní výkon [vozokm/den]; s = délka úseku [km]; t = dopravní intenzita [vozidel/den].

Vypočtený dopravní výkon byl následně porovnán s celostátním průzkumem dopravního výkonu silniční dopravy (Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. & Ředitelství silnic a dálnic ČR, 2022) z roku 2020[26] zohledňující pouze silnice I., II. a III. třídy (viz tabulka 11).

[26] Údaje z tohoto zdroje byly poskytnuty společností EDIP. Informace o dopravním výkonu k roku 2016, ke kterému je vytvářený model vztahován, bohužel nebyly k dispozici.

Tabulka 11. Srovnání dopravních výkonů silniční dopravy (zaokrouhleno na celá čísla)

Typ pozemní komunikace	Dopravní výkon (průzkum ČR) [vozokm/den]	Dopravní výkon (vypočtený) [vozokm/den]
silnice I. třídy	3 453 000	5 195 699
silnice II. třídy	3 226 000	6 318 617
silnice III. třídy	1 343 000	2 239 171
Celkem	**8 022 000**	**13 753 487**

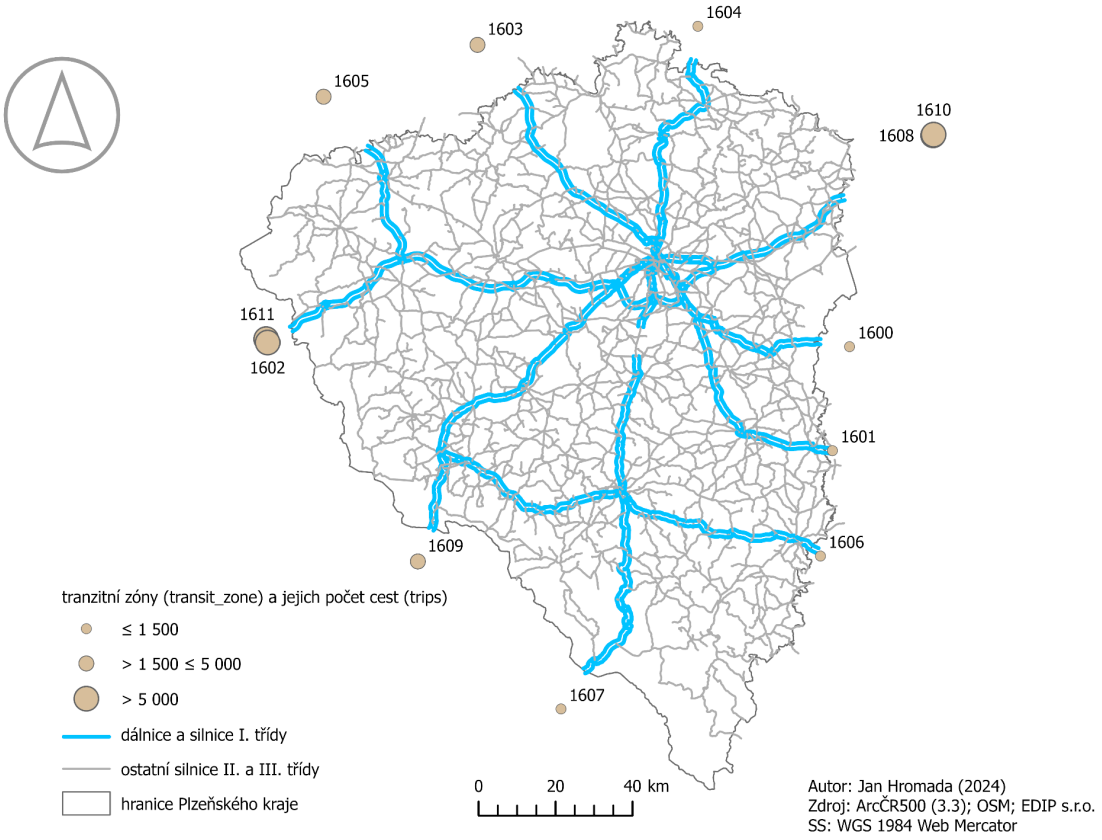
Na základě provedeného porovnání bylo zjištěno, že vytvořená dopravní síť vykazuje výrazně vyšší dopravní výkon ve srovnání s celostátním průzkumem. To naznačuje nadměrný výskyt vysokých hodnot počtu cest v rámci vytvořeného dopravního modelu. Po konzultaci s dopravním inženýrem nebyl tento stav vhodný pro to, abychom mohli přistoupit k dalšímu kroku – kalibraci. Z toho důvodu bylo nezbytné upravit parametr *trips* v tabulce *Zone*, který dosud představoval počet obyvatel jednotlivých částí obcí. Cílem úpravy je nalézt vhodný koeficient, který se po součinu se současnými hodnotami *trips* bude co nejvíce přibližovat celkovému dopravnímu výkonu vycházejícího z průzkumu ČR. Nakonec byl nalezen adekvátní koeficient = 0,563. Nově se tedy hodnota *trips* vypočítává jako násobek počtu obyvatel dané zóny a tohoto koeficientu (*trips* = počet obyvatel * 0,563). Jinými slovy, na 1000 obyvatel připadá právě 563 cest.

3.5.3. Problematika tranzitních generátorů dopravy

Z analýzy na obrázky 12, vytvořeného na základě vyhodnocení poměru *traffic/capacity*, vyplývá existence tzv. "slepých" hran, kde dopravní provoz (*traffic*) dosahuje hodnot 0. Jedná se o hrany, na které nebyla napojena žádná doprava. S problematikou tranzitních generátorů dopravy typicky souvisejí hrany nacházející se na okraji modelu.

Oddíl 3.4.1. se věnuje generátorům dopravy uvnitř zájmového území Plzeňského kraje. Ty ovšem nepodchycují dopravu, která v území nevzniká ani do něj necílí, ale pouze jím projíždí. Jedná se o tzv. tranzitní generátory dopravy, případně tranzitní zóny. Jejich typická vlastnost spočívá v tom, že se obecně velmi špatně modelují. Z toho důvodu byly tyto zóny převzaty z dopravního modelu poskytnutým společností EDIP, který disponuje robustním podchycením tranzitní dopravy. Ta se projevuje zejména na hlavních dopravních tazích, a proto byl výběr tranzitních zón zaměřen pouze na dálnice a silnice I. třídy.

V první řadě došlo v softwaru ArcGIS Pro k výběru hran odpovídající dálnicím a silnicím I. třídy pomocí *Select by Attributes*. Následně byly k těmto hranám ručně vybrány nejbližší generátory dopravy modelu EDIP za hranicemi Plzeňského kraje. které v kontextu s naší tvorbou představující tranzitní generátory dopravy. Nakonec byly tranzitní zóny napojeny na koncové uzly selektovaných hran skrze naplnění atributů *node_id* v tabulce *Zone*. Tímto způsobem byla vyřešena geometrická část a konzistence dat struktury TraMod.



Obrázek 16: Vybrané tranzitní generátory dopravy z dopravního modelu EDIP

Část týkající se zpracování atributů byla poněkud komplikovanější. Model EDIP totiž nemá uloženy hodnoty cest v generátorech dopravy napřímo, jak je tomu v modelech TraMod, ale je možné je získat skrze OD matici. Model EDIP však rozlišuje dopravu na osobní, lehkou nákladní a těžkou nákladní, přičemž každá z nich disponuje svou kalibrovanou OD maticí asymetrického charakteru. V terminologii TraMod označujeme asymetrickou OD matici jako matici, ve které *incoming_trips* $\neq$ *outoging_trips*. V každé matici A pak $\Sigma_{j=1}^{n} A_{i,j}$ představuje počet cest ze zóny i (*outgoing_trips*) a $\Sigma_{i=1}^{n} A_{i,j}$ počet cest do zóny j (*incoming_trips*). Vzhledem k absenci unikátních identifikátorů v matici zároveň platí, že pořadí řádků, respektive sloupců,

odpovídá identifikátorům zón. Na základě těchto poznatků byla v OD maticích provedena ruční selekce dat zaměřující se pouze na vybrané tranzitní generátory dopravy. Následně došlo u každé z tranzitních zón k součtu hodnot *incoming_trips* a *outgoing_trips* ze všech tří matic a k symetrizaci těchto hodnot zprůměrováním, což dalo vzniku atributu *trips*. Výsledkem je 12 tranzitních zón (*transit_zone*) indexovaných od *zone_id* = 1600 až 1611 s vyplněnými atributy *node_id* a *trips* ve formátu *SHP*. Soubor *transit_zone.shp* byl naimportován do databáze stejným způsobem popsaným v části Export upravených dat do databáze oddílu 3.4.4.

3.5.4. Aplikace úprav parametrů

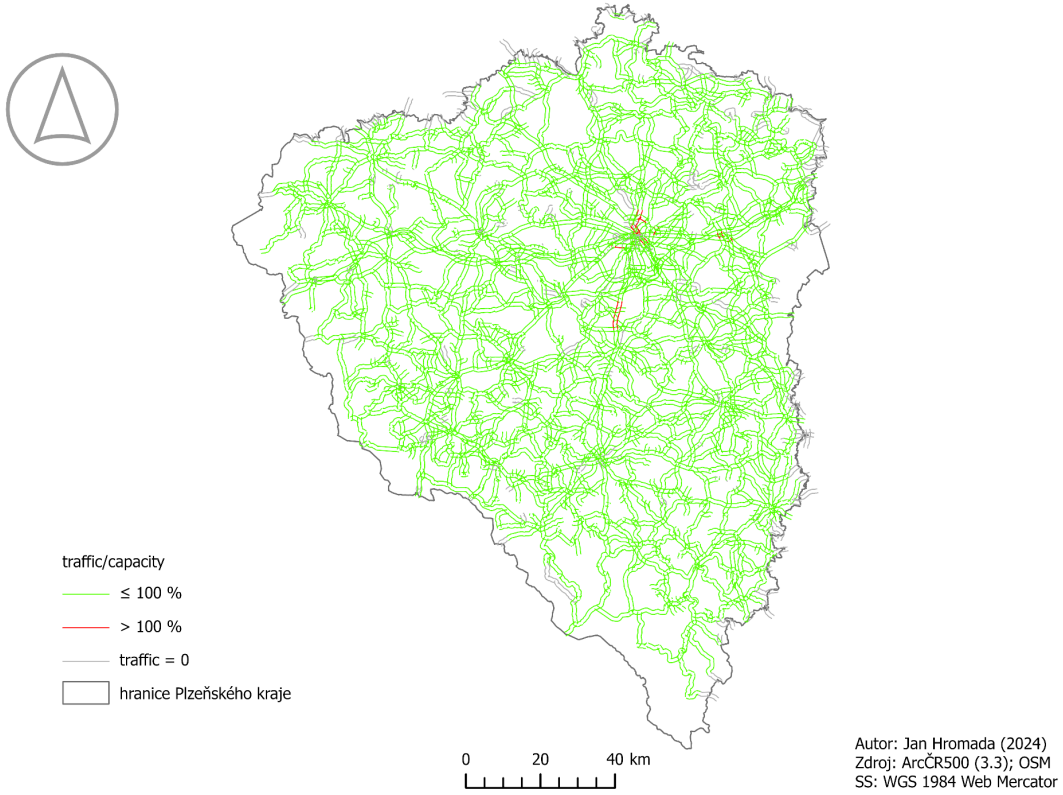
Tabulka *Zone*

V důsledku změn v tabulce *Zone*, zahrnujících rozšíření o tranzitní generátory dopravy a úpravu výpočtu atributu trips, je přepočet stávající OD matice nevyhnutelný. To vyžaduje opakování kroků Výpočet OD matice a Přiřazení OD matice na síť popsaných v oddílu 3.4.5. Výsledkem je OD matice obsahující 2 354 690 záznamů, vytvořená z celkového počtu 1 535 zón (včetně tranzitních). Zároveň je třeba zdůraznit, že přepočet *trips* se vztahuje pouze na původní záznamy tabulky *Zone* (1523), tj. bez (12) přidaných tranzitních generátorů dopravy. Převzaté tranzitní zóny totiž disponují kalibrovanými hodnotami cest, které jsou zároveň jež jsou vytvořeny odlišnou metodikou. Po importu tranzitních zón do schématu *public* byly změny tabulky *Zone* provedeny prostřednictvím následujících SQL skriptů (*09-transit_zone.shp-to-zone.sql* a *10-zone.trips-change.sql*) :

```
-- Naplnění tabulky Zone tranzitními generátory
INSERT INTO tm_pk_hromada.zone (zone_id, node_id, trips, geometry,
incoming_trips, outgoing_trips)
SELECT zone_id, node_id, trips, geom, incoming_t, outgoing_t
FROM public.transit_zone;

-- Naplnění atributů incoming_trips a outgoing_trips
UPDATE tm_pk_hromada.zone
SET incoming_trips = trips, outgoing_trips = trips
WHERE zone_id >= 1600;

-- Přepočet trips (a incoming_trips, outgoing_trips) původních zón
UPDATE tm_pk_hromada.zone
SET trips = trips * 0.563,
      incoming_trips = incoming_trips * 0.563,
    outgoing_trips = outgoing_trips * 0.563
WHERE zone_id < 1600;
```

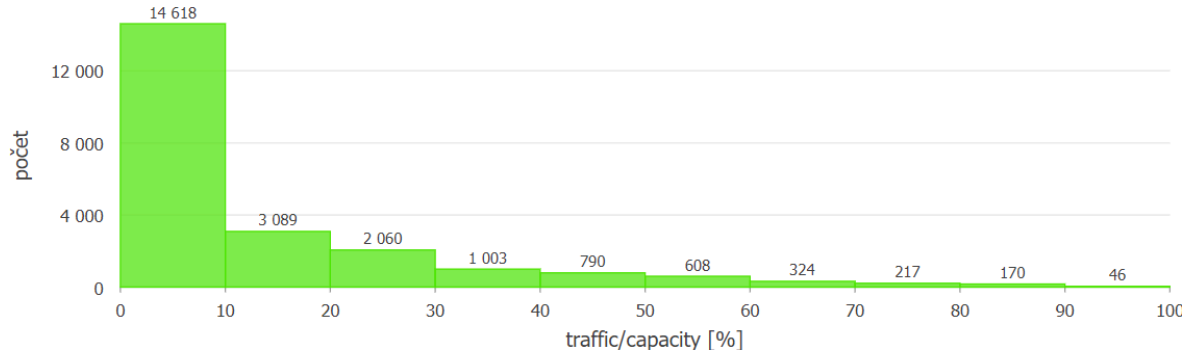
3.5.5. Druhotná analýza traffic/capacity

Výpočet nové OD matice vyžaduje opakování analýzy *traffic/capacity*, která byla provedena identickým způsobem.

