

UNIVERZITA KARLOVA
Přírodovědecká fakulta
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (bakalářské studium)

Studijní obor: Geografie a kartografie



Josef ZÁTKA

**ANALÝZA DAT O POLOZE VOZIDEL MHD: PŘÍPADOVÁ STUDIE
PRO MOST A LITVÍNOV**

**DATA ANALYSIS ON THE POSITION OF PUBLIC TRANSPORT VEHICLES: A CASE STUDY
OF MOST AND LITVÍNOV**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Mgr. Jakub Lysák, PhD.

Praha a Česká Lípa 2024

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze 30. 4. 2024



Josef Zátka

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval RNDr. Mgr. Jakubu Lysákovi, PhD. za čas věnovaný vedení mé bakalářské práce, za jeho cenné rady, připomínky a náměty. Také děkuji oddělení GIS Magistrátu města Most, jmenovitě panu Ing. Kamilu Novákovi, za poskytnutí dat analyzovaných v této práci.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu nejen při psaní této práce, ale po celou dobu studia.

ABSTRAKT

Práce se zabývá *ex post* (tj. nikoliv *real time*) analýzou dat o poloze vozidel městské hromadné dopravy. Cílem práce je navrhnut a implementovat časoprostorové analýzy těchto dat, které budou prakticky využitelné pro reálné sítě MHD. Jejich funkčnost je ověřována na datech z MHD v Mostě a Litvínově zaznamenaných v průběhu měsíce října roku 2023. Data mají charakter bodového záznamu s informací o poloze vozidla, s časem a datem záznamu, číslem linky, konečnou zastávkou, poslední projetou zastávkou, azimutem a rychlosťí pohybu vozidla a o jeho zpoždění.

Celkem je navrženo 5 dílčích analýz. První dvě analýzy se zabývají možnostmi efektivní kontroly vstupních dat, v rámci nich jsou navrženy algoritmy pro polohovou a atributovou kontrolu dat. Třetí analýza sleduje a vyhodnocuje časoprostorovou diferenciaci zpoždění, zaměřuje se na trendy v rozložení zpoždění v průběhu tras jednotlivých linek jak v průběhu denní doby, tak za delší časové úseky. Čtvrtá analýza se venuje zpoždění na příjezdům linek na jednotlivé zastávky. Závěrečná analýza zkoumá spolehlivost přestupů mezi spoji MHD na přestupních uzlech.

Navržené metody byly implementovány prostřednictvím skriptů napsaných v programovacím jazyku Python, pro práci s prostorovými daty byla využita knihovna ArcPy. Implementace metod je přizpůsobena struktuře dat z provozu MHD v Mostě a Litvínově. Na tato data jsou navržené postupy aplikovány.

Kromě samotných skriptů jsou výsledkem práce zejména mapy, grafy a tabulky prezentující výsledky provedených analýz. Výstupem práce je také vytvořený program s interaktivním uživatelským rozhraním umožňující automatické generování map rozložení zpoždění na trase jednotlivých linek dle parametrů zadaných uživatelem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Veřejná doprava, poloha vozidel, časoprostorové analýzy, ArcPy, Most, Litvínov.

ABSTRACT

The thesis deals with *ex post* (i.e. not *real time*) analysis of data on the position of public transport vehicles. The aim of the work is to design and implement spatio-temporal analyses of this data that will be practically applicable to real public transport networks. Their functionality is verified on data from public transport in the towns of Most and Litvínov, recorded during October 2023. The data is a point record with information about the location of the vehicle, the time and date of recording, the line number, the final stop, the last passed stop, the azimuth and speed of the vehicle movement and its delay.

A total of 5 analyses are proposed. The first two analyses deal with the possibilities of effective control of the input data, within them algorithms for positional and attribute control of data are presented. The third analysis monitors and evaluates the spatiotemporal differentiation of delays, focusing on trends in the distribution of delays along the routes of individual lines over time of day and over longer time scales. The fourth analysis looks at the occurrence of delays at individual stops. The final analysis studies the reliability of transfers between public transport links at interchanges.

The proposed methods were implemented through scripts written in the Python programming language, and the ArcPy library was used to work with the spatial data. The implementation of the methods is adapted to the structure of data from public transport operations in Most and Litvínov. The proposed methods are applied to these data.

In addition to the scripts themselves, the results of the work are mainly maps, charts, and tables presenting the results of the analyses. The output of the work is also a program with an interactive user interface that allows automatic generation of maps of the distribution of delays on the route of individual lines according to the parameters specified by the user.

KEY WORDS

Public transport, vehicle location, spatio-temporal analysis, ArcPy, Most, Litvínov

OBSAH

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam grafů	9
Seznam odkazů URL	10
1 Úvod	11
2 Teoretická část	13
2.1 Slovník použité odborné dopravní terminologie	13
2.2 Aktuální přístupy k analýze dat o poloze vozidel městské hromadné dopravy	14
2.2.1 Akademický přístup	14
2.2.2 Data o poloze vozidel MHD a jejich využití v českých městech	17
2.2.3 Současný přístup k analýze dat o poloze vozidel MHD v Mostě a Litvínově	19
2.3 Geoinformatická teorie	20
2.3.1 Přehled základních využívaných geoprocessingových funkcí	21
2.3.2 Automatizace geoprocessingu	24
2.3.3 Globální družicové navigační systémy	26
3 Praktická část	27
3.1 Vstupní data	27
3.1.1 Způsob sběru dat	28
3.1.2 Popis dat	28
3.2 Atributová kontrola dat	33
3.2.1 Cíle	33
3.2.2 Praktická realizace	33
3.2.3 Výsledky	34
3.2.4 Diskuse	35
3.3 Prostorová kontrola dat – rekonstrukce tras linek z naměřených záznamů, identifikace mimořádností	37
3.3.1 Cíle	37
3.3.2 Praktická realizace	38
3.3.3 Výsledky	43
3.3.4 Diskuse	47

3.4 Analýza rozložení zpoždění dle trasy linky a denní doby	51
3.4.1 Cíle	51
3.4.2 Praktická realizace	52
3.4.3 Výsledky	57
3.4.4 Diskuse	69
3.5 Analýza zpoždění na jednotlivých zastávkách	74
3.5.1 Cíle	74
3.5.2 Praktická realizace	74
3.5.3 Výsledky	78
3.5.4 Diskuse	78
3.6 Analýza spolehlivosti přestupních vazeb na přestupních uzlech	82
3.6.1 Cíle	86
3.6.2 Praktická realizace	86
3.6.3 Výsledky	95
3.6.4 Diskuse	105
4 Diskuse	110
5 Závěr	113
6 Použité zdroje	114
6.1 Odborná literatura	114
6.2 Internetové a další zdroje	115
6.3 Zdroje obrázků	118
7 Přílohy	119

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Cestovní doba tramvají mezi zastávkami Palmovka a Vosmíkových v Praze.....	18
Obrázek 2: Cestovní doba tramvají mezi zastávkami Staroměstská a Národní divadlo v Praze	19
Obrázek 3: Geoprocessingová funkce Intersect.....	21
Obrázek 4: Geoprocessingová funkce Erase.....	22
Obrázek 5: Aplikace funkce Buffer na body, linie, polygony	23
Obrázek 6: Funkce Dissolve aplikovaná na vrstvu polygonů.....	23
Obrázek 7: Geoprocessingový panel funkce Intersect.....	24
Obrázek 8: Schématický postup tvorby koridoru linky.....	40
Obrázek 9: Polohově zjevně nepřesné záznamy.	43
Obrázek 10: Nájezd na most v Komořanech – nesoulad trasy linky 12	45
Obrázek 11: Nesoulad linky 17.....	46
Obrázek 12: Shluky bodů a vytvořené koridory na řídce projížděném úseku linky 10.	48
Obrázek 13: Dialogové okno aplikace Zpoždění Most.....	56
Obrázek 14: Automaticky vygenerovaná mapa průměrného zpoždění linky 4 ve směru Litvínov	60
Obrázek 15: Tvorba polygonů zony_zastavek_{číslo_linky}.....	76
Obrázek 16: Příklad nevhodného vytvoření zón zastávek.	79
Obrázek 17: Příčina chybné identifikace poslední zastávky.	80
Obrázek 18: Navrhovaná topologie geometrie zastávek a linek.	81
Obrázek 19: Centrální přestupní uzel Most.	83
Obrázek 20: Centrální přestupní uzel Litvínov.	84
Obrázek 21: Rozmístění odjezdových sloupků na CPU Litvínov, nádraží.	85
Obrázek 22: Zóna zastávky (žlutě) a zóna “za semaforem”	88
Obrázek 23: Schéma tvorby databáze přestupů.	90
Obrázek 24: Schéma variant výpočtu času příjezdu.	93
Obrázek 25: Schéma výpočtu času odjezdu.....	94

Pokud není u obrázku uveden zdroj, je obrázek dílem autora této práce.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Atributy datasetu <i>zaznamy_polohy_orig</i> a odvozených datových sad.	28
Tabulka 2: Atributy datasetu <i>linky</i>	31
Tabulka 3: Atributy datasetu zastavky.....	32
Tabulka 4: Průměrné zpoždění na jednotlivých linkách v průběhu dne.....	58
Tabulka 5: Rozdělení linek dle vzorce rozložení zpoždění.....	62
Tabulka 6: Průměrné zpoždění v jednotlivých dnech v týdnu.	63
Tabulka 7: Průměrné zpoždění v letech 2020 - 2023.	67
Tabulka 8: Podstatné atributy datasetu <i>zony_zastavek_{číslo_linky}</i>	76
Tabulka 9: Hodnoty slovníku <i>linky_info</i>	87
Tabulka 10: Položky záznamů tabulky <i>databaze_prestupu</i>	91
Tabulka 11: Spolehlivost přestupu (%) mezi linkami na CPU v Litvínově.....	100
Tabulka 12: Spolehlivost přestupu (%) mezi linkami na CPU v Mostě.....	101