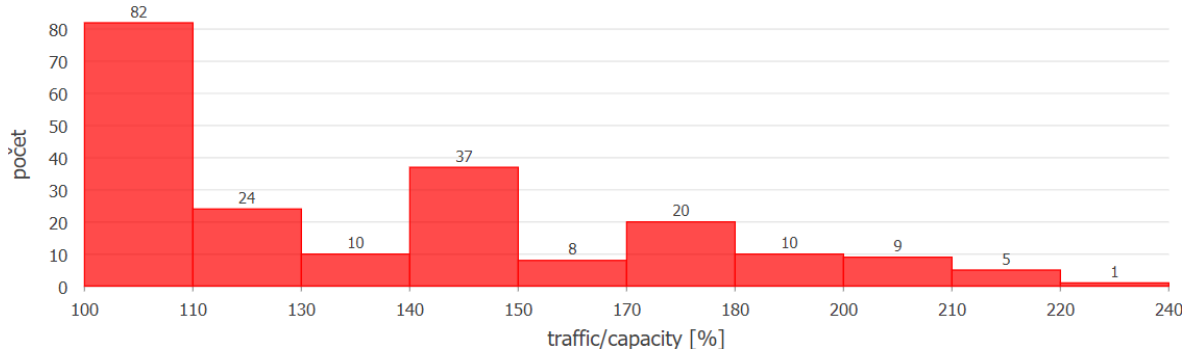


Obrázek 17: Druhotný poměr *traffic/capacity* [%] po zapracování úprav

Z této analýzy vyplývá, že po změnách dopravní provoz 21 384 hran vyhovuje svým kapacitám ($\leq$100 %), *traffic* 206 hran přesahuje své kapacity ($>$100 %) a 1 541 hran má nulový provoz (*traffic* $= 0$).



Obrázek 18. Druhotný histogram poměru *traffic/capacity* ≤ 100 %



Obrázek 19. Druhotný histogram poměru *traffic/capacity* > 100 %

3.5.6. Druhotný výpočet dopravního výkonu

Také dopravní výkon je změnou OD matice ovlivněn a je nezbytné jej přepočítat.

Tabulka 12. Srovnání dopravních výkonů silniční dopravy (zaokrouhleno na celá čísla)

Typ pozemní komunikace	**Dopravní výkon (průzkum ČR) [vozokm/den]**	**Dopravní výkon (vypočtený, původní) [vozokm/den]**	**Dopravní výkon (vypočtený, po úpravách) [vozokm/den]**
silnice I. třídy	3 453 000	5 195 699	3 472 125
silnice II. třídy	3 226 000	6 318 617	3 368 201
silnice III. třídy	1 343 000	2 239 171	1 159 696
Celkem	**8 022 000**	**13 753 487**	**8 000 022**

Podle tabulky 12 došlo k výraznému přiblížení se k celkovému dopravnímu výkonu získaného z průzkumu ČR. Výsledek byl konzultován s dopravním inženýrem, který doporučil provedení kalibrace.

3.6. Kalibrace dopravního modelu

Jak je naznačeno v oddíle 2.3.5, kalibrace představuje zásadní proces při tvorbě dopravního modelu tak, aby jeho výsledky co nejpřesněji odpovídaly reálně naměřeným datům.

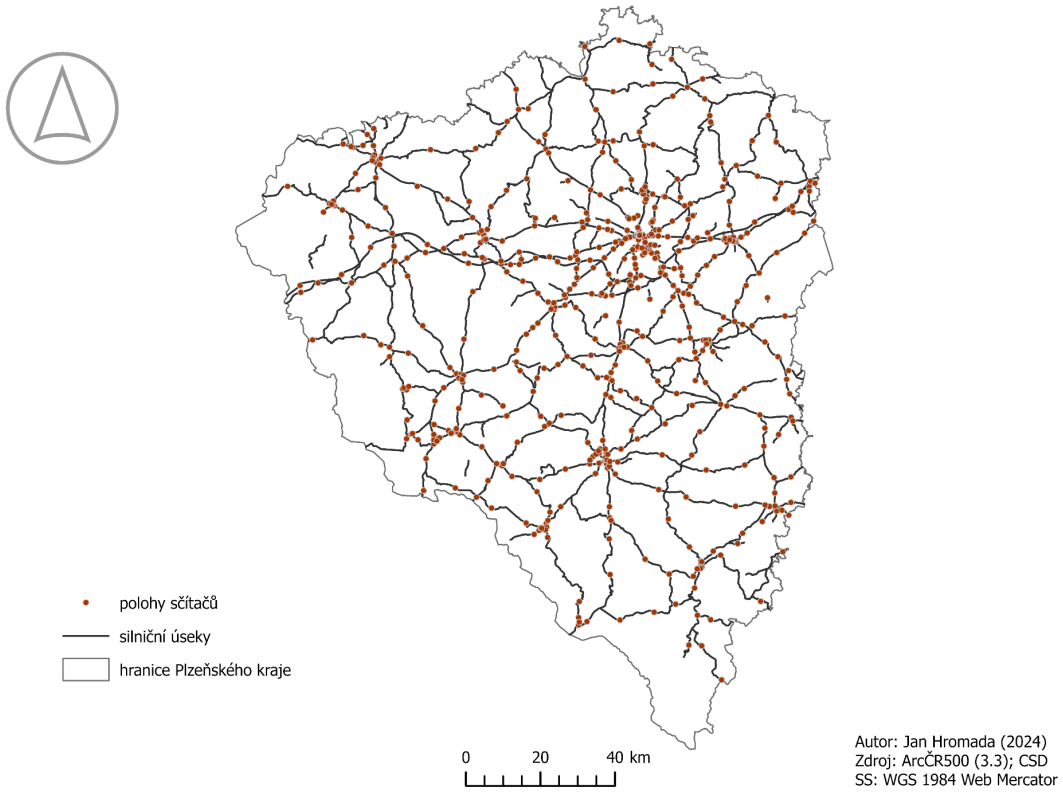
3.6.1. Vstupní data a jejich problematika

Jedněmi ze vstupních dat pro kalibraci jsou dvě datové sady ve formátu *SHP* – bodová vrstva stanovišť sčítání a liniová vrstva silničních úseků – vycházející z dat Celostátního sčítání dopravy (CSD) z roku 2016, které byly poskytnuty společností EDIP.

Celostátní sčítání dopravy je projekt Ředitelství silnic a dálnic (ŘSD) realizující se za účelem sběru informací o průměrných intenzitách, dopravních výkonech a skladbě dopravního proudu automobilové dopravy na dálniční a silniční síti ČR v pravidelném intervalu pěti let[27]. Výstupy CSD jsou klíčovými podklady pro zpracování prognózy rozvoje dopravy, pro dopravní plánování, technický návrh silnic nebo pro hodnocení negativních vlivů automobilové dopravy na okolní silnice. V rámci CSD 2016 bylo provedeno sčítání na kategorií komunikacích dálnic, rychlostních silnic (nyní dálnic II. třídy), silnic I. třídy a na vybraných silnicích II. a III. třídy společně s místními komunikacemi statutárních měst. Sčítání proběhlo v celkem 13 termínech od poloviny dubna do konce října roku 2016 (Kubešová, 2016).

Poskytnuté datové sady jsou v rozsahu ČR, a proto došlo k jejich importu do ArcGIS Pro a následnému oříznutí pomocí nástroje *Clip* na rozsah Plzeňského kraje.

[27] CSD se snaží dodržet pětileté cykly končící na 0 a 5. V roce 2015 došlo poprvé v historii od roku 1980 k ročnímu posunu způsobeným posunem termínu veřejné zakázky, který dal vzniku CSD 2016.



Obrázek 20: Polohy sčítačů a silniční úseky Plzeňského kraje

Bodová vrstva poloh sčítačů (696) obsahuje atribut *CIS_SU* (číslo silničního úseku). Liniová vrstva silničních úseků (664) obsahuje tentýž atribut spolu s řadou dalších atributů, přičemž klíčovým je atribut *SV* (součet vozidel), který reflektuje výslednou hodnotu sčítání, tzv. roční průměr dopravních intenzit (RPDI) za 24 hodin bez ohledu na kategorii vozidla (Kubešová, 2016).

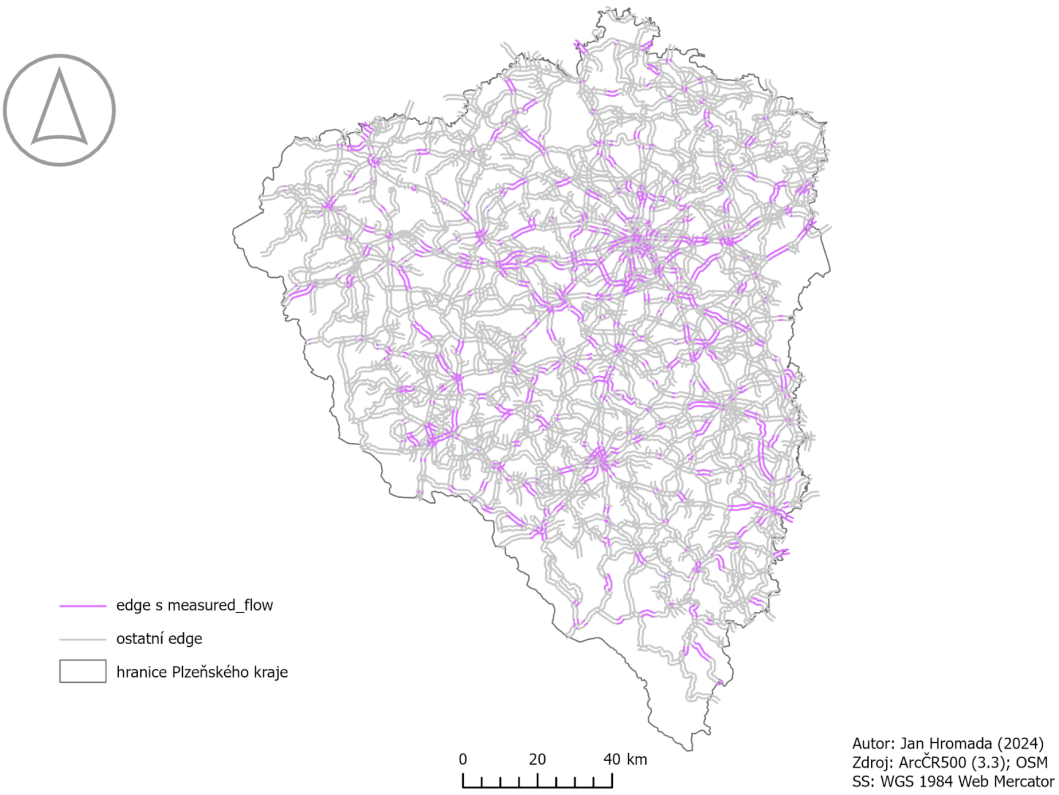
Problematika dat CSD spočívá v tom, že hodnoty RPDI pro silniční úseky jsou uvedeny pro oba směry. S ohledem na charakter silniční sítě TraMod, kde každý směr představuje samostatný silniční úsek, bylo nutné hodnoty atributu *SV* symetricky rozdělit mezi oba směry. Tímto krokem došlo ke zkreslení dat, která představují zachycení reálného provozu. Bohužel nebyl nalezen alternativní způsob, jak se s touto problematikou vypořádat.

3.6.2. Zpracování vstupních dat CSD

Cílem zpracování vstupních dat kalibrace spočívá ve vytvoření tzv. kalibračního datasetu zahrnující naplnění tabulek *Dataset* a *Measured_flow* příslušnými daty. Abychom dosáhli naplnění tabulky *Measured_flow* s klíčovým atributem *flow* představující reálně měřený provoz dopravy, bylo nezbytné ztotožnit liniovou vrstvu silničních úseků z CSD obsahující atribut *SV* s daty hran (*Edge*). V prvním kroku došlo

na základě společného atributu *CIS_SU* poloh sčítačů a silničních úseků CSD k jejich propojení nástrojem *Add Join* a přenesení atributu *SV* do 646 záznamů bodové vrstvy sčítačů. Celkem 76 sčítačů s atributem $SV = 0$ bylo odstraněno. Jedná se o místa navržená k měření, kterých v rámci CSD 2016 nebylo využito. Atribut *SV* byl vzhledem k problematice hodnot RPDI následně vydělen dvěma (*SV/2*) pomocí nástroje *Calculate Field*. V kontextu s tabulkou *Measured_flow* chápejme $SV/2 = flow$. Výstupem je bodová vrstva poloh sčítačů (570) s informací o průměrné intenzitě dopravy v jednom směru.

Poněkud komplikovanější byl druhý krok, ve kterém došlo k přenesení atributu *flow* z bodové vrstvy sčítačů na nejbližší hrany pomocí nástrojů *Near* a *Add Join*. Je nutné připomenout, že některé hrany sdílejí identickou geometrii, a proto došlo k přenesení atributu pouze na hrany jednoho směru. Tyto hrany byly nazvány jako skupina 1 (570). K odhalení opačných směrů, označených jako skupina 2 (517), bylo využito geometrického dotazování. Poslední skupina 3 představuje hrany (53) skupiny 1, ke kterým nebyly nalezeny opačné směry a jde tedy o případ, kdy hrany mají odlišnou geometrii (typicky dálnice). Ze skupiny 3 byly následně odstraněny 4 záznamy chybného napojení. Za využití funkcí *Select By Location*, *Definition Query*, nástrojů *Near*, *Add Join* a operací *Contains* a *Switch Selection* tak bylo docíleno přiřazení *flow* k 1 136 hranám, které daly vzniknout vrstvě *measured_flow* ve formátu SHP.



Obrázek 21: Vrstva *measured_flow* představující hrany (*Edge*) s údaji o reálně měřených dopravních intenzitách z CSD

Před tradičním importem kalibračních dat v podobě vrstvy *mesured_flow* do databáze (viz Export upravených dat do databáze v oddíle 3.4.4.) bylo vzhledem k datové struktuře TraMod potřeba založit nový záznam v tabulce *Dataset*, s jedinečným identifikátorem *dataset_id*, který definuje vazbu mezi jednotlivými záznamy tabulky *Measured_flow* s identickým atributem. Toho můžeme docílit dvěma způsoby - přímou editací v databázi nebo pomocí API. V tomto případě bylo zvoleno využití API funkce **POST/dataset/{model}** v sekci **dataset** o parametrech:

```
{"dataset_id": 1,
"name": "CSD2016",
"description": "CSD2016 SV/2 rozděleno do obou směrů."}
```

Informace o *dataset_id* byla následně propsána do dat tabulky *Measured_flow* ve schématu *public* odkud byl proveden import do cílového modelu pomocí skriptu *11-measured_flow.shp-to-measured_flow.sql*:

```
ALTER TABLE public.measured_flow
ADD dataset_id INT;

UPDATE public.measured_flow
SET dataset_id = 1;

INSERT INTO tm_pk_hromada.measured_flow(edge_id, flow, dataset_id)
SELECT id_edge, flow, dataset_id
FROM public.measured_flow;
```

Poslední krok spočíval v nastavení *dataset_id* příslušné OD matici v tabulce *Matrix* pomocí následujícího SQL příkazu *12-matrix-set-dataset.sql*:

```
UPDATE tm_pk_hromada.matrix
SET dataset_id = 1
WHERE matrix_id = 1;
```

3.6.3. Úprava OD matice

Před výpočtem samotné kalibrace byla provedena poslední úprava týkající se stávající OD matice. Tranzitní generátory dopravy převzaté z modelu EDIP totiž disponují kalibrovanými hodnotami cest, které není nutné dále kalibrovat, a proto došlo k vyjmutí jejich relevantní části z tabulky *ODM*. Tato část o 36 684 záznamech byla nejprve převedena do nově vytvořené tabulky *ODM_transit_part* schématu *public* a následně došlo k jejímu odstranění z původní OD matice pomocí následujících SQL příkazů obsažených v *13-odm_transit_part.sql*:

```
CREATE TABLE public.odm_transit_part AS
SELECT * FROM tm_pk_hromada.odm
WHERE matrix_id = 1
AND (source >= 1600 OR target >= 1600);

DELETE FROM tm_pk_hromada.odm
WHERE matrix_id = 1
AND (source >= 1600 OR target >= 1600);
```

Po úpravě OD matice byl zahájen proces výpočtu kalibrace pomocí funkce TraMod API dostupné v sekci **jobs** - **POST/jobs/{model}**. Ta již byla představena v oddílu 3.4.5. Nyní byl však typ úlohy (jobType) nastaven na "calibration", což vyžaduje zadání dalších parametrů týkající se kalibračního výpočtu. Veškeré kalibrační parametry (epsilon, threadsCount, maxIter a maxIterCal) byly nastaveny dle výchozích hodnot uvedených v dokumentaci TraMod API následovně:

```
{"jobType": "calibration",
"matrixName": "final_calibrated",
"datasetId": 1,
"epsilon": 10E-3,
"threadsCount": 1,
"maxIter": 10,
"maxIterCal": 10,
"action": "saveToDB",
"calMatrixName": "final_calibrated"}
```

Jak bylo zjištěno, proces kalibrace je z hlediska výpočtu velmi náročný. To vysvětluje i několik neúspěšných pokusů o její lokální výpočet[28]. Z toho důvodu došlo k vytvoření backupu[29] celého modelu uvnitř databáze a ve spolupráci s Ing. Radkem Fialou, Ph.D k jeho importu na server následovaný výpočtem kalibrace s výše popsanými parametry. Výpočet zabral celkem 4 hodiny a vyžádal si necelých 40GB výpočetní paměti.

Výsledkem kalibrace vypočtené na serveru představuje vytvoření nového záznamu v tabulce *Matrix* s *matrix_id* = 2 a názvem *final_calibrated* společně s 2 318 006 novými záznamy v tabulce *ODM* s odpovídajícím *matrix_id*. Obsahy těchto tabulek byly následně importovány zpět do lokální databáze.

Další krok spočíval ve zpětném obohacení kalibrované matice o vyjmutou tranzitní část (*ODM_transit_part*) včetně aktualizace atributu *matrix_id* = 2 odpovídající kalibrované matici. K tomu došlo za využití SQL příkazu *14-odm_transit_part-to-odm.sql*:

```
UPDATE public.odm_transit_part
SET matrix_id = 2;

INSERT INTO tm_pk_hromada.odm (source, source_node, target, target_node,
flow, matrix_id)
SELECT source, source_node, target, target_node, flow, matrix_id
FROM public.odm_transit_part;
```

3.6.4. Přiřazení kalibrované OD matice na síť

Zkompletovaná a zkalibrovaná OD matice dává prostor k závěrečnému kroku, kterým je její přiřazení k silniční síti. Tento krok, včetně získání výsledku, je podrobně popsán v oddílu 3.4.5., a v tomto případě byl realizován stejným způsobem. Jediná

[28] První pokusy byly prováděny na počítači s 8GB RAM, který nebyl schopen dokončit ani první iteraci. Další pokusy probíhaly na počítači vybaveném 16GB RAM, kde se podařilo úspěšně provést první iteraci, nicméně následně došlo k výpisu chybové hlášky.

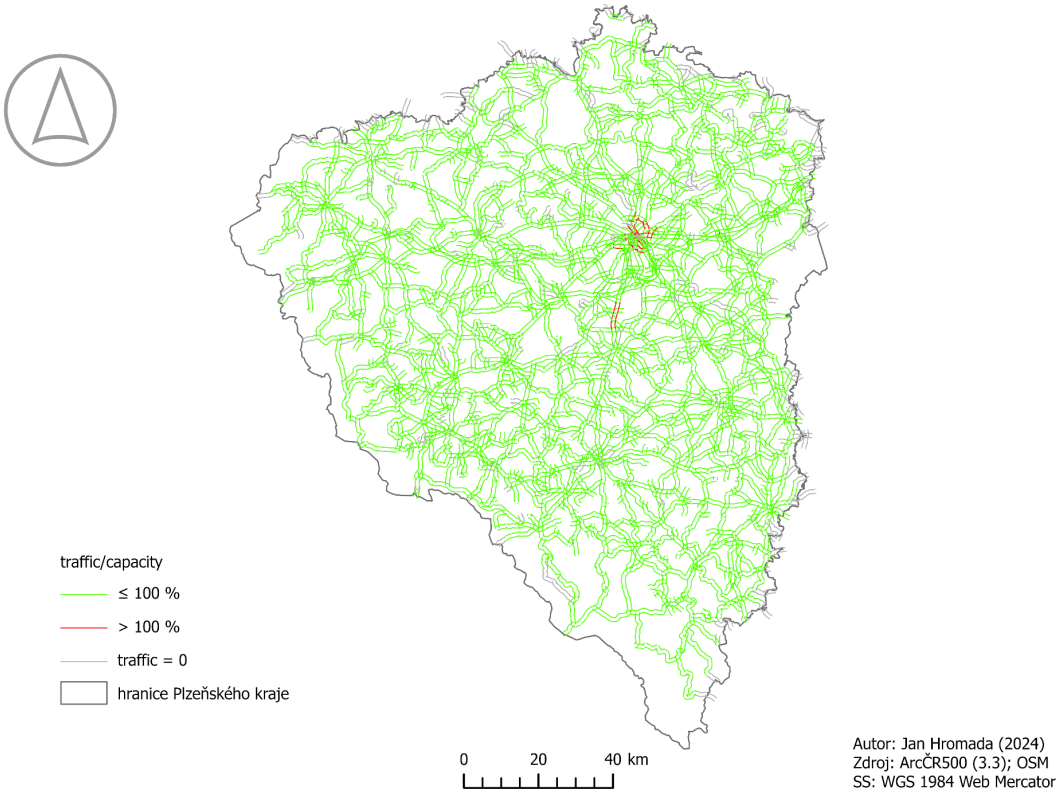
[29] Backup je v IT používaný termín označující proces vytváření kopie dat za účelem jejich přesunu, ochrany před ztrátou či poškozením. Proto můžeme backup chápat jako určitou formu zálohování dat.

rozdílnost se objevuje v parametrech úlohy *traffic*, konkrétně název matice, který nyní odkazuje na kalibrovanou OD matici s dodatečně přidanou tranzitní částí:

```
{"jobType": "traffic",
"matrixName": "final_calibrated",
"gateway": false}
```

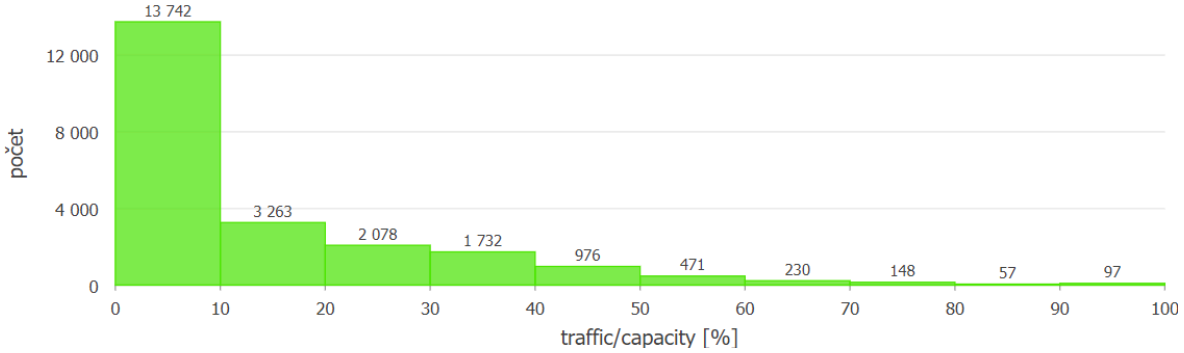
3.6.5. Výsledná analýza *traffic/capacity*

Obdobně jako tomu bylo v obou případech nekalibrovaných modelů, je na místě provést zopakování analýzy *traffic/capacity* výsledného zkalibrovaného modelu.

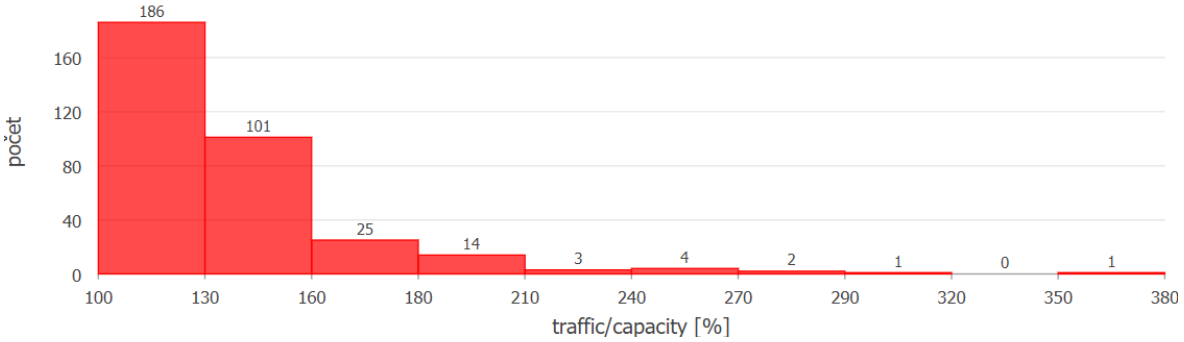


Výslednou analýzou *traffic/capacity* zkalibrovaného modelu TraMod bylo zjištěno, že 21 226 hran vyhovuje svým kapacitám ($\leq$100 %), 337 hran přesahuje své kapacity ($>$100 %) a 1 568 hran obsahuje nulový provoz ($traffic = 0$).

Obrázek 22. Výsledný poměr *traffic/capacity* [%] zkalibrovaného modelu



Obrázek 23: Výsledný histogram poměru *traffic/capacity* [%] $\leq$ 100 % zkalibrovaného modelu



Obrázek 24: Výsledný histogram poměru *traffic/capacity* [%] $>$ 100 % zkalibrovaného modelu

3.6.6. Výsledný výpočet dopravního výkonu

Stejně jako v předchozím oddílu, je nezbytné provést také kontrolní výpočet dopravního výkonu, který zachycuje následující tabulka 13.

Tabulka 13. Srovnání dopravních výkonů silniční dopravy (zaokrouhleno na celá čísla)

Typ pozemní komunikace	**Dopravní výkon (průzkum ČR) [vozokm/den]**	**Dopravní výkon (vypočtený, původní) [vozokm/den]**	**Dopravní výkon (vypočtený, po úpravách) [vozokm/den]**	**Dopravní výkon (kalibrovaný) [vozokm/den]**
silnice I. třídy	3 453 000	5 195 699	3 472 125	3 225 026
silnice II. třídy	3 226 000	6 318 617	3 368 201	3 591 861
silnice III. třídy	1 343 000	2 239 171	1 159 696	1 337 409
Celkem	**8 022 000**	**13 753 487**	**8 000 022**	**8 154 296**

3.7. Validace dopravního modelu

Po vytvoření dopravního modelu TraMod, jeho kalibraci pomocí dat CSD a verifikaci pomocí provedených analýz představených v předchozích podkapitolách, můžeme přistoupit ke kroku validace. Jedná se o proces, který ověřuje, zda model reflektuje skutečné dopravní podmínky. Cílem validace je porovnat výstupy modelu s empirickými dopravními daty tak, aby byly identifikovány případné odchylky.

3.7.1. Vstupní data

Validační data lze obecně přirovnat ke kalibračním, protože sdílejí podobné charakteristiky a význam v rámci dopravních analýz. Obě kategorie dat poskytují reprezentativní informace o skutečném stavu dopravy. Zdrojem validačních dat, která byla použita, jsou dopravní kamery dostupné z https://doprava.plzensky-kraj.cz/map/index. Tato mapová aplikace Plzeňského kraje obsahuje bodové prvky reprezentující dopravní kamery s detailními informacemi o denních a měsíčních dopravních statistikách za různé roky. Tyto statistiky jsou však prezentovány ve formátu PDF souborů. Chceme-li například získat roční statistiku jedné konkrétní kamery, je třeba projít 12 PDF souborů, což z hlediska časové náročnosti zjevně není ideální pro další zpracování a analýzu v případě většího množství dat z dopravních kamer.