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vzdálenost záznamu polohy od nejbližší komunikace.....	39
Grafy 2: Vývoj průměrného zpoždění ve dnech v týdnu.....	65
Graf 3: Průměrné zpoždění v měsících roku 2023.	67
Graf 4: Vývoj průměrného zpoždění v letech 2020 - 2023.	69
Graf 5: Průměrné zpoždění v síti MHD Most a Litvínov v jednotlivých hodinách v pracovní dny.....	73
Graf 6: Počet odjezdů spojů ze zastávky Obchodní dům PRIOR v jednotlivé hodiny pracovního dne.....	73
Graf 7: Spolehlivost přestupu z linek a směrů v CPU Most v říjnu 2023.	97
Graf 8: Spolehlivost přestupu z linek a směrů v CPU Most v říjnu 2023.	97
Graf 9: Spolehlivost přestupu na linku a směr v CPU Most v říjnu 2023.	98
Graf 10: Spolehlivost přestupu na linku a směr v CPU Litvínov v říjnu 2023.	99
Graf 11: Spolehlivost přestupních vazeb na CPU v Mostě a Litvínově v říjnu 2023.....	102
Graf 12: Spolehlivost přestupních vazeb dle denní doby na CPU v Mostě a Litvínově v říjnu 2023.....	103
Graf 13: O kolik je průměrně nestihnut navazující spoj (CPU v Mostě, říjen 2023).	104
Graf 14: O kolik je průměrně nestihnut navazující spoj (CPU Litvínov, nádraží, říjen 2023).....	105

SEZNAM ODKAZŮ URL

URL¹ <https://idos.idnes.cz/idol/spojeni/>

URL² <https://www.seznam.cz/jizdnirady/>

URL³ <https://spojeni.kr-ustecky.cz/>

URL⁴ <https://pid.cz/hledani-spojeni/>

URL⁵ <https://www.iidol.cz/idolka/>

URL⁶ <https://mapa.pid.cz/>

URL⁷ <https://mapa.idsjmk.cz/>

URL⁸ <https://jizdnirady.pmdp.cz/provoz>

URL⁹ <https://scc.dpo.cz/dashboard/vehicles.html>

URL¹⁰ <https://www.mhdhb.cz/>

URL¹¹ <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.smartgis.trebicpolohavozidel>

URL¹² <https://www.mpvnet.cz/idol/map>

URL¹³ <https://jih.mpvnet.cz/jikord/map>

URL¹⁴ <https://provoz.kr-ustecky.cz/TMD>

URL¹⁵ <https://data.brno.cz/apps/073a3d9303b54cd08c48e4158c7fe1f4/explore>

URL^X <https://twitter.com/jiracekz>

1 ÚVOD

Zatímco v dobách před implementací globálních polohových navigačních systémů (GNSS) do odvětví hromadné dopravy byla analýza dat o poloze vozidel závislá na denících jízd a sběr dat i jejich analýza vyžadovala enormní množství času (Raghothama, Shreenath, Meijer 2016), dnes téměř všechny systémy městské hromadné dopravy vyspělého světa sbírají podrobná polohová data ze senzorů GNSS umístěných na vozidlech (Welch, Widita 2019).

Zásadním průlomem v této oblasti bylo odstranění selektivní dostupnosti signálu GPS, amerického globálního navigačního systému, v květnu roku 2000. Do té doby byla přesnost signálu pro civilní použití uměle snižována (Petropoulos, Srivastava 2021). Tato změna s sebou přinesla rozvoj využití GNSS mimo vojenství. Kromě zemědělství, lesnictví či ochrany životního prostředí se GNSS začaly masivně využívat právě i v oblasti dopravy.

Sledování poloh vozidel se stalo trendem a mnoha dopravních systémů po celém světě zprostředkovává informace o aktuální poloze vozidel hromadné dopravy i samotným cestujícím, typicky formou webových a mobilních aplikací. Uživatel tak může s pomocí těchto technologií využívat hromadnou dopravu efektivněji, například tím, že informací o zpoždění spoje disponuje ještě před přesunem na zastávku a může se tak vyhnout zbytečnému čekání či naplánovat alternativní způsob dopravy.

Ještě cennější může být analýza pravidelně ukládaných poloh vozidel hromadné dopravy. Významným atributem, který lze z takových dat sledovat, je zpoždění spojů. Na základě analýz takových dat může být přistoupeno k adaptaci jízdních řádů, úpravě dopravní infrastruktury (například vyhrazením dopravních pruhů pouze pro autobusy) a dalším krokům vedoucím k vyšší spolehlivosti, efektivitě a tím i atraktivitě hromadné dopravy. Délka čekání na spoj totiž patří k nejvýznamnějším faktorům ovlivňujícím spokojenosť cestujících (Lunke 2020).

V předkládané práci jsou v teoretické části představeny současné přístupy k analýze dat o poloze vozidel hromadné dopravy. Jelikož předkládaná práce může být relevantní i pro odbornou veřejnost z oblasti dopravy, je v teoretické části věnován prostor stručnému vysvětlení základních principů geoinformatiky, především těm využitým v praktické části předkládané práce. Ačkoliv se skutečnosti uvedené v této kapitole mohou geoinformatické obci jevit jako všeobecně známé, pro čtenáře bez základních znalostí této problematiky by další text mohl být obtížně srozumitelným. Naopak odborník na veřejnou dopravu může za zbytečný považovat popis základní dopravní terminologie, který se v teoretické části práce také vyskytuje.

Praktická část práce navrhuje a implementuje 5 analýz aplikovaných na data o poloze vozidel městské hromadné dopravy měst Most a Litvínov. Severočeská města Most a Litvínov jsou, se svými 64, respektive 23 tisíci obyvatel, aglomerací se systémem městské hromadné dopravy, který svým rozsahem vyhovuje účelům této práce. Sítě disponuje dostatečným množstvím zastávek, linek a přestupních uzelů, aby bylo možné provádět komplexnější analýzy. Vhodná je i multimodálnost sítě, kromě autobusů jsou součástí MHD i tramvaje. Zároveň je ale celý systém dostatečně kompaktní, a tak množství zpracovávaných dat nepřesahuje dostupný výpočetní výkon a výsledky je možné relativně přehledně prezentovat i ve statické podobě.

Praktická část práce nejprve popisuje strukturu zpracovávaných dat a způsob jejich sběru. Následují jednotlivé analýzy, u každé z nich jsou stanoveny cíle, popsána praktická realizace a také jsou uvedeny a v rámci možností interpretovány výsledky. Součástí každé analýzy je i dílčí diskuse. Souhrnná diskuse se pak nachází v úplném závěru předkládané práce.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Slovník použité odborné dopravní terminologie

Městská hromadná doprava (**MHD**) je systém osobní veřejné dopravy určené k zajišťování dopravní obslužnosti uvnitř města, běžně je financována městskou samosprávou. Systém je tvořen linkami, které mohou být obousměrné, okružní či polookružní. **Obousměrné linky** zajišťují přepravu po jedné trase v obou směrech. **Okružní linky** vytvářejí uzavřený okruh, provoz na nich probíhá buď obousměrně, nebo jednosměrně (u všech linek MHD v Mostě a Litvínově), konečná zastávka je současně počáteční stanicí, případně se nachází v těsné blízkosti. **Polookružní linky** jsou kombinací předchozích dvou, část jejich trasy linky je vedena obousměrně, část je jednosměrná.

Trasy linek jsou typicky neměnné, některé spoje mohou být zkráceny. Konečnou zastávkou zkráceného spoje se stává některá ze zastávek na trase spoje plné délky. Pokud některé spoje opouštějí nejčastější projížděnou trasu linky (**standardní trasa**), lze takovou alternativní trasu označit za **nestandardní trasu**. Pravidelné odbočení z trasy linky do zastávky, následované návratem stejnou cestou na původní trasu je označováno jako **závlek** (typicky odbočka do obce z hlavní silnice vedoucí mimo ni). Vozidla při své jízdě po trase linky zastavují na jednotlivých zastávkách, konkrétně u **odjezdového sloupku**, každá zastávka může mít více odjezdových sloupků. Nejčastějším počtem jsou dva, kdy se jeden odjezdový sloupek příslušné zastávky nachází na každé straně ulice.

Obsluhuje-li zastávku dvě či více linek rozjíždějících se do více různých směrů, nebo je-li z ní umožněn rychlý přesun na jiné druhy veřejné dopravy, lze ji označit za **přestupní zastávku**. Možnost přestupu mezi dvěma linkami veřejné hromadné dopravy nebo mezi různými druhy dopravy se označuje jako **přestupní vazba**. Sjíždí-li se v přestupní zastávce více než dvě linky, jde o **přestupní uzel** (ČSN 73 6425-2).

Spoje jsou průjezdy vozidel po trase linky, které jsou časoprostorově určeny **jízdním řádem**. Ten určuje pravidelné odjezdy z jednotlivých zastávek. **Zpoždění** je rozdíl mezi předpokládaným a reálným časem příjezdu vozidla na dané místo na trase. Pro zjednodušení automatizace práce s jízdními řády byly vyvinuty jednotné strojově čitelné formát **GTFS** (General Transit Feed Specification) či **JDF** (používaný v Česku). **AVL** (Automatic Vehicle Location) je soubor fyzických zařízení a softwarového řešení, které za využití globálních polohových systémů umožňují opravnímu podniku nebo dalším stranám na dálku sledovat polohy vozidel svého vozového parku prostřednictvím internetu, sledovat takto lze i zpoždění.

2.2 Aktuální přístupy k analýze dat o poloze vozidel městské hromadné dopravy

V oblasti analýzy dat o poloze vozidel městské hromadné dopravy existuje několik potenciálních směrů zkoumání. Soudě dle četnosti řešených témat v odborných článcích a dalších pracích je ale zřejmé, že klíčovým aspektem se jak z akademické, tak z praktické perspektivy jeví analýza zpoždění spojů. Se zpožděním přímo souvisí i další možné studie polohových dat, například sledování pravidelností rozestupů mezi spoji, které mají mít pravidelné rozestupy.

V akademické sféře poskytují takové analýzy hlubší vhled do dynamiky a efektivity veřejné dopravní sítě, umožňují výzkumníkům identifikovat příčiny zpoždění, hodnotit dopad různých faktorů na výkonnost systému a formulovat modely pro předpověď zpoždění a návrhy opatření na jeho minimalizaci.

Z praktického hlediska, pro společnosti organizující a provozující městskou hromadnou dopravu, je analýza zpoždění spojů nezbytná pro zajištění vysoké úrovně služeb a spokojenosti cestujících. Umožňuje provozovatelům veřejné dopravy monitorovat výkon v reálném čase, rychle identifikovat a řešit problémy, optimalizovat jízdní řády a trasy, a nakonec zlepšovat spolehlivost a efektivitu služeb. O zpoždění mohou být také v reálném čase informováni cestující. Díky informacím z vyhledávačů spojení, informačních systémů na zastávkách či z webových mapových aplikací tak mohou reagovat na očekávané zpoždění spoje. I to vede k vyšší atraktivitě MHD pro cestující.

2.2.1 Akademický přístup

Data o zpoždění vozidel jsou v odborné literatuře analyzována z mnoha pohledů – dle jeho rozložení v čase, v prostoru, ve vztahu k jednotlivým zastávkám, či například jeho řetězení.

Y. Park a kol. (2020) se řetězením zpoždění, tedy kaskádováním zpoždění z první zpožděné zastávky na další, zabývali v Columbu v Ohiu. Tato studie porovnávala data z GTFS, což je standardní formát pro data o jízdních rádech, s reálnými daty o polohách vozidel, aby získali hlubší vhled do dynamiky zpoždění v síti MHD. Z těchto dat bylo možné určit klíčové zastávky v centru města a některé klíčové předměstské zastávky, na kterých bylo zpoždění nejčastěji nabráno. Jízdní řád mnohdy již nedovolil takové zpoždění snížit, naopak častěji docházelo k jeho dalšímu narůstání.

Zpoždění se tedy kaskádotivě šířilo z jedné zastávky na další. To často vedlo k dalšímu nárůstu zpoždění, protože i když se vozidlo snažilo ztrátu času dohnat, muselo v dopravní špičce čelit přetížené dopravní síti, nečekaným mimořádnostem nebo vysokému počtu nástupů a výstupů cestujících na dalších zastávkách.

Výzkum poukázal na potřebu cílených opatření vedoucích ke snížení zpoždění na zjištěných kritických místech. Taková opatření by mohla zahrnovat úpravu jízdních rádů či implementaci prioritizačních opatření pro vozidla veřejné dopravy, v článku se mluví především o jízdních pruzích vyhrazených pouze pro autobusy.

Úpravou jízdních rádů je v tomto případě myšlen především proces, při kterém jsou do jízdních rádů vkládány rezervy, zejména v časech dopravních špiček (Ceder 2002). Anglicky je tento proces označován jako *padding*. Analýze paddingu se věnovali například N. Wessel a M. Widener (2016). Cílem jejich práce bylo, podobně jako v předchozí zmiňované studii, na základě porovnání jízdních rádů a dat o poloze vozidel, najít místa, která mohou být nejvíce ovlivněna zpožděním. Celá analýza proběhla na úrovni segmentů sítě linek mezi jednotlivými zastávkami. Metodika byla taková, že autoři porovnávali minimální dobu potřebnou pro projetí daného úseku s průměrnou dobou vyhrazenou pro průjezd úseku v jízdním rádu a minimální dobou vyhrazenou pro průjezd úseku v jízdním rádu. Tyto údaje jsou mezi sebou porovnávány jako součty dob všech projíždějících spojů v jednotlivé denní doby. Data jsou tak analyzována z pohledu času i prostoru.

Výsledkem práce jsou mapy vizualizující *padding* v jednotlivých segmentech sítě a grafy velikosti *paddingu* dle denní doby. Závěry studie jsou podobné jako u článku Y. Parka a kol. (2020). Autoři uvádějí, že informace o úsecích, kde nejčastěji dochází ke tvorbě zpoždění a *padding* je tam systematicky nedostatečný, jsou užitečné pro úpravu jízdních rádů, případně mohou sloužit jako identifikace míst, kde by byla vhodná úprava dopravní infrastruktury (Wessel, Widener 2016).

Data o zpoždění vozidel MHD lze využívat nejen pro analýzu samotné hromadné dopravy, ale také silniční dopravy jako celku. M. Harsha a kol. (2022) provedli výzkum dopravních kongescí na základě dat AVL (automated vehicle locating) v jihoindickém městě Mysore (Maisúr). Ve studii je nejdříve zkoumána efektivita vizualizace dopravních kongescí pomocí GPS dat z autobusů, v druhé části je zkoumán vliv silničních prací a s nimi souvisejících omezení provozu na stav plynulosti dopravy ve vnitřní části města. Podrobně se autoři zabývají dvěma ulicemi s odlišnými charakteristikami – hlavní dopravní tepnou a méně vytíženou ulicí. Je zjištěno, že vliv silničních prací na plynulost dopravy lze efektivně hodnotit i pokud nejsou k dispozici údaje o počtu a rychlosti pohybu jiných vozidel, než jsou autobusy veřejné dopravy (Harsha a kol. 2022). Taková data lze znázornit pomocí časoprostorových grafů rychlosti dopravy.

Důležitým ukazatelem úzce souvisejícím se zpožděním autobusů je i spolehlivost jízdní doby, tj. pravděpodobnost, s jakou vozidlo projede daný úsek trasy za dobu určenou jízdním rádem. Bylo zjištěno, že průměrný cestující autobusem městské hromadné dopravu v Santiago de Chile by byl ochoten cestovat

o 5 minut déle, kdyby mu bylo garantováno, že se zcela vyhne nepravidelnostem v době jízdy (Soza-Parra, Raveau, Muñoz 2021).

Zkoumat lze také pravidelnost dodržování rozestupů mezi vozidly, které mají jezdit v pravidelných intervalech (v taktu). Má-li některé z vozidel zpoždění, prodlužuje se čekání cestujícího na zastávce, a navíc tak může docházet k větší obsazenosti jednoho spoje a zároveň nižší obsazenosti spoje následujícího (pokud jede bez zpoždění). Tato situace vede k nižší spokojenosti cestujících (Zhang a kol. 2019). Zhang a kol. (2019) studovali rozestupy mezi vozidly (anglicky nazýváno *headways*) ve východočínském Čí-nanu. Bylo zjištěno, že nejnestabilnější trasy se v Jinanu překvapivě nacházejí v suburbích a na okrajích centra města. Zajímavé je také zjištění, že vysoké hodnoty nestability rozestupů vozidel se nevyskytují ve špičkách, ale spíše v obdobích před špičkami. Nejvýznamnější problémy se stabilitou rozestupů vozidel tedy nevznikají v době, kdy je poptávka nejvyšší a spoje jezdí s nejvyšší frekvencí, ale v době jejího postupného nárůstu.

Všechny uvedené metody práce s daty o poloze vozidel MHD jsou aplikovány na data z velkých mimoevropských měst. Předkládaná bakalářská práce se zabývá městskou hromadnou dopravou v Mostě a Litvínově. Lze jen těžko predikovat, jaké výsledky by přinesla aplikace stejných metod na města populačně významně menší, navíc s podstatně nižší intenzitou provozu (a delšími intervaly) a kratší střední cestovní vzdáleností. Všechny uvedené studie se zabývaly pouze autobusy, v Mostě a Litvínově do analýz navíc vstupují i tramvaje, u kterých v úsecích vedení trati po odděleném tělese (což je případ naprosté většiny úseků mosteckého a litvínovského provozu) nedochází ke zdržení v dopravních zácpách. Proto byly v praktické části této práce navrženy vlastní analýzy, které jsou vhodnější pro síť MHD středně velkých evropských měst.

Také sídelní struktura a uliční síť evropských měst je odlišná, byť Most ani Litvínov v tomto ohledu nejsou zcela typickými zástupci evropského, potažmo českého města. Obě sídla byla ve 20. století ovlivněna těžbou hnědého uhlí a silnými navazujícími odvětvími průmyslu, především energetikou. Město Most bylo dokonce přesunuto a postaveno znovu „na zelené louce“ podle zásad socialistického urbanismu (Spurný 2016). Všeobecně se má za to, že tento úkol nebyl zvládnut úspěšně, a výsledkem je komplex sídlišť s absencí přirozeného historického centra. Nynější podoba centra má navíc zcela neměstský charakter. I tyto faktory ovlivňují dopravní systém ve městě.

2.2.2 Data o poloze vozidel MHD a jejich využití v českých městech

S daty o poloze vozidel MHD se může běžný uživatel setkává ve vyhledávačích spojení, kde je běžně zobrazováno aktuální zpoždění spoje, případně také poslední projeta zastávka. Vyhledávače spojení lze kategorizovat na globální a lokální.

Globální vyhledávače umožňují vyhledávat spojení různými druhy veřejné hromadné dopravy a jejich kombinacemi na celém území Česka. Zahrnutý jsou typicky i spoje městské hromadné dopravy. Mezi globální vyhledávače pro celé české území lze řadit například *IDOS*^{URL 1} vyvíjený společností CHAPS, s.r.o. nebo vyhledávač *Jízdní řády*^{URL 2} společnosti Seznam, a. s.

Lokální vyhledávače pokrývají pouze vybraný region, typicky oblast jednoho integrovaného dopravního systému. Mezi takové vyhledávače lze řadit *Vyhledávání spojení DÚK*^{URL 3} pro spoje integrované v Dopravě Ústeckého kraje (včetně mostecko-litvínovské MHD), *Hledání spojení PID*^{URL 4} pro spoje Pražské integrované dopravy, či vyhledávač v mobilní aplikaci *Idolka*^{URL 5}, ve které lze najít spoje v Integrovaném dopravním systému Libereckého kraje.