V důsledku toho bylo pro tento účel využito alternativního formátu, a to otevřených dat z https://doprava.plzensky-kraj.cz/opendata/doprava/rok/, které obsahují dataset s názvem *DOPR_R_2016.zip* vztahující se k roku 2016. Obsahem tohoto datasetu je soubor *DOPR_R_2016.csv* s daty o velikosti přibližně 10GB, textový soubor *ReadME_rok.txt* s popisem struktury těchto dat a soubor s lokacemi kamer[30] *Locations.csv*. Vzhledem k velikosti těchto dat[31], které nebylo možné otevřít (natož zpracovat) pomocí tradičních nástrojů (Notepad, Excel), bylo nezbytné přistoupit ke skriptovému zpracování pomocí ArcGIS Notebooks za využití programovacího jazyka Python. Nejprve je ale třeba představit strukturu těchto dat a klíčových atributů vypadajících následovně:

[30] Soubor s lokacemi kamer neobsahuje jejich geometrickou polohu v podobě souřadnic.

[31] Problematika objemných dat náročných na zpracování je označována jako “Big data”.

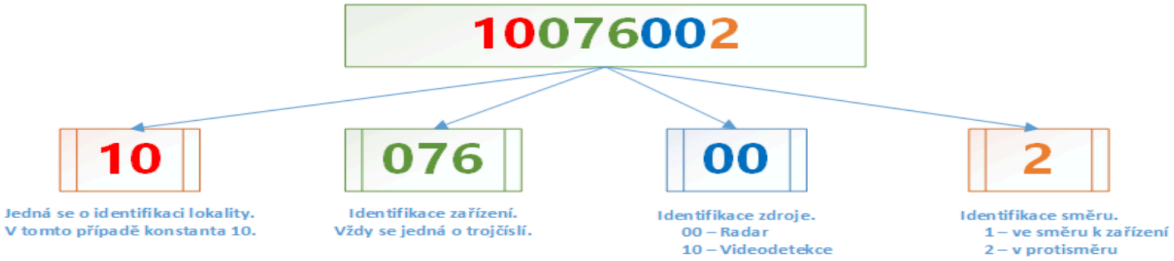
IdDetektor	DatumCas	Intenzita	IntenzitaN	Obsazenost	Rychlost	Stav	TypVozidla	Trvani100	RychlostHistorie	TypVozidla10
1E+07	05.03.2019 0:00	1	1.00	100.00	16.00	0	2	0		2
1E+07	05.03.2019 0:00	1	3.00	100.00	16.00	0	4	30	0,16;1,35;2,38;3,41;4,42;5,42;6,43;7,45;8,46;9,47;10,48;"	8

Obrázek 25: Struktura validačních dat

IdDetektor

IdDetektor je konstruován jako *<10><IdZarizeni><IdDetektoru>*, kde *IdZarizeni* je vždy 3 místné číslo a *IdDetektoru* se skládá z *<10><smer>*, kde *smer* = 1 představuje měření kamery ve směru a *smer* = 2 v protisměru.

Atribut *IdDevice* je obsahem souboru *Locations.csv* a je konstruován jako *<KP><IdZarizeni>*.



Obrázek 26: Příklad atributu *IdDetektor*

10 Konstanta

076 Janovice nad Úhlavou, směr od Německa (*KP076*) viz. soubor *Locations.csv*, řádek s identifikátorem „*KP076*“

00 Zdrojem dat je Radar[32]

2 Měřeno v protisměru

[32] V případě datasetu 2016 obsahují všechny záznamy identifikaci zdroje = 10 (videodetekce) - ověřeno.

DatumCas

Atribut s časový údajem průjezdu vozidla ve formátu *den/měsíc/rok hodina/minuta/sekunda*. Jednoznačný identifikátor záznamu je kombinace *IdDetektor* a *DatumCas*.

Intenzita a IntenzitaN

Intenzita je jednotkový počet vozidel za časovou jednotku. *IntenzitaN* představuje normovaný počet vozidel dle stanovených vah. Pro účely validace byl však postačující atribut *Intenzita*.

Představená datová struktura a popis klíčových dat je průnikem popisu, který je součástí validačního datasetu, a popisu poskytnutým správci dat – Krajským úřadem Plzeňského kraje (KÚPK). Těmi byl zároveň poskytnut podrobnější přehled kamer k roku 2016 včetně jejich GPS lokací.

3.7.2. Zpracování vstupních dat

Jak již bylo naznačeno, zpracování proběhlo v prostředí ArcGIS Notebooks. Pro účely validace bylo rozhodnuto extrahovat pouze data dopravních kamer měřená ve směru k zařízení, tedy *smer* = 1.V první řadě proběhla kontrola skutečné struktury dat s jejím popisem, a to výpisem prvních tří řádků pomocí první části skriptu s názvem *02-Validation-dataset.ipynb*:

```
import pandas as pd
import csv
from datetime import datetime
import calendar

# Vstupní CSV souboru
csv_file = 'cesta ke vstupnímu souboru' # (DOPR_R_2016.csv)
# Načtení prvních 3 řádků CSV souboru
with open(csv_file, 'r', encoding='utf-8') as file:
    for i in range(3):
        line = file.readline()
        print(line)
```

```
10051101|"2016-12-01
00:02:06.174"|1|1.00|100.00|74.00|0|2|1|"0,74;1,77;2,80;3,81;4,81;5,82;6,84
;7,84;"|2

10051101|"2016-12-01
00:02:34.520"|1|1.00|100.00|47.00|0|2|2|"0,47;1,48;2,49;3,49;4,49;5,48;6,48
;7,48;8,47;9,48;10,49;"|2
```

```
10051101|"2016-12-01
00:03:53.758"|1|1.00|100.00|50.00|0|2|9|"0,50;1,54;2,55;3,55;4,55;5,55;6,54
;7,54;8,50;9,50;10,56;"|2
```

Ze struktury dat je patrné, že oddělovačem atributů je znak "|". V dalším kroku byl vytvořen seznam veškerých kamer v podobě identifikátorů *IdDevice*:

```
iddevice = [
"KP117", "KP118", "KP119", "KP120", "KP108", "KP082", "KP055", "KP109",
"KP056", "KP081", "KP110", "KP111", "KP051", "KP106", "KP105", "KP066",
"KP067", "KP068", "KP091", "KP061", "KP062", "KP069", "KP070", "KP121",
"KP090", "KP071", "KP122", "KP053", "KP078", "KP077", "KP072", "KP073",
"KP059", "KP058", "KP112", "KP114", "KP113", "KP075", "KP076", "KP102",
"KP123", "KP125", "KP124", "KP130", "KP128", "KP127", "KP129", "KP126",
"KP057", "KP088", "KP089", "KP080", "KP079", "KP084", "KP098", "KP099",
"KP083", "KP084", "KP115", "KP131", "KP132", "KP103", "KP133", "KP092",
"KP134", "KP093", "KP060", "KP116", "KP107", "KP094", "KP064", "KP065",
"KP104", "KP100", "KP085", "KP101", "KP136", "KP135", "KP095", "KP096",
"KP074", "KP097", "KP086", "KP063", "KP052", "KP054", "KP199", "KP200",
"KP203", "KP201", "KP202", "KP193", "KP192", "KP196", "KP198", "KP195",
"KP204", "KP191", "KP194","KP197", "KP205", "KP206"]
```

Pro identifikaci kamer v otevřených datech bylo nezbytné definovat jejich seznam v podobě identifikátorů *IdDetektor* ve směru ke kameře na základě výše uvedeného popisu:

```
iddetektor_A = [
10117101, 10118101, 10119101, 10120101, 10108101, 10082101, 10055101,
10109101, 10056101, 10081101, 10110101, 10111101, 10051101, 10106101,
10105101, 10066101, 10067101, 10068101, 10091101, 10061101, 10062101,
10069101, 10070101, 10121101, 10090101, 10071101, 10122101, 10053101,
10078101, 10077101, 10072101, 10073101, 10059101, 10058101, 10112101,
10114101, 10113101, 10075101, 10076101, 10102101, 10123101, 10125101,
10124101, 10130101, 10128101, 10127101, 10129101, 10126101, 10057101,
10088101, 10089101, 10080101, 10079101, 10084101, 10098101, 10099101,
10083101, 10084101, 10115101, 10131101, 10132101, 10103101, 10133101,
10092101, 10134101, 10093101, 10060101, 10116101, 10107101, 10094101,
10064101, 10065101, 10104101, 10100101, 10085101, 10101101, 10136101,
10135101, 10095101, 10096101, 10074101, 10097101, 10086101, 10063101,
10052101, 10054101, 10199101, 10200101, 10203101, 10201101, 10202101,
10193101, 10192101, 10196101, 10198101, 10195101, 10204101, 10191101,
10194101, 10197101, 10205101, 10206101]
```

Na základě apriori, kdy jednoznačným identifikátorem záznamu je kombinace atributů *IdDetektor* a *DatumCas*, došlo k sestavení kódu, který postupně prochází soubor *DOPR_R_2016.csv* za účelem filtrace záznamů s požadovanými atributy příslušné

kamery. Vyfiltrovaná data každé kamery následně extrahuje a ukládá jako samostatný soubor *CSV* s názvem *IdDevice*. Výstupem je 101 *CSV* souborů představující data dopravních kamer s atributy *IdDetektor*, *DatumCas* a *Intenzita* za rok 2016.

```
print("\n\nSTART: " + datetime.now().strftime("%d.%m.%Y %H:%M:%S"))
print()

# Vstupní CSV souboru
csv_file = 'cesta ke vstupnímu souboru' # (DOPR_R_2016.csv)

# Stanovení počtu řádků pro načítání najednou
chunksize = 10000

#
for detektor, kamera in zip(iddetektor_A, iddevice):
    selected_columns = []  # Resetování seznamu pro každou kameru
           for chunk in pd.read_csv(csv_file, header=None, sep='|',
chunksize=chunksize, usecols=[0, 1, 2]):
                    filtered_chunk = chunk[(chunk[0] == detektor) &
chunk[1].str.contains('2016-')]
        selected_columns.append(filtered_chunk)

    # Spojení vybraných částí do jednoho DataFrame
    selected_df = pd.concat(selected_columns)

     # Uložení filtrovaných záznamů do nového CSV souboru s oddělovačem “|”
a názvem IdDevice
      output_file = f'cesta k výstupnímu souboru\{kamera}.csv' # Definice
výstupního souboru
    selected_df.to_csv(output_file, index=False, sep='|', header=False)
    print(f"{kamera} zpracováno")

print("Extrakce záznamů dokončena.")
print("\n\nEND: " + datetime.now().strftime("%d.%m.%Y %H:%M:%S"))
```

Pro další účely byl žádoucí výpočet celkového počtu projetých vozidel v podobě součtu atributu *Intenzita* pro každou dopravní kameru zvlášť. Ověřením bylo zjištěno, že *Intenzita* je vždy $= 1$, a tedy jeden záznam z otevřených dat odpovídá jednomu průjezdu vozidla. Důležité bylo také určit počet dní v roce, ve kterých kamera pořizovala záznamy. Zde bylo stanoveno kritérium, že den s minimálně jedním záznamem se počítá do celkového počtu dnů, kdy byla kamera aktivní. Například, pokud kamera během 360 dní zaznamenala 100 000 průjezdů (v přestupném roce 2016), znamená to, že byla v provozu 360 u 366 dnů, což představuje přibližně 98 %. Nezapočítané dny, kdy kamera nezaznamenávala žádná vozidla, mohly být ovlivněny dopravními

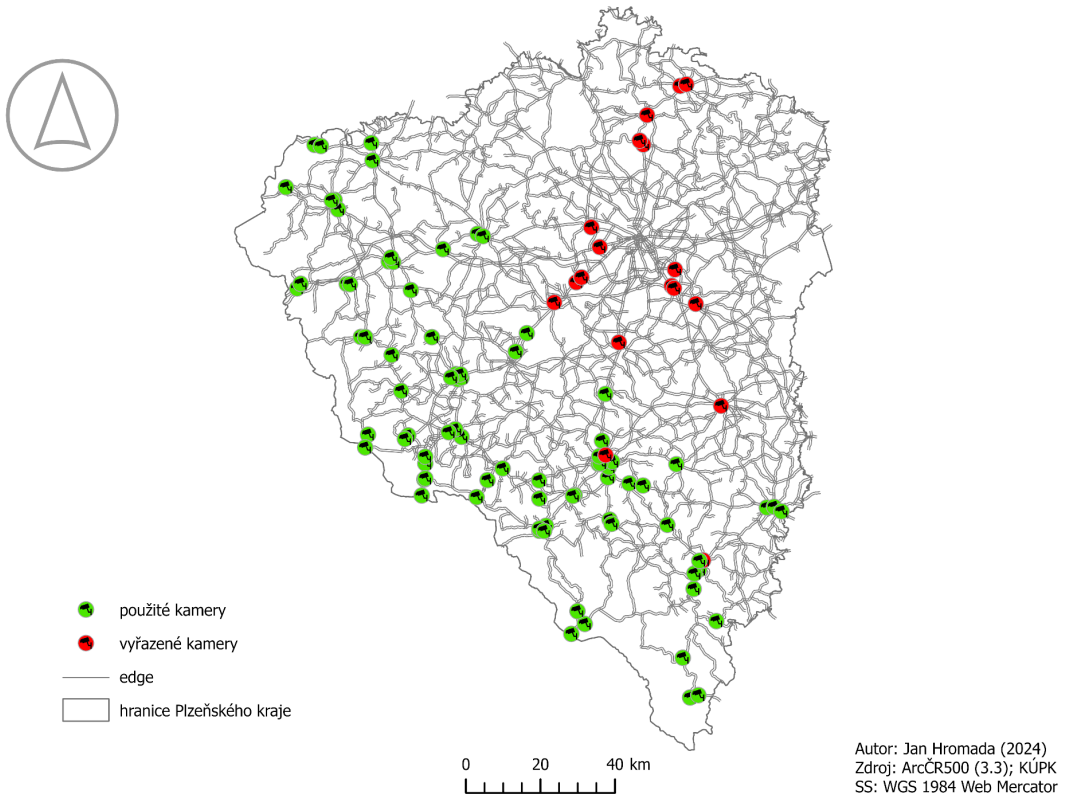
uzavírkami nebo technickými problémy kamery, což z dat není zřejmé. V případě dopravních uzavírek je třeba upozornit na důsledek, kterým je nárůst dopravy v jiných místech. Tento fakt rovněž nelze z použitých dat určit. Určení ročních dopravních intenzit kamer a počtu aktivních dnů vyjádřených v % vůči celkovému počtu dní v roce (366) bylo provedeno na základě druhé části skriptu.

```
# Definice finálního souboru
output_filename = 'cesta k finálnímu souboru\FINAL.csv'

# Funkce suma
def compute_sum(filename):
    total_sum = 0
    with open(filename, 'r') as file:
        reader = csv.reader(file)
        for row in reader:
            values = row[0].split('|')
            total_sum += float(values[2])
    return total_sum

index = 0
for detektor, kamera in zip(iddetektor_A, iddevice):
     input_filename = 'cesta k CSV soubor kamery\\'+kamera+'.csv' # cesta k
jednotlivé CSV kameře
    with open(input_filename, 'r') as csvfile:
        reader = csv.reader(csvfile, delimiter='|')

        # Množina pro ukládání aktivních dnů
        unique_dates = set()

        for row in reader:
            # Získání data z řádku a převod na formát Datetime
                date_str = row[1].split()[0]  # datum je na druhém indexu,
rozdělíme ho podle mezer
            date = datetime.strptime(date_str, '%Y-%m-%d')

            # Přidání dat do množiny aktivních dnů
            unique_dates.add(date)

      # Vytvoření množiny obsahující všechny dny v roce 2016 (366 dnů -
přestupný rok)
    all_dates_2016 = set()
    for month in range(1, 13):
        days_in_month = calendar.monthrange(2016, month)[1]
        for day in range(1, days_in_month + 1):
            all_dates_2016.add(datetime(2016, month, day))
```

```
    # Vypočítání podílu aktivních dnů v roce 2016
    percentage = (len(unique_dates) / len(all_dates_2016)) * 100
    index = index + 1
                    print(f"{kamera}     ({index}/{len(iddevice)})     měřila
{len(unique_dates)}/{len(all_dates_2016)} -> {percentage:.2f}%")

    total_sum = compute_sum(input_filename)

    # Získání hodnoty pro první sloupec
    with open(input_filename, 'r') as file:
        first_row = next(csv.reader(file))[0].split('|')
        first_column_value = first_row[0]

    # Zápis do výstupního souboru
    with open(output_filename, 'a', newline='') as file:
        writer = csv.writer(file, delimiter=',')
             writer.writerow([kamera, first_column_value, round(total_sum),
round(percentage, 2)])
```