Sofistikovanějším přístupem k datům o poloze vozidel MHD jsou pro běžného uživatele interaktivní webové mapové aplikace s polohou vozidel v živém čase, často vydávané také ve formě mobilních aplikací. Taková řešení jsou dnes dostupná pro mnoho měst v Česku. Tyto aplikace umožňují uživatelům sledovat aktuální polohy dopravních prostředků v reálném čase na digitální mapě. Některé také zobrazují přesné trasy linek, aktuální zpoždění či předpokládané časy příjezdu spojů na zastávky.

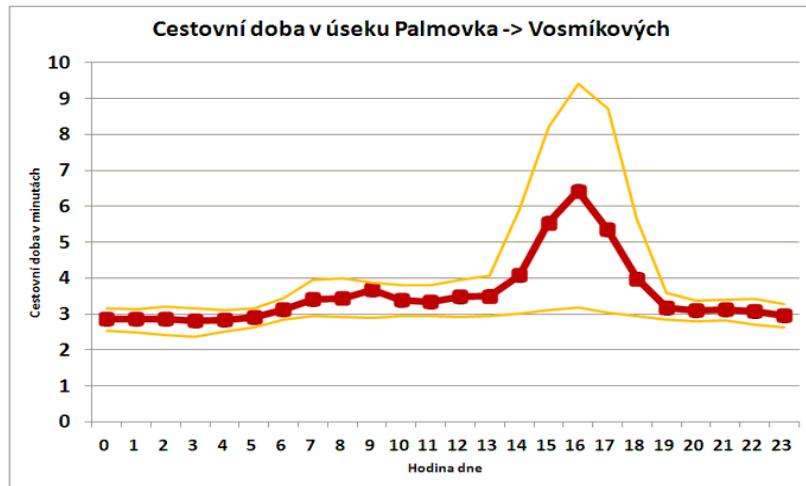
Samozřejmostí je taková služba u největších sídel – sledování svých vozidel cestujícím nabízí Pražská integrovaná doprava prostřednictvím webové aplikace *Mapa PID*^{URL 6}, vozidla brněnské MHD je možné sledovat v systému Integrované dopravy Jihomoravského kraje (webová aplikace *Sledování provozu Integrovaného dopravního systému Jihomoravského kraje*^{URL 7}). Podobné webové aplikace jsou dostupné i v jiných krajských městech, příkladem budiž Plzeň (*Mapa PMDP*^{URL 8}) či Ostrava (*Poloha vozidel DPO*^{URL 9}). Polohy vozidel MHD jsou ale dostupné i v menších městech, například v Havlíčkově Brodu (*Mapa MHD Havlíčkův Brod*^{URL 10}) nebo v Třebíči (*aplikace na mobilní telefony*^{URL 11} s operačním systémem Android). Podobné aplikace lze nalézt u mnoha dalších českých měst, často jsou data z vozidel MHD začleněny do aplikací integrovaných dopravních systémů jednotlivých krajů, jako je tomu ve zmiňovaném Brně. Dalšími takovými příklady mohou být *webová mapa*^{URL 12} Integrované dopravy Libereckého kraje (v ní jsou zobrazeny polohy vozidel MHD v České Lípě a v Jablonci nad Nisou) či obdobná *mapová aplikace*^{URL 13} Integrovaného dopravního systému Jihočeského kraje (zobrazeny vozidla MHD měst České Budějovice, Písek, Tábor, Jindřichův Hradec, Strakonice a Vimperk). Polohy vozidel integrovaných

do systému DÚK (Doprava Ústeckého kraje) jsou také publikovány formou *webové mapové aplikace*^{URL 14}, polohy vozidel MHD v Mostě a Litvínově v ní ale zobrazeny nejsou.

Díky uvedeným technologiím mohou cestující efektivněji plánovat své cesty, minimalizovat čekání a obecně lépe využívat městskou hromadnou dopravu.

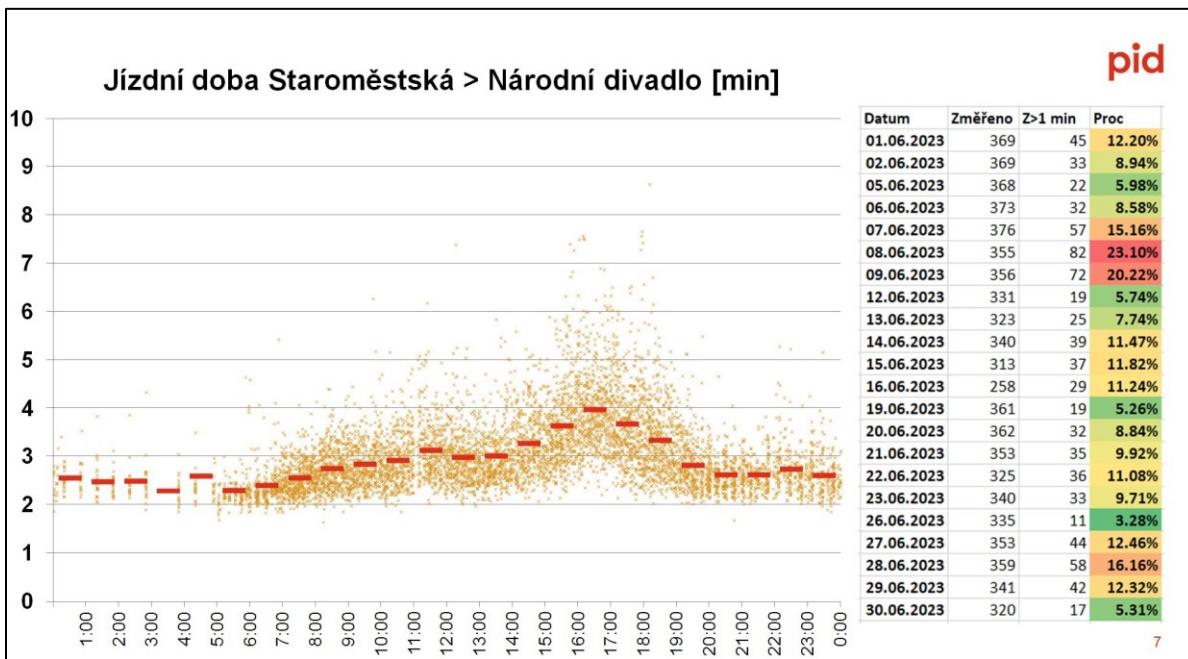
Aplikace s polohami vozidel v reálném čase jsou typicky jen pohledem na vybraná data z dispečerského systému, kde se všechna zobrazovaná data ukládají, nebo alespoň mohou ukládat. Přesto nejsou k dohledání téměř žádné analýzy těchto dat, které by pracovaly s jejich prostorovou složkou. Časoprostorovým analýzám jízdních řádů (nikoliv dat o poloze vozidel) se velmi efektně věnuje Datový portál města Brna ve své webové mapové prezentaci *Poznejte, jak funguje doprava v Brně a okolí*^{URL 15}.

Při tvorbě této práce byl prostřednictvím elektronické komunikace osloven ROPID (Regionální organizátor pražské integrované dopravy, p. o.) s žádostí o vyjádření, jaké prostorové analýzy dat o poloze vozidel provádí. Bohužel tento dotaz zůstal bez odpovědi. Přesto je možné některé informace o analýzách polohových dat v Pražské integrované dopravě čerpat z neoficiálního zdroje v podobě účtu^{URL X} Zbyňka Jiráčka, vedoucího odboru technického rozvoje a projektů ROPIDu, na sociální síti X (Twitter). Zajímavé jsou např. publikované analýzy dat o době průjezdů z hlediska tvorby zpoždění kritických úseků tramvajové sítě. Obrázek 1 například zachycuje jízdní dobu tramvají v úseku mezi zastávkami *Palmovka* a *Vosmíkových* v průběhu denní doby, obrázek 2 jízdní dobu tramvají mezi zastávkami *Staroměstská* a *Národní divadlo*.



Obrázek 1: Cestovní doba tramvají mezi zastávkami Palmovka a Vosmíkových v Praze.

Zdroj: Sociální síť X, Zbyněk Jiráček (@jiracekz)



Obrázek 2: Cestovní doba tramvají mezi zastávkami Staroměstská a Národní divadlo v Praze.

Zdroj: Sociální síť X, Zbyněk Jiráček (@jiracekz)

Takových případových studií a statistik lze na profilu Zbyňka Jiráčka najít mnoho. Není tedy pochyb, že ve velkých systémech MHD s prostorovými daty pro interní účely pracují a analyzují je, pouze nedochází k oficiální publikaci výstupů.

2.2.3 Současný přístup k analýze dat o poloze vozidel MHD v Mostě a Litvínově

Jak je podrobněji popsáno v úvodu praktické části této práce, svou *interaktivní webovou aplikaci* s polohami vozidel městské hromadné dopravy v reálném čase mají i města Most a Litvínov, ta je napojena na výstupy dispečerského systému SPRINTER. Tuto webovou aplikaci neprovozuje dopravní podnik, ale Magistrát města Most. Jedná se o specifický přístup, standardem bývají spíše řešení přímo od dodavatele dispečerského systému, případně od dopravního podniku.

Autor této práce se snažil zjistit aktuální způsoby a metody analýzy těchto polohových dat. Oddělení GIS magistrátu města Most pouze vyvíjí webovou aplikaci a ukládá data. Analýza takových dat připadá spíše do kompetence *Dopravního podniku měst Mostu a Litvínova, a. s.*, který byl v této věci osloven.

Dle vyjádření Vladimíra Šefra (2024) "statistiky generuje dispečerská aplikace. Při úpravách jízdních řádů jsou tato data využívána." Více informací nebylo autorovi práce poskytnuto. Kontaktována byla rovněž i společnost *Herman systems s.r.o.*, která nabízí používaný dispečerský systém *SPRINTER*, společnost bohužel na opakovaný dotaz do doby odevzdání této práce nereagovala.

Práce tak vychází z dat pravidelně ukládaných od 22. 6. 2020 na straně oddělení GIS Magistrátu města Most.

2.3 Geoinformatická teorie

S ohledem na charakter poskytnutých dat (formát ESRI geodatabáze) a také na obor studia autora předkládané práce bylo přistoupeno k analýze dat s využitím metod geoinformatiky. Geoinformatika spojuje oblasti geografie, informačních technologií a datové vědy, což vytváří dynamický obor, který nejen mapuje fyzické rysy naší planety, ale také odhaluje komplexní interakce mezi lidmi a jejich prostředím (Longley a kol. 2015). V době, která je počátkem éry založené na datech, se geoinformatika stává prostředkem mezioborových inovací a její význam stále roste.

Geoinformační systémy (GIS) jsou nástrojem pro analýzu, správu a vizualizaci prostorových dat, které nacházejí uplatnění v mnoha oblastech lidské činnosti, ať už v praxi nebo ve vědeckém výzkumu (Longley a kol. 2015). Základem GIS je integrace prostorových dat s atributovými informacemi, což umožňuje uživatelům komplexně pochopit a interpretovat data z různých perspektiv (Huisman, De By 2009).

Technologie GIS se neustále rozvíjejí, od desktopových platform po webové a mobilní aplikace, což zvyšuje přístupnost a flexibilitu používání prostorových dat (Longley a kol. 2015).

Své uplatnění ve velké míře nalézají GIS také v oblasti dopravy. Ať už v podobě webových a mobilních aplikací, nebo při zpracování velkého množství dat o poloze vozidel desktopovými GIS. Tímto využitím se také zabývá předkládaná práce.

2.3.1 Přehled základních využívaných geoprocessingových funkcí

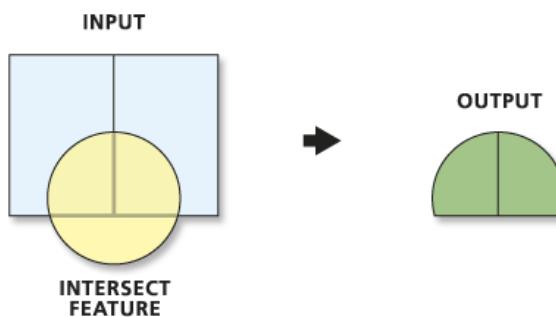
Geoprocessing je soubor nástrojů a technik v geoinformačních systémech, které jsou využívány k analýze a manipulaci s prostorovými daty. Základním prvkem geoprocessingu je geoprocessingová funkce, která nad vstupními daty realizuje příslušnou operaci a vytvářejí nová výstupní data, případně modifikuje data vstupní. Vstupem a výstupem mohou být data prostorové a atributové podstaty, i pouze prostorová či pouze atributová data. V praktické části této práce je operováno s vektorovými daty uloženými ve formátu *ESRI geodatabase* nebo *shapefile*.

Následuje popis vybraných základních geoprocessingových funkcí využitých v praktické části této práce. Uvedené funkce jsou dostupné prakticky v každém geoinformačním systému, mohou se ale lišit svými názvy. V předkládané práci jsou použity názvy funkcí z geoinformačního systému ArcGIS Pro vyvýjeného společností Esri.

První tři jmenované funkce (Intersect, Erase a Spatial Join) jsou, spolu s dalšími funkcemi, sdruženy ve skupině tzv. *Overlay funkci*, které počítají výstup na základě geometrického překryvu dvou či více vstupních vrstev. Podobně lze další dvě funkce (Buffer a Near) lze najít ve skupině tzv. *Proximity funkci*, které pracují primárně se vzdálenostmi.

Intersect

Funkce intersect identifikuje prostorový průnik mezi dvěma nebo více vrstvami a vytváří nový dataset obsahující pouze ty prvky (či jejich části), které se nachází ve společných oblastech všech vstupních vrstev, jak je znázorněno obrázkem 3.

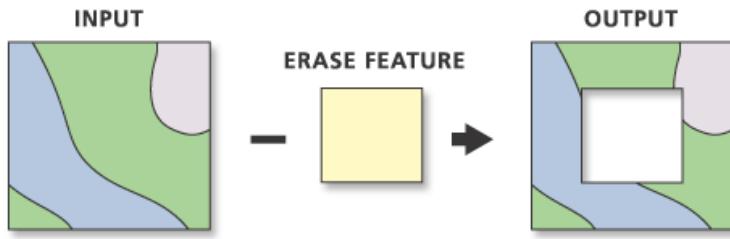


Obrázek 3: Geoprocessingová funkce Intersect.

Zdroj: Esri, ArcGIS Pro dokumentace

Erase

Funkce Erase umožňuje odstranit část jedné vrstvy (tzv. *erase layer* neboli *vymazávací vrstva*) z jiné vrstvy (tzv. *input layer* neboli *vstupní vrstva*), vytvářejíc tím novou výstupní vrstvu. Tato funkce odstraní všechny části vstupní vrstvy, které se překrývají s vrstvou vymazávací, a zachovává ty části vstupní vrstvy, které se s vymazávací vrstvou nepřekrývají, jak je znázorněno obrázkem 4.



Obrázek 4: Geoprocessingová funkce Erase.

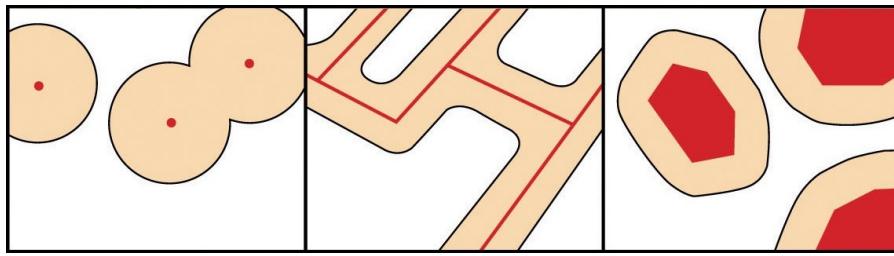
Zdroj: Esri, ArcGIS Pro dokumentace

Spatial Join

Spatial Join je funkcí, která spojuje atributová data z dvou různých prostorových vrstev na základě jejich prostorových vztahů. Tato funkce umožňuje připojit atributy z jedné vrstvy (zvané *target layer* nebo *cílová vrstva*) ke geometrickým prvkům druhé vrstvy (zvané *join layer* nebo *připojovaná vrstva*), přičemž výsledkem je nová vrstva kombinující geometrii cílové vrstvy s atributy obou původních vrstev.

Buffer

Funkce Buffer vytváří kolem vybraného objektu (či objektů) obalovou zónu specifikované šířky (obrázek 5). Tato zóna může sloužit k analýze vzdálenostních vztahů, například pro identifikaci všech objektů nacházejících se v určité vzdálenosti od daného bodu, linie nebo polygonu. Vzdálenosti od objektů mohou být počítány dvěma metodami: euklidovskou a geodetickou. Euklidovské buffery se vytvářejí na základě výpočtu vzdálenosti v rovině (kartézská soustava souřadnic), což je vhodné pro výpočet malých vzdáleností, anebo je-li pracováno s rovinným souřadnicovým systémem (projected coordinate system) (Esri 2024). Naopak při geodetickém výpočtu je uvažován přesný tvar Země a vzdálenosti jsou počítány po zakřiveném povrchu, což je přesnější pro objekty rozprostřené přes velkou plochu.



Obrázek 5: Aplikace funkce Buffer na body, linie, polygony.

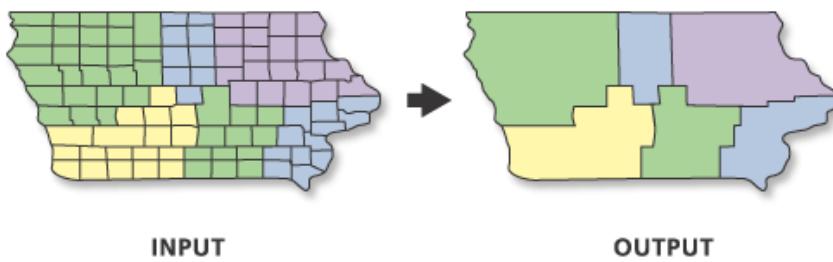
Zdroj: Saylor Academy

Near

Funkce near analyzuje vzdálenost a směr od každého prvku vstupní vrstvy k nejbližšímu prvku jiné vrstvy (může jich být více). Funkce do atributů vstupní vrstvy dokáže ukládat informace o vzdálenosti k nejbližšímu prvku jiné vrstvy, o tom, ze které vrstvy nejbližší objekt byl a také o tom, pod jakým úhlem se nejbližší nalezený objekt nachází.

Dissolve

Tato funkce, sloužící ke sjednocení prostorových objektů na základě jejich atributů, je v praktické části této práce nejčastěji využívanou funkcí. Dissolve odstraňuje hranice mezi prvky vstupní vrstvy, které mají stejné hodnoty ve specifikovaném atributu nebo skupině atributů, a vytváří novou vrstvu s většími, spojenými prvky. Při tomto procesu dokáže také do výsledné vrstvy zapisovat vypočtené statistické hodnoty o attributech vstupních vrstev, například součet či průměrnou hodnotu některého z nich. Aplikaci funkce Dissolve vrstvu polygonů názorně zachycuje obrázek 6.



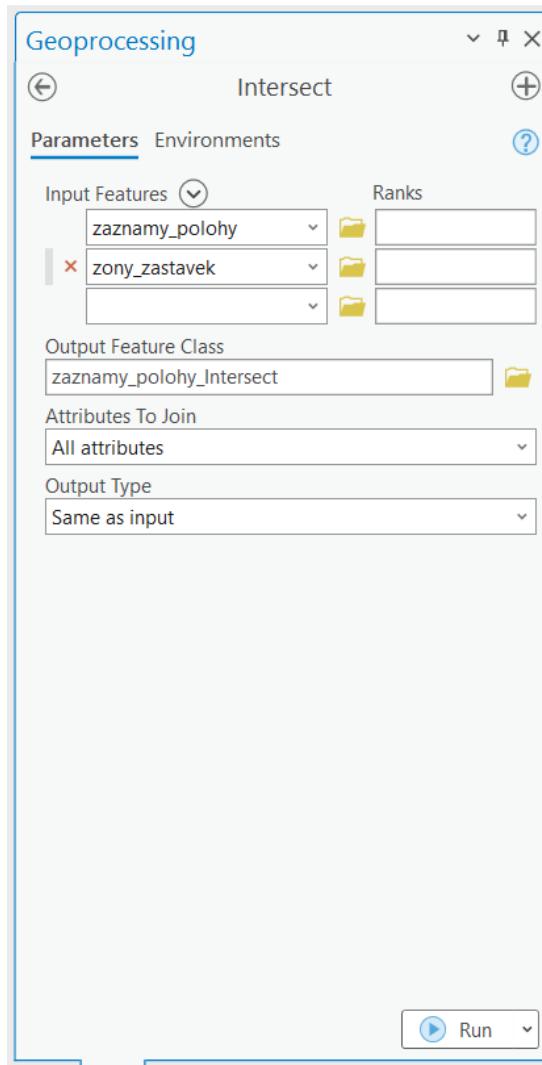
Obrázek 6: Funkce Dissolve aplikovaná na vrstvu polygonů.