Výstupem je soubor *FINAL.csv*, obsahující oba identifikátory kamer (*IdDevice* a *IdDetektor*), součty dopravních intenzit a procentuální vyjádření aktivit kamer.

Posledním krokem zpracování validačního datasetu bylo propojení výstupů *FINAL.csv* s geometriemi kamer. Ty byly získány pomocí ArcGIS Pro nástroje *XY Table to Point*, který převedl GPS souřadnice poskytnuté KÚPK do bodové třídy prvků. Následně pomocí nástroje *Add Join* došlo k provazbě na základě atributu *IdDevice* a přenosu dat z *CSV* souboru. Dále pomocí *Calculate Field* byly z % vyjádření vypočteny počty aktivních dnů kamer, ze kterých společně se součty intenzit dopravy došlo k výpočtu denních dopravních intenzit, a to $\frac{součet\ dopravních\ intenzit}{počet\ aktivních\ dnů}$ [voz/den]. Na závěr bylo stanoveno kritérium vylučující dopravní kamery v případě, že počet jejich aktivních dnů je < 95 %. Toto kritérium nesplňovalo celkem 18 kamer, z nichž většina zároveň disponovala nulovými intenzitami dopravy. Cílem tohoto kritéria bylo vyloučení kamer s nedostatečným charakterem dat. Výsledkem je vrstva *Validation_dataset* o celkovém počtu 83 dopravních kamer.



Obrázek 27: Validační dataset v podobě dopravních kamer Plzeňského kraje

3.7.3. Problematika vstupních dat

Problematika dat dopravních kamer Plzeňského kraje byla částečně představena v předchozím oddílu. V rámci zpracování dat však došlo k nahodilému porovnání otevřených dat s formáty PDF, které odhalilo nesrovnalosti mezi dvěma zdánlivě totožnými datovými sadami. Z toho důvodu došlo k obrácení se na poskytovatele dat, který data ve formátu PDF označil za informativní a otevřená data za závazná.

Další problém se týká prostorového rozmístění dopravních kamer, které je znázorněno na obrázku 26. Datové výstupy se týkají projektu zvaného *Klidné příhraničí*, respektive části *Systém sběru informací o průjezdu a měření rychlosti vozidel na území Plzeňského kraje*, do kterého bylo původně zapojeno 42 obcí, především z oblasti Klatovska, Domažlicka a Tachovska (více informací na https://doprava.plzensky-kraj.cz/site/about). Takové prostorové rozložení dopravních kamer bezprostředně omezuje možnost validace dopravního modelu v rozsahu Plzeňského kraje pouze na tato specifická místa.

3.7.4. GEH statistika

GEH statistika představuje pro dopravní inženýry tradiční statistický nástroj sloužící k vyhodnocení dopravních modelů. Název GEH je odvozen od jeho autora Geoffreyho E. Harvese a používá se jako kritérium přijatelnosti v porovnání objemů dopravních provozů. GEH statistika je definována jako

$$GEH = \sqrt{\frac{2 \cdot (m-o)^2}{(m+o)}}$$

kde m představuje modelovanou intenzitu dopravy a o pozorovanou, empiricky získanou, dopravní intenzitu. V obou případech, jak modelovaných, tak pozorovaných intenzit, by se aplikace GEH měla provádět v hodinových jednotkách intenzit dopravy, nikoliv denních. Výsledkem GEH statistiky je bezrozměrné číslo, reprezentující míru shody mezi modelovanými a měřenými daty (Melzer a kol., 2017; Aimsun, 2024).

Aimsun (2024) uvádí, že pro použití GEH statistiky by měla být stanovena následující kritéria dle britský směrnic, a to:

$\text{GEH} < 5$	dobrá shoda
$5 \leq \text{GEH} < 10$	přijatelné; vyžaduje prošetření
$\text{GEH} \geq 10$	nepřijatelné

Metodika pro tvorbu a vyhodnocování dopravních modelů (Melzer a kol., 2017) ke kritériu přistupuje poněkud přísněji. Uvádí, že $\text{GEH} < 5$ by měla nastávat u > 85 % případů. Z této metodiky vychází i lokální studie tvorby dopravního modelu města Bílovce navíc obsahující kritérium pro 24 hodinové intenzity, kdy $\text{GEH} < 10$ by měla nastat u > 45 % případů (Centrum dopravního výzkumu, 2022). Pro účely validace této závěrečné práce bylo využito kritérií dle metodiky Aimsun (2024).

Převedení na dopravních intenzit

Vzhledem k výše představeným důvodům byl proveden přepočet celodenních dopravních intenzit z modelu TraMod a validačního datasetu představujícího dopravní kamery Plzeňského kraje na intenzity špičkové hodnoty. Podle běžné praxe v dopravním inženýrství se hodnoty pro špičkovou hodnotu obvykle určují jako 10% podíl z 24 hodinové intenzity, a proto špička $= \frac{24\ hodinová\ dopravní\ intenzita}{10}$.

3.7.5. Validace dopravního modelu TraMod

Validaci dopravního modelu TraMod rozumíme provedení GEH statistiky mezi výslednými modelovanými dopravními intenzitami TraMod ($flow_{TraMod}$) vůči intenzitám dopravních kamer Plzeňského kraje ($flow_{PK}$) v dopravní špičce, a tedy $m = flow_{TraMod}$ a $o = flow_{PK}$.

V první řadě bylo nezbytné ztotožnit hrany modelu TraMod se silničními úseky měřenými dopravními kamerami Plzeňského kraje v ArcGIS Pro. Informace o směru, ve kterém kamera měří je uchována v textovém atributu *smer*[33] (například "od Klatov"). Za využití podkladové mapy ESRI zvané "*Navigation*"[34] došlo k projití všech 83 poloh kamer a ručnímu přiřazení nejbližší hrany odpovídajícího směru. Při přiřazování bylo rovněž využito vizualizace směru hran uložené v geometrii *Edge*. Z důvodu možných geometrických překryvů hran (případ obousměrných silničních úseků kromě dálnic) bylo nutné nastavit *Offset* linie, aby došlo k vizualizaci obou směrů. Tímto způsobem byl každé dopravní kameře přiřazen příslušný atribut *edge_id*, na základě kterého došlo k propojení pomocí nástroje *Add Join* s vrstvou hran a přenosu atributu $flow_{TraMod}$. Na závěr bylo vytvořeno nové atributové pole *GEH_TraMod* a pomocí nástroje *Calculate Field* definována formule GEH statistiky pomocí jazyka Python. Podrobné výsledky GEH statistiky dopravního modelu TraMod jsou obsahem přílohy B1.

Tabulka 14: Výsledek statistiky GEH dopravního modelu TraMod

Počet validačních míst	83
$GEH < 5$	35
$5 \leq GEH < 10$	30
$GEH \geq 10$	16
$flow_{TraMod} = 0$	2
$GEH < 10$	**80,25 %**

3.7.6. Validace dopravního modelu EDIP

Obdobně jako v případě předchozí validace je aplikována GEH statistika na modelované intenzity, tentokrát modelu EDIP ($flow_{EDIP}$), a intenzity pozorované ($flow_{PK}$). Před provedením validace toho modelu je ale nezbytné jej podrobněji představit.

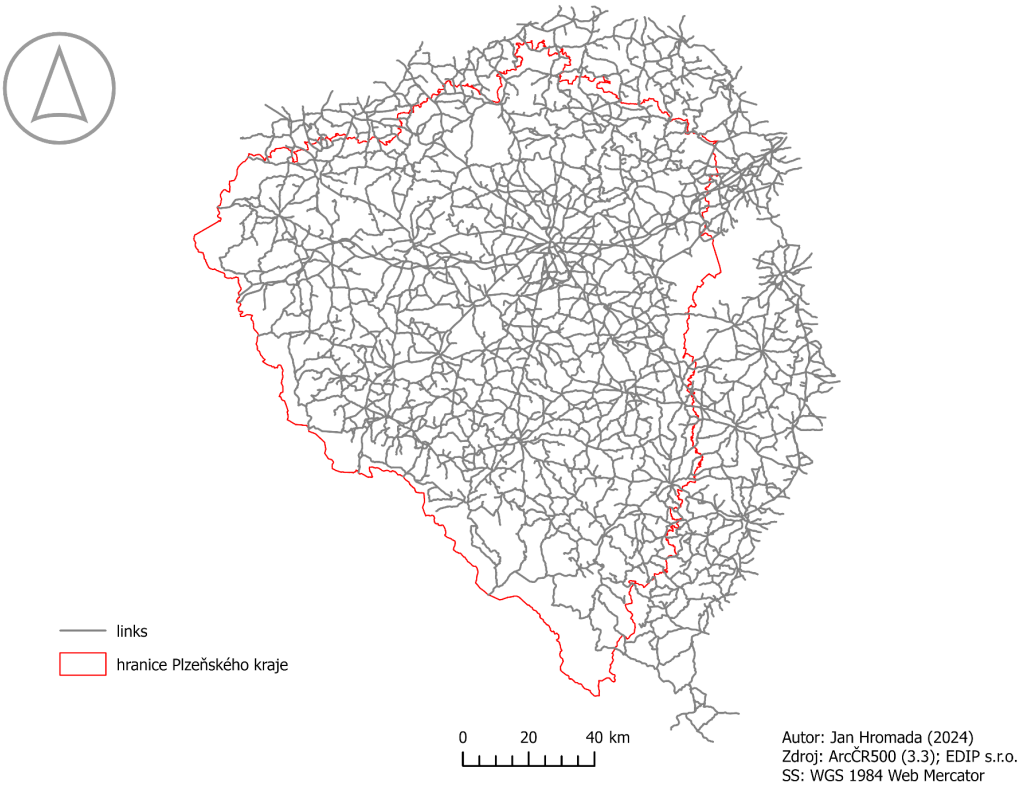
[33] Tento atribut je obsahem podrobnějšího přehledu dopravních kamer Plzeňského kraje poskytnutým KÚPK.

[34] Jedná se o výchozí podkladovou mapu ESRI, kterou lze v softwaru ArcGIS Pro do mapového okna přidat prostřednictvím horní lišty menu - *Map* - *Basemap* (sekce Layer) - *Navigation*.

Jak již bylo uvedeno v podkapitole 3.1., společnost EDIP s.r.o. poskytla dopravní model Plzeňského kraje k roku 2016, který byl vytvořen v softwaru OmniTRANS. Podle dostupných informací tento model původně vychází z celostátního dopravního modelu.

Dopravní model EDIP Plzeňského kraje se skládá ze zón (*areas*) a jejich centroidů (*centroids*), silničních úseků a konektorů (*links*), uzlů (*nodes*) a sčítačů (*counts*). Generátory dopravy, které představují zóny a jejich centroidy, vychází z administrativních území základních sídelních jednotek (ZSJ). Silniční síť je tvořena dálnici, silnicemi I., II. a III. třídy a dopravně významnými místními komunikacemi. Konektory jsou součástí vrstvy *links* rozlišených atributy a jedná se fiktivní linie představující vazbu mezi generátory dopravy a silniční sítě. Křižovatky jsou definovány bodovou vrstvou uzlů definující jak směrovost silničních úseků, tak i jejich geometrický význam – jde o hrany od křižovatky ke křižovatce. Dopravní model je kalibrován na základě dat z CSD 2016 a polohy jednotlivých sčítačů dopravy jsou reprezentovány vrstvou *counts* (EDIP, 2017).

Mezi klíčové atributy tohoto modelu patří jednoznačný identifikátor uzlů *NODENR*. Ten je ve vrstvě *links* reprezentován počátečním uzlem hrany (*ANODE*) a koncovým uzlem hrany (*BNODE*). *LINKNR* slouží jako unikátní identifikátor pro vrstvu *links*. Celodenní intenzity dopravy jsou uloženy ve vrstvě hran, a to v atributech beroucí v úvahu jejich směrovou závislost. Atributy *LOADA*, *LOADAB_2* a *LOADAB_3* reprezentují osobní dopravu, lehkou nákladní dopravu a těžkou nákladní dopravu ve směru *A-B*. Opačný směr *B-A* je zaznamenán analogicky v atributech *LOADBA*, *LOADBA_2*, *LOADBA_3* odpovídající stejný kategoriím dopravy jako v případě směru *A-B*.