Zdroj: Esri, ArcGIS Pro dokumentace

V této kapitole byly uvedeny funkce, které jsou v práci využívány opakovaně. V práci je nicméně operováno i s mnoha dalšími geoprocessingovými funkcemi. V případě, že jejich princip není zřejmý, je vysvětlen v dalším textu práce na místě, kde je taková funkce využita.

2.3.2 Automatizace geoprocessingu

Základní možnosti přístupu k geoprocessingovým funkcím je prostřednictvím grafického rozhraní vybraného geoinformačního systému. Například v softwaru ArcGIS Pro jde o panel nazvaný Geoprocessing. Uživatelé zde mohou manuálně vybírat vstupní data specifikovat parametry pro generování výstupních vrstev nebo souborů. Obrázek 7 zachycuje Geoprocessingový panel v programu ArcGIS Pro. V něm je ke spuštění připravena funkce Intersect, jejímž cílem je vytvoření nové vrstvy obsahující pouze ty body z vrstvy s názvem *zaznamy_polohy*, které se nacházejí uvnitř polygonů z vrstvy *zony_zastavek*.



Obrázek 7: Geoprocessingový panel funkce Intersect.

Pro provádění komplexnějších analýz, které vyžadují spojení několika geoprocessingových operací a kroků, je vhodné celý proces automatizovat, aby běžel neinteraktivně. Automatizace nejen zvyšuje efektivitu a snižuje možnost lidských chyb, ale také umožňuje opakované použití a sdílení vytvořených postupů. Automatizace práce s geodatami je možná v zásadě dvěma způsoby – pomocí grafických automatizačních nástrojů geoinformačních systémů, nebo pomocí skriptování.

Grafické automatizační nástroje geoinformačních systémů

Nejrozšířenější geoinformační systémy vyuvinuly vlastní grafické prostředí, ve kterém uživatelům umožňují graficky sestavovat a konfigurovat sekvence geoprocessingových operací do modelů. V softwaru ArcGIS Pro je možné funkce a nástroje skládat do posloupností ve vizuální podobě v nástroji nazývaném *Model Builder*. Obdoba tohoto nástroje v open source softwaru QGIS nese název *Model Designer*.

Tyto modely lze snadno sdílet, upravovat a znova používat, což činí procesy efektivnějšími a snižuje riziko chyb při manuálním opakování úloh. Vizualizace procesu navíc nejen usnadňuje jeho pochopení a kontrolu, ale také usnadňuje identifikaci a řešení potenciálních problémů v analýze.

Geoprocessing s využitím skriptování

Skriptování nabízí oproti grafickým modelovacím nástrojům vyšší úroveň flexibility a kontroly nad analytickými procesy. Umožňuje uživatelům využívat programovací jazyky pro psaní skriptů, které automatizují složité postupy s geoprocessingovými úlohami. Využít lze při skriptování pro nejrozšířenější GIS softwary teoreticky jakéhokoliv programovacího jazyku s podporou objektově orientovaného programování a práce s COM objekty (Grill 2008).

Nicméně v podstatě standardem pro skriptování v GIS se díky své čitelnosti, rozšířené podpoře a integraci do většiny komerčních i open source GIS platforem stal programovací jazyk Python (Grill 2008). Skriptování v Pythonu s využitím knihoven, jako je ArcPy pro ArcGIS (využitý i v této práci) nebo PyQGIS pro QGIS, umožňuje automatizovat širokou škálu geoprocessingových úloh od jednoduchých analýz až po složité modelování prostorových dat. Skriptované geoprocessingové úlohy lze navíc, stejně jako vytvořené modely, snadno sdílet a znova použít. Skripty mohou být spouštěny ručně, automaticky podle plánu, integrovány do webových služeb nebo volány z jiných aplikací.

2.3.3 Globální družicové navigační systémy

Data o poloze vozidel hromadné dopravy jsou zaznamenávána pomocí přijímačů signálu globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) umístěných na vozidlech.

Mezi GNSS není řazen pouze nejstarší a nejznámější systém Navstar GPS provozovaný americkým ministerstvem obrany, respektive jeho složkou USSF (United States Space Force), nýbrž také systémy GLONASS (Rusko), GALILEO (Evropská unie) a BeiDou (Čína). Kromě jmenovaných globálních systémů existují i systémy regionální, které pokrývají pouze část zemského povrchu. Příkladem mohou být indický či japonský navigační systém.

Účelem GNSS je přesné určení polohy přijímače na zemském povrchu. Přijímač je pasivní zařízení, které přijímá signál ze satelitů navigačního systému. Tento signál (tzv. navigační zpráva) obsahuje mimo jiné časový údaj a údaj o pozici družice obíhající Zemi, ze které byl vyslan. Je-li znám čas vyslání signálu, čas přijetí signálu a rychlosť jeho šíření, lze dopočítat vzdálenost přijímače od družice (Balek, Kýhos 2021).

Je-li výpočet polohy proveden samotným přijímačem, pouze na základě vzdáleností od družic, jde o tzv. autonomní kódové měření polohy (Balek, Kýhos 2021). Tato metoda má výhodu ve své jednoduchosti a relativně nízkých požadavcích na hardware a software přijímače. Přesnost takového měření se pohybuje v řádu jednotek metrů. Nepřesnost je způsobena především nehomogenitou a časovou proměnlivostí optické hustoty atmosféry. Odchylky vznikají také při omezeném výhledu přijímače na oblohu, především při jeho umístění mezi vysokými budovami, v hlubokých údolích či pod vegetací. Zpřesnění určování pozice je dále za geodetickými účely možné využitím referenčních stanic. Přesnost takového měření v kombinaci s dalšími geodetickými technikami dosahuje jednotek centimetrů až milimetru (Balek, Kýhos 2021).

Pro účely záznamů polohy vozidel hromadné dopravy je zpravidla využíváno autonomní kódové měření polohy, nejinak je tomu i v případě MHD v Mostě a Litvínově. Využívané čipy dnes umí přijímat signál z více GNSS současně, kombinují tedy například systémy GPS, GLONASS a GALILEO, čímž je dosaženo přesnějších měření.

3 PRAKTIČKÁ ČÁST

Praktická část této práce se zabývá analýzou dat o provozu městské hromadné dopravy ve městech Most a Litvínov. Provoz MHD je v těchto městech zajišťován společným subjektem, Dopravním podnikem měst Mostu a Litvínova, a. s.

Analyzována jsou primárně data naměřená v říjnu 2023, v některých analýzách jsou porovnávána se staršími daty. Měsíc říjen byl zvolen s ohledem na jeho reprezentativnost – jedná se o měsíc, kdy žáci a studenti dojíždějí do základních a středních škol, probíhá také výuka na vysokých školách, což ovlivňuje odliv univerzitních studentů mimo sledovaná města. Jediným faktorem ovlivňujícím běžný dopravní režim v měsíci říjnu je státní svátek Den vzniku samostatného československého státu (28. října, v roce 2023 připadl na sobotu) a podzimní prázdniny (v roce 2023 v termínu 26.–27. října).

Vzhledem k velkému objemu dat a nutnosti opakování stejných postupů pro podmnožiny dat, byla jako vhodný prostředek pro praktickou realizaci analýz zvolena automatizace procesů za pomocí skriptů psaných v jazyce Python s využitím knihovny ArcPy. Knihovna ArcPy umožňuje automatizovat práci s geoprocessingovými funkcemi softwaru ArcGIS Pro vydávaného společností Esri.

3.1 Vstupní data

Vstupními daty jsou tři datasety, které jsou uloženy jako *Feature Classes* v poskytnuté geodatabázi. V datasetu *zaznamy_polohy* jsou uloženy záznamy poloh vozidel naměřené GNSS přístroji umístěnými na autobusech a tramvajích. V datasetech *linky* a *zastavky* jsou uloženy informace o trasování jednotlivých linek MHD, respektive o poloze zastávek. Atributy každého datasetu jsou popsány v kapitole 3.1.2 Popis dat. Data jsou dostupná jako příloha této práce *MostMHD_10_23.gdb*. Veškerá data v této geodatabázi (tzn. *zaznamy_polohy*, *linky*, *zastavky*) byla získána od Odboru informačního systému města Most. Data o poloze vozidel jsou výstupem z dispečerského systému Dopravního podniku měst Mostu a Litvínova, a. s. a veřejnosti jsou dostupná ve formě interaktivní mapové aplikace na webové adrese <https://mapy.mesto-most.cz/app/mhd/>, vrstva linek a zastávek v této webové aplikaci je totožná s tabulkami *linky* a *zastavky*, se kterými je operováno v této práci.

3.1.1 Způsob sběru dat

Data tabulky *zaznamy_polohy* byla zaznamenávána GNSS přijímači umístěnými na vozidlech MHD. Pomocí CRON operací, spuštěných na straně serveru Odboru informačního systému města Most, byla data zaznamenávána v 10minutových intervalech vždy v celých deset minut (x:00, x:10, x:20 atd.), pro účely této práce bylo zaznamenávání v průběhu října 2023 zahouštěno o měření v časy x:03, x:05, x:07, x:21, x:25, x:27, x:29, x:33, x:36, x:51, x:55, x:57. Tyto časy byly zvoleny s ohledem na analýzu spolehlivosti přestupních vazeb na přestupních uzlech (kapitola 3.6). Celkem tedy byla data zaznamenávána v průběhu každé hodiny 18krát. Záznamy byly ukládány do Esri geodatabáze (formát *file geodatabase*).