Obrázek 28: Rozsah silniční sítě (*links*) dopravního modelu EDIP

Vzhledem k tomu, že EDIP model rozlišuje v atributech hran směr i dopravní intenzitu podle tří kategorií vozidel, došlo k součtu jednotlivých hodnot podle patřičných směrů tak, že:

$$\text{směr } A = LOADAB + LOADAB_2 + LOADAB_3$$

$$\text{směr } B = LOADBA + LOADBA_2 + LOADBA_3$$

Součty 24 hodinových dopravních intenzit byly následně převedeny na hodnoty dopravních špiček, tj. $\frac{\text{směr } A}{10}$, respektive $\frac{\text{směr } B}{10}$. Celodenní dopravní intenzity byly převedeny na hodnoty odpovídající špičkám, tj. $\frac{\text{směr } A}{10}$, respektive $\frac{\text{směr } B}{10}$. V modelu EDIP jsou směry hran definovány pomocí atributů (na rozdíl od geometrického určení v modelu TraMod), což znamená, že jedna hrana může reprezentovat oba směry rozlišené atributy. Tato vlastnost usnadnila identifikaci hran s validačními polohami dopravních kamer pomocí nástroje *Near*, který provázal nejbližší hrany s kamerami. Směrování hran je navíc, stejně jako v modelu TraMod, reprezentováno pořadím uzlů, přičemž v geometrii hran modelu EDIP je vždy zachycen směr A. To umožnilo vizualizaci směru A a následné rozhodování o tom, zda dopravní kamera zaznamenává směr A nebo B. Na

základě ztotožnění směru kamera - hrana, došlo k přiřazení příslušného $flow_{EDIP}$. Podrobné výsledky GEH statistiky dopravního modelu EDIP jsou obsahem přílohy B2.

Tabulka 15: Výsledek statistiky GEH dopravního modelu EDIP

Počet validačních míst	83
$GEH < 5$	40
$5 \leq GEH < 10$	25
$GEH \geq 10$	15
$flow_{EDIP} = 0$	3
$GEH < 10$	**81,25 %**

3.7.7. Validace dopravní modelu TraMod vůči EDIP

Poslední validace je zaměřená na dopravního modely TraMod a EDIP. V případě této validace byla GEH statistika použita pro porovnání modelované dopravy $flow_{TraMod}$ a pozorované dopravy $flow_{EDIP}$.

Aby bylo možné zajistit srovnatelnost výsledků mezi jednotlivými validacemi, nedošlo v rámci validace modelu TraMod vůči EDIP k žádné změně validačních míst. Tato místa tak odpovídají lokacím dopravních kamer a jsou zachovány i jejich měřené směry. V důsledku předchozích validací, kdy byly dopravní kamery ztotožněny s hranami modelů TraMod a EDIP, došlo rovněž ke ztotožnění těchto hran mezi sebou. To umožňuje k přechodu aplikace GEH statistiky. Podrobné výsledky GEH statistiky mezi dopravními modely TraMod a EDIP jsou obsahem přílohy B3.

Tabulka 16: Výsledek statistiky GEH dopravního modelu TraMod a modelu EDIP

Počet validačních míst	83
$GEH < 5$	35
$5 \leq GEH < 10$	30
$GEH \geq 10$	13
$flow_{TraMod} = 0$ $flow_{EDIP} = 0$	5
$GEH < 10$	**83,33 %**

4. Dosažené výsledky a jejich diskuse

Většina výsledků této práce je podrobně popsána již v jejím průběhu. Nejzásadnější výsledky jsou však spatřovány zejména v oddílech 3.7.5., 3.7.6. a 3.7.6., kde byla provedena validace GEH statistikou mezi dopravním modelem TraMod a daty dopravních kamer Plzeňského kraje; dopravním modelem EDIP a daty dopravních kamer Plzeňského kraje a mezi dopravními modely TraMod a EDIP. Podrobné výsledky těchto validací GEH statistikou jsou součástí příloh B1, B2 a B3. Vzhledem ke skutečnosti, že byla validace provedena na identických místech ve všech třech případech validací, tj. polohy dopravních kamer Plzeňského kraje, je možné validační výsledky porovnat mezi sebou. Z hlediska tohoto porovnání bylo stanoveno kritérium GEH < 10 zahrnující jak dobrou shodu mezi modelovanými a naměřenými intenzitami, tak jejich relativně přijatelné výsledky. Tato hodnota je pro jednoduchost vyjádřena procentuálně z celkového počtu míst vstupujících do GEH statistiky (viz tabulky 14,15, 16, resp. tabulka 17 níže). V případě, že validační místo obsahuje nulovou hodnotu, tj. hodnota *flow* je v jednom z modelovaných či naměřených dopravních intenzit rovna 0, je z validace GEH statistikou vyřazeno.

Tabulka 17: Porovnání validačních výsledků GEH statistikou

TraMod	GEH < 10	**80,25 %**
EDIP	GEH < 10	**81,25 %**
TraMod - EDIP	GEH < 10	**83,33 %**

Na základě porovnání, které je shrnuto v tabulce 17 je možné provést zhodnocení jejich kvality vůči validačnímu datasetu a mezi sebou. V kritériu GEH < 10 vykazují všechny provedené validaci podobný výsledek. Vzhledem k představené problematice validačního datasetu, týkající se zejména prostorového rozložení, je však vhodné validaci TraMod a validaci EDIP podrobit přezkoumání. Z výsledků třetí validace TraMod – EDIP však lze říci, že vytvořený model je možné v praxi použít obdobně jako dopravní model EDIP, jelikož vykazují nejvyšší shodu a nejsou ovlivněny validačním datasetem. To však vzhledem k zjednodušenému postupu tvorby vytářeného modelu nevylučuje možnost, né-li nutnost přezkoumání. Podrobné výsledky jednotlivých validací, včetně výstupů v podobě tabulek obsahující označení validačních míst, identifikátory kamer, hodnoty špičkových dopravních intenzit a výsledných hodnot GEH statistik společně s mapovými výstupy je možné nalézt v přílohách B1, B2 a B3.

Dopravní model vytvořený v software TraMod disponuje několika nedostatky, které připadají v úvahu pro jeho další optimalizaci. Jedním z nich je absence reprezentace silničního úseku, jakožto hrany od křižovatky ke křižovatce, což komplikuje správné přiřazení generátorů dopravy k nejbližším uzlům. Tyto uzly nemusí vždy odpovídat křižovatkám, ale mohou představovat začáteční, respektive koncový, bod dané hrany. Důsledkem toho může docházet k nerovnoměrné distribuci dopravy v rámci jednotlivých úseků silnice tvořených několika hranami, kdy zóny generující dopravu nejsou přiřazeny celému úseku, ale pouze jeho části. V tomto bodě by také bylo vhodné zvážit změnu ukládání směrovosti hran, která je v současnosti realizována pomocí identifikátorů počátečního (*source*) a koncového (*target*) uzlu. Efektivním způsobem by byla například implementace logiky, kde směr A hrany by byl reprezentován jedinečným identifikátorem id a opačný směr B této hrany bude $id + 100\ 000$. Zapracování této implementace by značně usnadnilo identifikaci hran, zejména v rámci kalibračních a validačních datasetů.

Další prostor pro zlepšení představuje krok *Trip Generation*, jehož počáteční výpočet byl odvozen od počtu obyvatel jednotlivých částí obcí a následně zpřesňován pomocí údajů z celostátního průzkumu dopravního výkonu. Avšak tento krok byl úmyslně zjednodušen, jelikož hlavním cílem této závěrečné práce nebylo detailní modelování vzniku cest.

Další identifikovaná nevýhoda se týká dat kalibračního datasetu, která vzhledem k charakteristice silniční sítě TraMod, kde každý směr je reprezentován jako samostatný úsek, bylo nezbytné rozdělit symetricky mezi oba modelované směry. To může vést k potenciálnímu zkreslení těchto údajů. Alternativní způsob, jak se s tímto problémem v rámci využitých dat vypořádat, nebyl nalezen.

Z analýz poměru intenzity dopravy a kapacity zkalibrovaného modelu (viz obrázky 13, 16, 21) vyplývá, že v hustě zastavěných oblastech dochází k významnému překračování kapacit hran, zejména centrum města Plzně, které v tomto ohledu představuje značný problém. Toto překračování je pravděpodobně způsobeno hrubou granularitou generátorů dopravy v těchto oblastech. Konkrétně mohou jednotlivé části obcí ve velkých městech představovat vysoký počet cest přiřazených jednomu uzlu, což může vést k lokálnímu přetížení dopravní sítě. Jedním z možných řešení tohoto problému by bylo zavedení jemnější granularity zón, například formou základních sídelních jednotek (ZSJ), v těchto problematických oblastech.

Další návrhy na zlepšení se zaměřují na funkcionalitu API TraMod. V průběhu procesu kalibrace byla z OD matice odstraněna část týkající se tranzitní dopravy, která

byla po dokončení kalibračního procesu reintegrována. Pro zefektivnění tohoto procesu by bylo vhodné umožnit kalibraci pouze vybrané části matice, například umožnit vyloučení specifických zón z kalibrace. Dále by bylo vhodné změnit název kalibračního parametru z názvu matice (*matrix_name*) na identifikátor matice (*matrix_id*), což by přispělo k lepší identifikaci matic při zadávání parametrů. Aktuální metoda přepínání aktivní matice, která využívá atribut *is_default* (*True*; *False*) v databázi nebo API, rovněž není optimální. Taktéž je potřeba zmínit dokumentaci API, zvláště v oblasti kalibračních parametrů a parametrů funkce *Trip_distribution*, kde není vždy zřejmé, proč jsou výchozí parametry takové, jaké jsou.

V rámci problematiky validačního datasetu pro dopravní modely TraMod a EDIP je možné identifikovat několik klíčových problémů. Prvním z nich je nedostatečné prostorové rozložení dat, které se primárně soustředí na oblast jihozápadního pohraničí. To omezuje možnost validace dopravního modelu na tato specifická místa a nedokáže komplexně pokrýt celý region Plzeňského kraje. Druhým problémem je nezachycení změn v proudění dopravy způsobených dopravními uzavírkami, které mohou vést k nárůstu dopravy v jiných oblastech. Tento faktor není možné v datech validačního datasetu adekvátně podchytit, což může vést k nepřesnostem při validaci obou modelů. Třetím aspektem jsou nesrovnalosti ve formátech validačních dat, kde dvě zdánlivě totožné datové sady vykazují určité rozdíly.

Současná struktura validačního datasetu zároveň stanovuje pevně určená validační místa na základě rozmístění dopravních kamer. V ideálním případě by bylo vhodné vybírat místa pro validaci tak, aby korespondovala s kalibračními místy nebo aby se nacházela nejdále na místech křižovatku vzdálených, což by zvýšilo relevanci a přesnost validace. Přestože současný validační dataset částečně splňuje tato kritéria, existují i případy, kdy tato optimální rozmístění nejsou dodržena.

Závěr

Výsledkem této diplomové práce je vytvoření zkalibrovaného dopravního modelu Plzeňského kraje v softwaru TraMod. Tento model byl následně podroben dvojí validaci s využitím veřejně dostupných dat z dopravních kamer Plzeňského kraje a existujícího dopravního modelu EDIP. Vzhledem k nabízející se možnosti validace modelu EDIP a dopravních kamer byla pro možnost porovnání provedena i tato validace. Validační výsledky včetně jejich porovnání jsou prezentovány prostřednictvím mapových a tabulkových výstupů.

Aby bylo možné dosáhnout tohoto cíle, bylo nejprve potřeba definovat základní pojmy z teorie systémů, které s problematikou modelování dopravy neodmyslitelně souvisejí. Této části byla věnována první kapitola.

Ve druhé kapitole došlo k definici dopravního modelu a představení různých typů dopravních modelů. Součástí této kapitoly je také klíčová část popisující metodiku makroskopického dopravního modelování, zejména principu čtyřstupňového dopravního modelu.

Třetí kapitola byla změřena na aplikaci metodiky tvorby čtyřstupňového makroskopického dopravního modelu v podobě vytvoření dopravního modelu Plzeňského kraje za využití vstupních dat a softwaru TraMod. Pomocí TraMod API byla následně provedena kalibrace modelu a za využití GEH statistiky jeho validace.

Ve čtvrté závěrečné kapitole jsou diskutovány dosažené validační výsledky společně s návrhy na zlepšení přístupu praktické tvorby dopravního modelu a technických specifikací datové struktury TraMod společně s TraMod API.

Seznam literatury

1) Aimsun (2024). *Calibration and validation theory*. Dostupné 30. 4. 2024 z https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/UsersManual/CalibrationAndValidationTheory.html

2) Akademie městské mobility (2024). *Dopravní modely*. Dostupné 6. 4. 2024 z https://www.akademiemobility.cz/dopravni-modely-402

3) Andrš, T. (2023) *Základní výpočet a následné zobrazení znečištění ovzduší zapříčiněného dopravní intenzitou* [Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni]. Digitální knihovna Západočeské univerzity v Plzni. https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/53839

4) ARCDATA PRAHA (2024). ArcČR® V*ybraná administrativní a statistická data o České republice*. Dostupné 13. 4. 2024 z https://www.arcdata.cz/cs-cz/produkty/data/arccr

5) Cascetta, E. (2009). *Transportation Systems Analysis: Models and Applications*. Springer US. ISBN 978-0-387-75857-2

6) Centrum dopravního výzkumu (2022), *Dopravní model města Bílovce*. Dostupné 30. 4. 2024 z https://www.bilovec.cz/analytika/d-738655

7) Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., Ředitelství silnic a dálnic ČR, & další. (2022). *Zpráva o výsledcích Sčítání dopravy na dálniční a silniční síti v roce 2020*. Datum zpracování: 15.03.2022.

8) Centrum dopravního výzkumu. (2017). P*racovní postup tvorby dopravní mikrosimulace*. Dostupné 24. 4. 2024 z https://www.czrso.cz/clanek/pracovni-postup-tvorby-dopravni-mikrosimulace/?id=1674

9) Correa, J.R., & Stier-Moses, N.E. (2010). *Wardrope equilibria*. Wiley encyclopedia of operations research and management science. John Wiley & Sons. http://dii.uchile.cl/~jcorrea/papers/Chapters/CS2010.pdf

10) Česko v pohybu (2022). *Metoda a základní výsledky celostátního průzkumu dopravního chování*. Dostupné z https://www.ceskovpohybu.cz/data/

11) ČSÚ (2023). *Historický lexikon obcí České republiky - 1869 - 2011*. Dostupné 26. 1. 2023 z https://www.czso.cz/csu/czso/historicky-lexikon-obci-1869-az-2015

12) EDIP s.r.o. (2017). *Zpracování prognózy intenzit automobilové dopravy: Tvorba dopravního modelu*.

13) ESRI (2024a). *ArcGIS Pro*. Dostupné 12. 4. 2024 z https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview

14) ESRI (2024b). *Notebooks in ArcGIS Pro*. Dostupné 12. 4. 2024 zhttps://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/get-started/pro-notebooks.htm

15) Glombíková, V. (2016). *Počítačová simulace podnikových procesů*. DocPlayer.cz. https://docplayer.cz/8986738-Pocitacova-simulace-podnikovych-procesu-ing-v-glombikova-phd.html

16) Hušek, R., & Lauber, J. (1987). *Simulační modely* (1. vyd.). Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury.

17) Chu, Z., Cheng, L., & Chen, H. (2012). *A Review of Activity-Based Travel Demand Modeling*, 48-59. DOI: 10.1061/9780784412442.006

18) Institute of Transportation Engineers. (2016). *Transportation Planning Handbook*. Wiley. ISBN 978-1-118-76235-6

19) Jančíková, Z. (2012). *Teorie systémů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. ISBN 978-80-248-2561-8

20) Kelton, W. D., & Law, A. M. (1991). *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill. ISBN 0-07-100803-9

21) Klement, M. (2022). *Teorie systémů – úvod do teorie systémů* (1. vyd.). Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-80-244-6110-6

22) Kolovský, F. (2016) *Výpočet kapacity komunikace* [Semestrální práce z předmětu Algoritmy prostorových analýz Západočeská univerzita v Plzni].

23) Kubešová, S. (2016). *Celostátní sčítání dopravy na dálniční a silniční síti ČR v roce 2016*. ŘSD ČR, Oddělení dopravního inženýrství.

24) Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (5.vyd.). McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-340132-4

25) McNally, M. G. (2008). *The Four Step Model*. UC Irvine: Center for Activity Systems Analysis. https://escholarship.org/uc/item/0r75311t

26) Melzer, Z., Tögel, M., Hofhansl, P., Ondráčková, J., Valta, J., Čampula, R., Dufek, J., & Volek, J. (2017). *Metodika pro tvorbu a hodnocení makroskopických dopravních modelů: minimální standardy návrhů modelů pro dopravní plánování*. Centrum dopravního výzkumu, v.v.i. ISBN 978-80-88074-52-6

27) Ortúzar, J. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport* (4. vyd.). Wiley. ISBN 9780470760390

28) PostgreSQL (2024). *About PostgreSQL*. Dostupné z 12 4. 2024 https://www.postgresql.org/about/

29) Rathi, A. K. (1997). *Traffic simulation by Edward Lieberman 18*. Federal Highway Administration - Department of Transportation. https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/tft/chap10.pdf

30) Traffic Modeller (2024) *About Traffic Modeller*. Dostupné 12. 4. 2024 z https://trafficmodeller.com/

31) Transportation Research Board. (2015). *Traffic and Transportation Simulation - Looking Back and Looking Ahead: Celebrating 50 Years of Traffic Flow Theory, a Workshop*. https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec195.pdf

32) Vaněk, J. (2022). *ETL nástroj pro konverzi OpenStreetMap dat do datové struktury nástroje TrafficModeller* [Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni]. Digitální knihovna Západočeské univerzity v Plzni. https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/50211

33) Žampa, P. (nedatováno). *Základy teorie systémů*. Západočeská univerzita v Plzni.

34) Zítek, P. (1990). *Simulace dynamických systémů*. SNTL. ISBN 80-03-00330-X

Přílohy

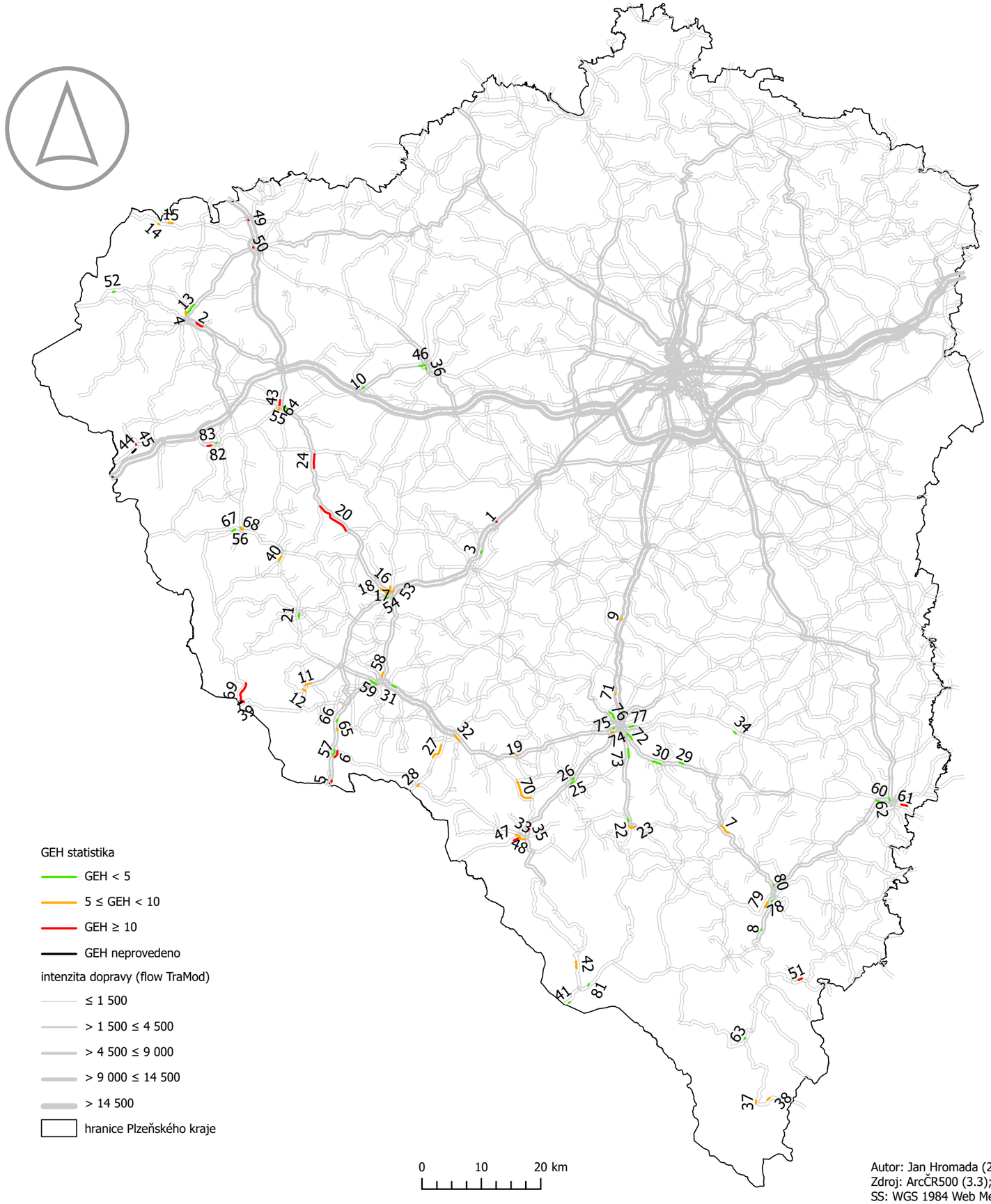
Příloha A — Obsah diskového nosiče

- *Hromada_Jan_DP.pdf* — diplomová práce ve formátu PDF
- SQL_skripty — skripty v jazyce SQL
  - *00-hotosm-data-filtration.sql*
  - *01-create-schema.sql*
  - *02-create-tables*
  - *03-nodes*
  - *04-edges*
  - *05-zone.shp-to-zone*
  - *06-node.shp-to-node*
  - *07-edge.shp-to-edge*
  - *08-zone.trips*
  - *09-transit_zone.shp-to-zone*
  - *10-zone.trips-change*
  - *11-measured_flow.shp-to-measured_flow*
  - *12-matrix-set-dataset*
  - *13-odm_transit_part*
  - *14-odm_transit_part-to-odm*
- Python_skripty — skripty v jazyce Python
  - *01-JSON-2-CSV.ipynb*
  - *02-Validation-dataset.ipynb*
- Data_shp — data dopravního modelu TraMod ve formátu SHP
  - *zone.shp*
  - *edge.shp*
  - *node.shp*
  - *measured_flow.shp*
  - *transit_zone.shp*

    - *calibration_dataset.shp*
    - *validation_dataset.shp*

- Data_sql — databázový backup modelu TraMod
    - *tm_pk_hromada_backup.sql*

- *Validace_GEH.xlsx* — tabulkový výstup výsledků GEH statistik



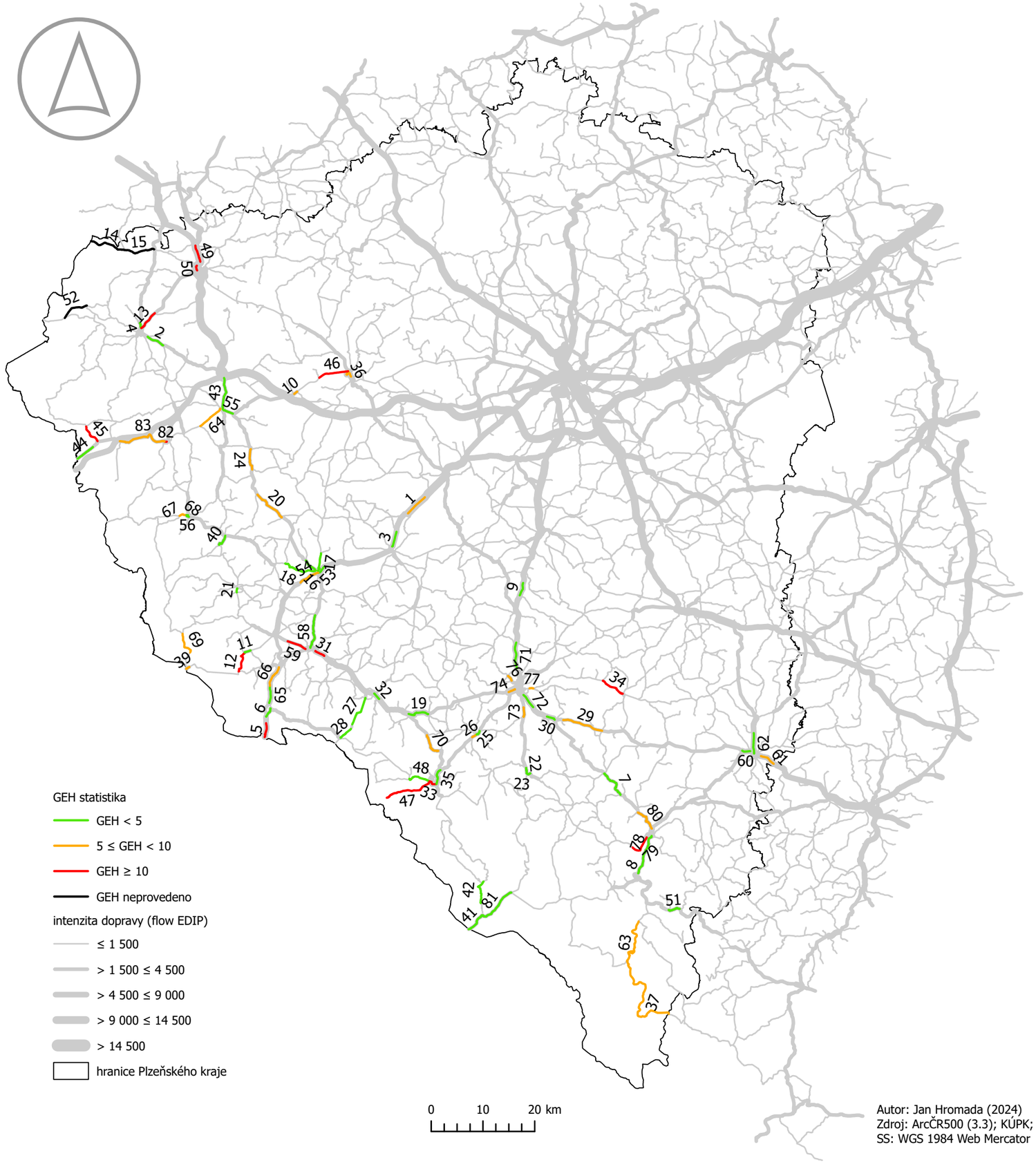
Autor: Jan Hromada (2024)
Zdroj: ArcČR500 (3.3); KÚPK; OSM
SS: WGS 1984 Web Mercator

Příloha B1: Výsledky validace statistikou GEH dopravního modelu TraMod

Validační místo	IdDevice	flow kamera	flow TraMod	GEH
1	KP051	339,37	614,1	12,58
2	KP052	256,79	478,91	11,58
3	KP053	509,96	559,11	2,13
4	KP054	150,49	92,65	5,25
5	KP055	45,28	250,26	16,86
6	KP056	49,37	85,1	4,36
7	KP057	131,27	243,88	8,22
8	KP058	183,94	205,29	1,53
9	KP059	397,34	596,72	8,94
10	KP060	137,07	181,95	3,55
11	KP061	66,13	160,61	8,87
12	KP062	139,38	59,98	7,95
13	KP063	295,19	368,75	4,04
14	KP064	55,37	13,78	7,07
15	KP065	54,43	13,1	7,11
16	KP066	176,92	284,85	7,1
17	KP067	61,79	111,96	5,38
18	KP068	55,57	58,68	0,41
19	KP069	166,86	296,16	8,5
20	KP070	63,66	202,83	12,06
21	KP071	63,91	68,42	0,55
22	KP072	151,35	211,08	4,44
23	KP073	79,1	155,71	7,07
24	KP074	67,17	226,01	13,12
25	KP075	252,64	288,98	2,21
26	KP076	276,15	270,15	0,36
27	KP077	104,5	30,49	9,01
28	KP078	95,94	26,74	8,84
29	KP079	242,27	326,42	4,99
30	KP080	275,85	341,07	3,71
31	KP081	501,82	553,14	2,23
32	KP082	261,46	409,59	8,09
33	KP083	72,37	174,68	9,2
34	KP084	124,24	120,2	0,37
35	KP085	121,86	304,78	1,58
36	KP086	425,94	369,1	2,85
37	KP088	35,07	6,3	6,33
38	KP089	34,13	2,07	7,54
39	KP090	11,25	0	
40	KP091	58,31	123,91	6,87
41	KP092	187,31	139,68	3,72
42	KP093	74,04	137,64	6,18