3.1.2 Popis dat

3.1.2.1 Záznamy polohy

Feature class s názvem *zaznamy_polohy_orig* geodatabáze *MostMHD_10_23.gdb* nese data o záznamech poloh vozidel, od ní byly pro účely předkládané práce odvozeny další upravené datové sady. Celkem bylo za měsíc říjen 2023 zaznamenáno **291 382** poloh vozidel. Tabulka 1 popisuje atributy zaznamenaných dat.

Tabulka 1: Atributy datasetu *zaznamy_polohy_orig* a odvozených datových sad.

Název atributu	Význam	Datový typ
OBJECTID	Unikátní identifikátor záznamu	Object ID
CISLO_VOZIDLA	Číslo vozidla	Long Integer
CISLO_LINKY	Číslo linky	Long Integer
BEZBARIEROVOST	Bezbariérovost vozidla (Ano/Ne)	Text string
ZPOZDENI_MIN	Zpoždění spoje v okamžiku záznamu	Long Integer
POSLEDNI_ZASTAVKA_ID	Identifikátor poslední obsloužené zastávky	Long Integer
POSLEDNI_ZASTAVKA_NAME	Název poslední obsloužené zastávky	Text string
CILOVA_ZASTAVKA_ID	Identifikátor konečné zastávky spoje	Long Integer
CILOVA_ZASTAVKA_NAME	Název konečné zastávky spoje	Text string
AZIMUT	Azimut pohybu vozidla	Long Integer
RYCHLOST_KM_H	Rychlosť pohybu vozidla	Long Integer
TIME_DATE	Časová značka záznamu	Date

Následuje popis hodnot vybraných atributů. Atributy týkající se čísel linek a zastávek jsou podrobně probrány v kapitole 3.2 Atributová kontrola.

- **CISLO_VOZIDLA**

V záznamech se objevuje celkem 100 vozidel MHD, v provozu jsou vozidla s číselným označením mezi 4 a 526. Atribut by mohl být využit pro rekonstrukci oběhu vozidel, případně pro zjištění efektivity (četnosti) jejich využití. Takovými informacemi ale Dopravní podnik v prvním případě disponuje, v případě druhém má efektivnější nástroje k jejich zjištění. Analýza tohoto atributu proto není součástí této práce.

- **ZPOZDENI_VOZIDLA**

Hodnota určuje zpoždění vozidla v minutách, záporné hodnoty označují náskok vozidla (předjetí) oproti jízdnímu řádu.

- **AZIMUT**

Všechny záznamy splňují podmínu, že azimut nabývá hodnot mezi 0 a 359. Ze zaznamenaných dat vyplývá, že směr je v záznamu zaokrouhlován, kruh směrů je pro potřeby záznamu dat rozdelen na 16 segmentů, atribut nabývá hodnot 0, 22, 45, 67, 90, 112, 135, 157, 180, 202, 225, 247, 270, 292, 315 a 337.

- **RYCHLOST_KM_H**

Všechny zaznamenané rychlosti pohybu vozidla jsou nezáporné, atribut nabývá hodnot 0-123.

Hodnoty 121, 122 a 123 nesou speciální význam:

- 121 - staničení vozidla v zastávce
 - 122 - čekání vozidla před jízdou
 - 123 - jízda vozidla na první zastávku na trase
- **TIME_DATE**

Všechny záznamy byly naměřeny od 1. 10. 2023 do 31. 10. 2023 včetně. Časová přesnost záznamu je jedna sekunda.

Odvozená datová sada *zaznamy_polohy_ocisteno*

Po provedení atributové a prostorové kontroly dat je vytvořena verze originálních dat očištěná o chyby, které by mohly komplikovat další analýzy. Strukturou jsou data zcela totožná, jen jsou odstraněny nepřesné záznamy a ve výjimečných případech upraveny některé atributy (viz kapitoly 3.2 a 3.3).

Odvozená datová sada *zaznamy_polohy*

Ve dvou rozsáhých analýzách předkládané práce (analýza rozložení zpoždění dle trasy linky a denní doby (kapitola 3.4) Analýze zpoždění na jednotlivých zastávkách (kapitola 3.5)) je využita datová sada *zaznamy_polohy_ocisteno* ze které jsou odfiltrovány záznamy s naměřenými rychlostmi 121, 122 a 123 km/h. Tyto rychlosti symbolizují staničení vozidla v zastávce, čekání vozidla před jízdou a jízdu vozidla na první zastávku. Rovněž jsou odfiltrovány záznamy se zpožděním vyšším než 60 minut a násokem proti jízdnímu rádu vyšším než 20 minut (zpoždění < -20).

Důvody využití takto upravených dat jsou popsány na odpovídajících místech v kapitolách věnujících se dotčeným analýzám (3.4 a 3.5).

Odvozená datová sada *zaznamy_polohy_od_2020*

Jde o data shodná s daty *zaznamy_polohy_ocisteno* ukládaná od 22. 6. 2020 do 31. 12. 2023. Záznam dat uložených v datasetu *zaznamy_polohy_od_2020* probíhal pouze v 10minutových intervalech vždy v celých deset minut (x:00, x:10, x:20 atd.) s výjimkou období překryvu s daty *zaznamy_polohy_orig* (tj. v říjnu 2023), kdy jsou data ukládána ve stejných časech. Data jsou očištěna a vyfiltrována stejným způsobem, jako v případě datové sady *zaznamy_polohy*.

3.1.2.2 Linky

Feature class s názvem *linky_orig* geodatabáze *MostMHD_10_23.gdb* nese data o vedení linek sítě MHD v Mostě a Litvínově. Jednotlivé linky nefigurují v datech jako spojitá linie, ale jsou křížením linek rozdeleny na segmenty. Tabulka 2 popisuje atributy originální *feature class* *linky*.

Tabulka 2: Atributy datasetu *linky_orig*.

Název atributu	Význam	Datový typ
OBJECTID	Unikátní identifikátor záznamu	Object ID
LINKA	Číslo linky	Short Integer
TYP	Typ linky (autobus/tramvaj)	Short Integer
Shape_Length	Délka segmentu	Double

Atribut TYP je datový typ Short Integer, v geodatabázi je vytvořena doména, která číselným hodnotám přiřazuje význam takto:

- 0 = neurčeno
- 1 = tramvaj
- 2 = autobus
- 8 = ke zrušení
- 9 = zrušeno

V databázi lze tedy schraňovat i historii záznamů o poloze vozidel na aktuálně neexistujících linkách, které jsou v seznamu označeny jako zrušené, v datech se ale žádné takové záznamy nevyskytují.

Odvozená datová sada *linky*

Ve všech analýzách v této práci je využit upravený dataset *linky*, ve kterém byly linie z tabulky *linky_orig* pomocí funkce *dissolve* na základě atributu *CISLO_LINKY* sjednoceny do souvislých linií. V těchto datech oproti originálnímu datasetu chybí atribut TYP.

3.1.2.3 Zastávky

Feature class s názvem *zastavky_orig* geodatabáze *MostMHD_10_23.gdb* nese data o zastávkách sítě MHD v Mostě a Litvínově. Každý záznam označuje jeden odjezdový sloupek, existuje proto zpravidla více záznamů pro zastávku jednoho názvu – minimálně jeden pro každý směr. Pro účely vybraných analýz a vizualizací dat v této práci jsou zastávky se shodným názvem sjednoceny do jednoho bodu. Tabulka 3 popisuje atributy originální *feature class* *zastavky*.

Tabulka 3: Atributy datasetu zastavky.

Název atributu	Význam	Datový typ
OBJECTID	Unikátní identifikátor záznamu	Object ID
TYP	Typ zastávky – kód	Short Integer
CISLO	Číslo zastávky	Short Integer
NAZEV	Název zastávky	Text string
PASPORT	ID pro pasportizaci	Short Integer
SLOUPEK	ID odjezdového sloupku zastávky	Short Integer
PASP_SLO	ID sloupku pro pasportizaci – formát PASPORT/SLOUPEK	Text string
NAZ	Název zastávky – shodný s NAZEV	Text string
IdZastavka	ID zastávky – shodné s PASPORT	Text string
LINKY	Výčet linek (oddělených čárkou) obsluhujících zastávku	Text string
SMER	Směr zastávky označený písmenem A, B, C, D	Text string
PASMO	Tarifní pásmo	Text string
TYP_NAZEV	Atribut TYP zapsán slovně (tramvaj/autobus)	Text string

Atribut TYP nabývá hodnot 1 nebo 2, kde 1 označuje tramvajovou zastávku a 2 autobusovou zastávku.

Odvozená datová sada *zastavky*

V datové sadě *zastavky_orig* je uloženo většinou více odjezdových sloupců stejného jména, které připadají jedné zastávce. Takové odjezdové sloupky byly na základě jejich názvu sjednoceny, souřadnice takto vytvořené zastávky jsou průměrem souřadnic sjednocených bodů. Toho bylo docíleno kombinací funkcí *dissolve* a *Feature to point*. Zachovány jsou pouze atributy NAZEV a LINKY. Atribut linky sdružuje seznamy linek ze všech originálních odjezdových sloupců – u funkce *dissolve* bylo využito parametru *statistics fields* a nastaveným statistickým operátorem *concatenate* (s oddělovačem „;“). Čísla linek se v atributu mohou opakovat. V datové sadě existuje i atribut unikátního identifikátoru záznamu OBJECT_ID, jeho hodnoty ale nemají souvislost s hodnotami v původní tabulce *zastavky_orig*.

3.2 Atributová kontrola dat

Pro možnost provádět sofistikovanější analýzy nad naměřenými daty, je důležité zajistit konzistentnost těchto vstupních dat, provést jejich důkladnou atributovou kontrolu a očistit je od případných chyb. Konkrétní atributové chyby jsou diskutovány v kapitole 3.2.4.