Validační místo	IdDevice	flow kamera	flow TraMod	GEH
43	KP094	183,78	398,47	12,58
44	KP095	149,91	0	
45	KP096	136,15	4,57	16,78
46	KP097	208,26	153,79	4,05
47	KP098	93,99	12,15	11,23
48	KP099	69,12	162,97	8,71
49	KP100	436,15	713,73	11,58
50	KP101	390,48	709,91	13,62
51	KP102	89,32	3,99	12,49
52	KP104	32,86	11,13	4,63
53	KP105	342,61	470,48	6,34
54	KP106	323,39	347,92	1,34
55	KP107	171,63	212,72	2,96
56	KP108	101,73	37,09	7,76
57	KP109	479,67	112,11	21,37
58	KP110	179,19	337,34	9,84
59	KP111	260,07	214,38	2,97
60	KP112	316,55	384,65	3,64
61	KP113	248,3	33,57	18,09
62	KP114	188,3	258,46	4,69
63	KP115	45,66	23,39	3,79
64	KP116	91,52	166,4	6,59
65	KP117	285,29	392,75	5,84
66	KP118	337,35	392,75	2,9
67	KP119	54,15	90,02	4,23
68	KP120	62,78	109,4	5,02
69	KP121	87,89	3,01	12,59
70	KP122	37,18	100,04	7,59
71	KP123	406,99	592,31	8,29
72	KP124	335,35	357,81	1,21
73	KP125	274,32	298,33	1,42
74	KP127	597,69	585,61	0,5
75	KP128	460,3	600,91	6,1
76	KP129	197,39	187,62	0,7
77	KP130	168,84	174,38	0,42
78	KP131	205,49	233,74	1,91
79	KP132	171,59	87,14	7,42
80	KP133	249,06	261,5	0,78
81	KP134	132,13	102,86	2,7
82	KP135	98,75	145,95	4,27
83	KP136	69,06	190,61	10,67

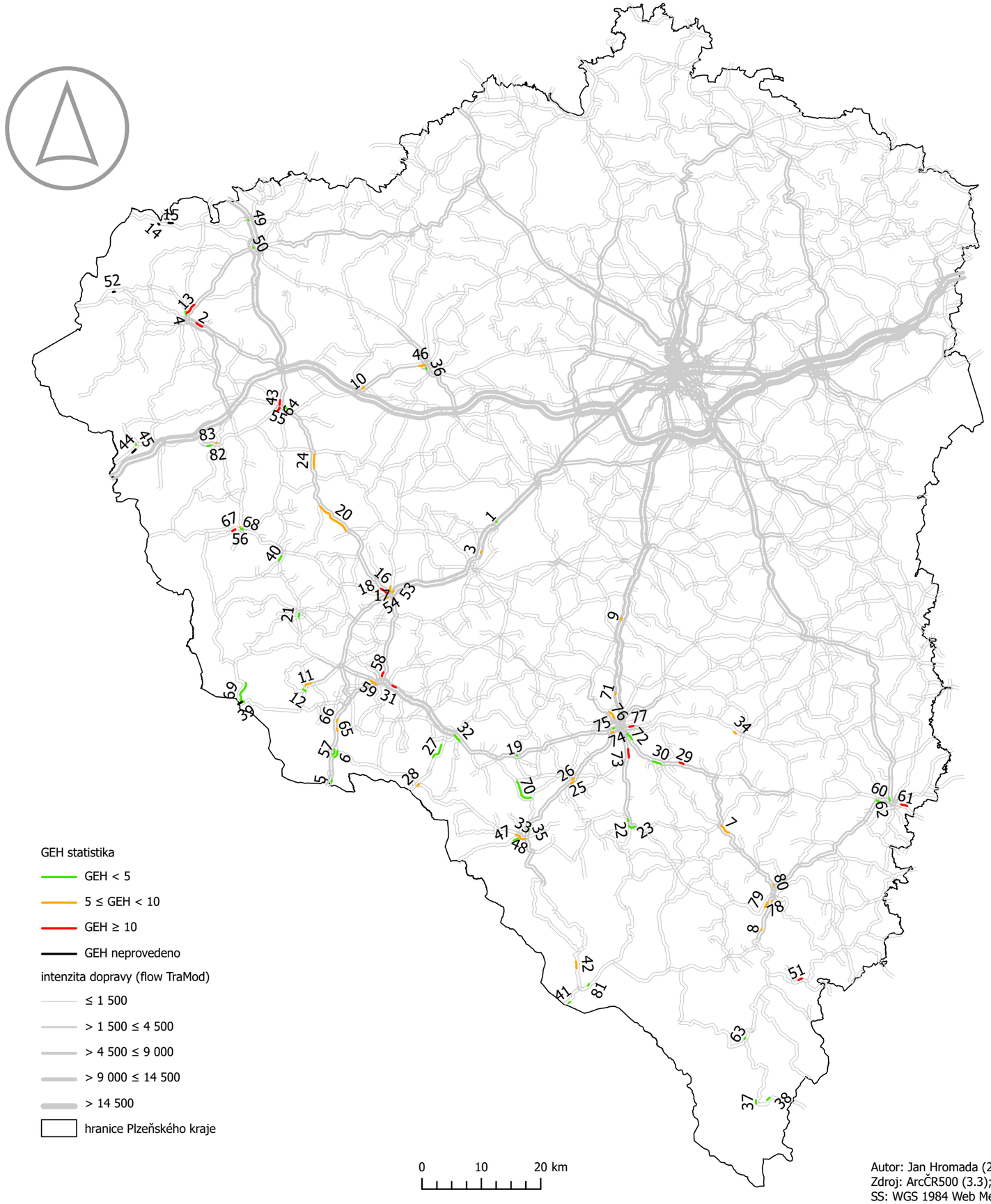
Příloha B2:
Výsledky validace statistikou GEH dopravního modelu EDIP



Autor: Jan Hromada (2024)
Zdroj: ArcČR500 (3.3); KÚPK; EDIP s.r.o.
SS: WGS 1984 Web Mercator

Validační místo	IdDevice	flow kamera	flow EDIP	GEH
1	KP051	339,37	533,16	9,28
2	KP052	256,79	209,5	3,1
3	KP053	509,96	426,23	3,87
4	KP054	150,49	108,73	3,67
5	KP055	45,28	291,5	18,97
6	KP056	49,37	88,98	4,76
7	KP057	131,27	160,08	2,39
8	KP058	183,94	135,85	3,8
9	KP059	397,34	394,05	0,17
10	KP060	137,07	83,33	5,12
11	KP061	66,13	96,69	3,39
12	KP062	139,38	29,42	11,97
13	KP063	295,19	126,85	11,59
14	KP064	55,37	0	
15	KP065	54,43	0	
16	KP066	176,92	117,03	4,94
17	KP067	61,79	50,15	1,55
18	KP068	55,57	45,75	1,38
19	KP069	166,86	228,66	4,39
20	KP070	63,66	121,15	5,98
21	KP071	63,91	71,65	0,94
22	KP072	151,35	144,47	0,57
23	KP073	79,1	101,69	2,38
24	KP074	67,17	120,1	5,47
25	KP075	252,64	194,21	3,91
26	KP076	276,15	193,87	5,37
27	KP077	104,5	64,6	4,34
28	KP078	95,94	64,6	3,5
29	KP079	242,27	150,14	6,58
30	KP080	275,85	283,51	0,46
31	KP081	501,82	300,04	10,08
32	KP082	261,46	326,43	3,79
33	KP083	72,37	257,32	14,41
34	KP084	124,24	33,12	10,27
35	KP085	121,86	237,7	2,5
36	KP086	425,94	290,95	7,13
37	KP088	35,07	4,88	6,76
38	KP089	34,13	4,97	6,6
39	KP090	11,25	75,14	9,72
40	KP091	58,31	81,07	2,73
41	KP092	187,31	143,99	3,37
42	KP093	74,04	51,42	2,86

Validační místo	IdDevice	flow kamera	flow EDIP	GEH
43	KP094	183,78	175,84	0,59
44	KP095	149,91	147,8	0,17
45	KP096	136,15	1,1	16,3
46	KP097	208,26	63	12,47
47	KP098	93,99	3,32	13
48	KP099	69,12	60,73	1,04
49	KP100	436,15	742,11	12,61
50	KP101	390,48	697,52	13,16
51	KP102	89,32	103,02	1,4
52	KP104	32,86	0	
53	KP105	342,61	327,65	0,82
54	KP106	323,39	219,9	6,28
55	KP107	171,63	214,47	3,08
56	KP108	101,73	101,69	0
57	KP109	479,67	84,67	23,51
58	KP110	179,19	175,83	0,25
59	KP111	260,07	115,91	10,51
60	KP112	316,55	310,04	0,37
61	KP113	248,3	385,66	7,72
62	KP114	188,3	238,84	3,46
63	KP115	45,66	10,76	6,57
64	KP116	91,52	18,8	9,79
65	KP117	285,29	236,51	3,02
66	KP118	337,35	245,48	5,38
67	KP119	54,15	6,36	8,69
68	KP120	62,78	98,56	3,98
69	KP121	87,89	17,87	9,63
70	KP122	37,18	91,63	6,78
71	KP123	406,99	436,02	1,41
72	KP124	335,35	309,77	1,42
73	KP125	274,32	136,88	9,59
74	KP127	597,69	478,77	5,13
75	KP128	460,3	473,79	0,62
76	KP129	197,39	91,18	8,84
77	KP130	168,84	64,93	9,61
78	KP131	205,49	159,66	3,39
79	KP132	171,59	40,69	12,71
80	KP133	249,06	167,68	5,64
81	KP134	132,13	107,92	2,21
82	KP135	98,75	236,4	10,63
83	KP136	69,06	179,12	9,88



Autor: Jan Hromada (2024)
Zdroj: ArcČR500 (3.3); OSM; EDIP s.r.o.
SS: WGS 1984 Web Mercator

Příloha B3: Výsledky validace statistikou GEH mezi dopravními modely TraMod — EDIP

Validační místo	IdDevice	flow TraMod	flow EDIP	GEH
1	KP051	614,1	533,16	3,38
2	KP052	478,91	209,5	14,52
3	KP053	559,11	426,23	5,99
4	KP054	92,65	108,73	1,6
5	KP055	250,26	291,5	2,51
6	KP056	85,1	88,98	0,42
7	KP057	243,88	160,08	5,9
8	KP058	205,29	135,85	5,32
9	KP059	596,72	394,05	9,11
10	KP060	181,95	83,33	8,56
11	KP061	160,61	96,69	5,64
12	KP062	59,98	29,42	4,57
13	KP063	368,75	126,85	15,37
14	KP064	13,78	0	
15	KP065	13,1	0	
16	KP066	284,85	117,03	11,84
17	KP067	111,96	50,15	6,86
18	KP068	58,68	45,75	1,79
19	KP069	296,16	228,66	4,17
20	KP070	202,83	121,15	6,42
21	KP071	68,42	71,65	0,39
22	KP072	211,08	144,47	4,99
23	KP073	155,71	101,69	4,76
24	KP074	226,01	120,1	8,05
25	KP075	288,98	194,21	6,1
26	KP076	270,15	193,87	5,01
27	KP077	30,49	64,6	4,95
28	KP078	26,74	64,6	5,6
29	KP079	326,42	150,14	11,42
30	KP080	341,07	283,51	3,26
31	KP081	553,14	300,04	12,25
32	KP082	409,59	326,43	4,34
33	KP083	174,68	257,32	5,62
34	KP084	120,2	33,12	9,95
35	KP085	304,78	237,7	4,07
36	KP086	369,1	290,95	4,3
37	KP088	6,3	4,88	0,6
38	KP089	2,07	4,97	1,55
39	KP090	0	75,14	
40	KP091	123,91	81,07	4,23
41	KP092	139,68	143,99	0,36
42	KP093	137,64	51,42	8,87

Validační místo	IdDevice	flow TraMod	flow EDIP	GEH
43	KP094	398,47	175,84	13,14
44	KP095	0	147,8	
45	KP096	4,57	1,1	2,06
46	KP097	153,79	63	8,72
47	KP098	12,15	3,32	3,18
48	KP099	162,97	60,73	9,67
49	KP100	713,73	742,11	1,05
50	KP101	709,91	697,52	0,47
51	KP102	3,99	103,02	13,54
52	KP104	11,13	0	
53	KP105	470,48	327,65	7,15
54	KP106	347,92	219,9	7,6
55	KP107	212,72	214,47	0,12
56	KP108	37,09	101,69	7,75
57	KP109	112,11	84,67	2,77
58	KP110	337,34	175,83	10,08
59	KP111	214,38	115,91	7,66
60	KP112	384,65	310,04	4
61	KP113	33,57	385,66	24,32
62	KP114	258,46	238,84	1,24
63	KP115	23,39	10,76	3,06
64	KP116	166,4	18,8	15,34
65	KP117	392,75	236,51	8,81
66	KP118	392,75	245,48	8,24
67	KP119	90,02	6,36	12,05
68	KP120	109,4	98,56	1,06
69	KP121	3,01	17,87	4,6
70	KP122	100,04	91,63	0,86
71	KP123	592,31	436,02	6,89
72	KP124	357,81	309,77	2,63
73	KP125	298,33	136,88	10,94
74	KP127	585,61	478,77	4,63
75	KP128	600,91	473,79	5,48
76	KP129	187,62	91,18	8,17
77	KP130	174,38	64,93	10,01
78	KP131	233,74	159,66	5,28
79	KP132	87,14	40,69	5,81
80	KP133	261,5	167,68	6,4
81	KP134	102,86	107,92	0,49
82	KP135	145,95	236,4	6,54
83	KP136	190,61	179,12	0,85