Atributovou kontrolou se rozumí kontrola hodnot zapsaných v attributech. Hodnoty jsou kontrolovány, pokud mají omezené množství hodnot, kterých mohou nabývat. Pokud mezi sebou navzájem souvisejí data z více tabulek, je provedena kontrola atributů z příslušných tabulek mezi sebou.

3.2.1 Cíle

Cílem atributové kontroly naměřených dat bylo vyloučit nesrovnalosti v hodnotách atributů, tzn. identifikovat čísla linek a názvy zastávek vyskytující se v bodových datech, které nefigurují v datasetu linek a datasetu zastávek, nebo opačně. Cílem porovnání není pouze kontrola atributů bodových záznamů polohy (tabulka *zaznamy_polohy_orig*), ale jde o křížovou kontrolu, při které jsou ověřována i data o linkách (*linky*) a zastávkách (*zastavky_orig*). Kontrolovány byly všechny zásadní atributy, se kterými je v dalších analýzách operováno a které se vyskytují ve dvou tabulkách. Mezi sebou jsou porovnávány tyto atributy:

zaznamy_polohy_orig.CISLO_LINKY a *linky.LINKA*,
zaznamy_polohy_orig.CILOVA_ZASTAVKA_NAME a *zastavky_orig.NAZEV*,
zaznamy_polohy_orig.POSLEDNI_ZASTAVKA_NAME a *zastavky_orig.NAZEV*

Cílem je identifikovat nesrovnalosti v datech a provést jejich korekci, bud' v datech zaznamenaných poloh, nebo v datech linek a zastávek.

3.2.2 Praktická realizace

Přečtením atributů z tabulek *zaznamy_polohy_orig*, *linky* a *zastavky_orig* byly vytvořeny sety zaznamenaných hodnot sledovaných atributů. Hodnoty, které byly zaznamenány v jedné tabulce, ale nevyskytují se ve druhé tabulce, byly identifikovány zjištěním rozdílu mezi množinami hodnot obou atributů (v pythonu voláním metody *difference* na druhý set, jako např. *set_zaznamy_polohy_orig.difference(set_linky)* a opačně).

Pro provedení kontroly seznamu zastávek byly odstraněny 2 zjevné chyby v datech, kdy zastávky *Černice, mlékárna* a *Záluží, CHEMOPETROL* byly v tabulce *zastavky_orig* zapsány s mezerou za čárkou

(tak jako výše), zatímco v tabulce *zaznamy_polohy_orig* jsou názvy zastávek uvedeny bez mezer (např. *Černice, mlékárna*).

Skript *atributova_kontrola.py*, sloužící k identifikaci unikátních hodnot atributů a jejich porovnání je přílohou této práce.

3.2.3 Výsledky

Číslo linky

Síť MHD měst Most a Litvínov se skládá z celkem 31 linek. Jde o 4 tramvajové linky označené čísla **1, 2, 3, 40** a 27 autobusových linek nesoucích číselné označení **5, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 30, 31, 50, 51, 53, 60**.

V záznamech v tabulce *zaznamy_polohy_orig* se kromě všech linek z tabulky *linky* objevují také záznamy linek s označením **41** a **122**.

Záznamy o lince **41** se v řídké hustotě objevují mezi zastávkami *Loučná, konečná* a *H. Jiřetín, pekařství*, všechny záznamy pocházejí z nočních hodin mezi 3:25 a 4:10. Jedná se o poslední pozůstatek litvínovské noční autobusové dopravy (čemuž by odpovídalo číslo 41, protože číslo 40 je použito pro noční tramvaj). Trasováním jde o spoj linky 13, který ze zastávky *Hamr* pokračuje dále po trase linky 14 až do zastávky *H. Jiřetín, pekařství*. Tato linka je na vozidle označena jako linka X. Protože dispečerský systém neumí pracovat s označením linky písmenem, je k ní přiřazeno číselné označení 41. Tato linka nemá svůj jízdní řád a její spoje jsou vedeny v jízdních rádech linek č. 13, 14 a 15. V současnosti se připravuje úprava této linky spočívající v jejím novém číselném označení, trase a osamostatnění v jízdních rádech (Šefr 2024).

Záznamy o lince **122** tvoří zdánlivě okružní trasu mezi Litvínovem, Horním Jiřetím a Zálužím, s odbočkami do Komořan a Lomu. Ze záznamů lze předpokládat, že linka obsluhuje Elektrárnu Komořany i důl Československé armády. V Záluží jsou 2 body naměřeny přímo v areálu výrobních provozů společnosti Unipetrol RPA.

Po porovnání jízdních řádů a časů záznamů linky s označením 122 byla nalezena souvislost s prodlouženými větvemi linky 12. Záznamy s označením 122 jsou spoje (celkem 4 denně) linky 12, která nestandardně pokračuje po trase linek 13 a 14 (2 spoje), respektive začíná po trase linek 13 a 14. Tyto spoje jsou historickým odkazem na různě vedené spoje pro obsluhu dolů, kdy se pro každou verzi trasy nepřidělovalo samostatné číslo linky (Šefr 2024).

Dle vyjádření Dopravní podniku je důvodem k vytvoření speciálního interního číslování těchto spojů zjednodušení grafikonů standardní linky č. 12 (Šefr 2024).

Konečná zastávka

Nebyla identifikována žádná konečná zastávka z tabulky *zaznamy_poloxy_orig*, která by nefigurovala v seznamu posledních zastávek v tabulce *zastavky_orig*.

Poslední zastávka

Tento atribut označuje v datech *zaznamy_poloxy_orig* poslední projetou zastávku. V záznamech bylo identifikováno 8 takových zastávek, které se vyskytovaly v datech o poloze (*zaznamy_poloxy_orig*), ale neexistují v tabulce obsluhovaných zastávek sítě MHD *zastavky_orig*. Jde o zastávky s názvy **Mazut, Administrativní budova, P S P, Chladící věže, Zauhlování, Dvoustovka, Česká rafinerská a Nová rafinerie**. Záznamy s těmito posledními zastávkami byly (s výjimkou zmíněnou níže) v počtu 1 až 6 záznamů (celkem 21) pořízeny v areálu výrobních provozů společnosti Unipetrol RPA. Nabízí se spojitost s linkou 122 zmiňovanou v kapitole 3.2.3.1., nicméně v záznamech se objevují jiná čísla linek, linka 122 je dokonce zaznamenána pouze jednou. Výjimku ze zbytku zastávek tvoří zastávka *Nová rafinerie*, která figuruje u 7 záznamů linky 27, přičemž záznamy tvoří cluster na Litvínovském nádraží. Tyto záznamy jsou všechny pořízeny s datem 29. 10. mezi 6:36 a 6:57, zatímco záznamy z ostatních zastávek jsou časově distribuovány náhodně.

Porovnání datasetů bylo provedeno i v opačném směru a byly identifikovány 2 zastávky, ke kterým neexistuje záznam, ve kterém by daná zastávka figurovala jako poslední projeta. V případě zastávky *Litvínov, Ruská ul.* je vysvětlení jasné, jedná se pouze o výstupní zastávku linky 60. Druhým případem je zastávka *Havraň, Joseph vodojem*, jde o relativně novou zastávku, která je v provozu od 1. 7. 2022. Do systému dopravního podniku byla, dle záznamů z datové sady *zaznam_poloxy_2020_2023* přidána až v listopadu 2023, tudíž nemůže figurovat jako poslední projeta zastávka v datech z října 2023. O této chybě nemá Dopravní podnik další informace, předpokládá, že se „jedná o chybu nebo špatně uvedenou zastávku“ (Šefr 2024).

3.2.4 Diskuse

Vzájemnou (křížovou) kontrolu konzistence dat lze provést, pokud vyžadujeme, aby se shodovala množina hodnot v atributu jedné tabulky s množinou hodnot atributu druhé tabulky, případně pokud vyžadujeme, aby množina hodnot atributu jedné tabulky byla podmnožinou množiny hodnot atributu druhé tabulky. V případě nalezení nekonzistence mezi daty je možné provést opravu dat, pokud je vznik chyby a způsob

její opravy zřejmý. V opačném případě je vhodné nekonzistentní data z tabulek odstranit, aby nebyly ovlivňovány výsledky dalších analýz.

Atributová kontrola by před zahájením dalších analýz nebyla nezbytná, pokud by bylo jisté, že data jsou zcela konzistentní a bez chyb, což nelze garantovat téměř nikdy. Minimalizovat riziko zanesení chyb do dat umožňuje nastavení domén v geodatabázi, které definují množinu přípustných hodnot daného atributu. Doména může být definována výčtem hodnot, případně přípustným rozmezím. V poskytnuté geodatabázi figurují pouze domény pro atributy *linky.TYP* a *zastavky_orig.TYP*. V případě tvorby dalších domén by bylo nutné uvažovat nad tím, jak často dochází ke změnám v množině přípustných hodnot (např. vytvořením nové zastávky či nového čísla linky, nebo naopak jejich zrušením), tedy jak často by bylo nutné nastavení domén editovat.

Přínosem pro správu dat by mohla být normalizace databáze, v současné podobě dochází k redundancii některých dat. Příkladem může být zápis *POSLEDNI_ZASTAVKA_NAME* a *POSLEDNI_ZASTAVKA_ID* v tabulce *zaznamy_polohy_orig* (stejně jako *CILOVA_ZASTAVKA_NAME* a *CILOVA_ZASTAVKA_ID* v téže tabulce). V obou případech by bylo možné zapisovat pouze atribut s koncovkou ID, jelikož atribut name je dohledatelný v tabulce *zastavky_orig*. Tím by se předešlo i výše zmíněnému problému s jinak zapisovanými čárkami v názvech zastávek v tabulkách *zaznamy_polohy_orig* a *zastavky_orig*, protože textový název zastávky by byl uložen pouze v tabulce *zastavky_orig* a klíči spojujícími obě tabulky by byly atributy *zaznamy_polohy_orig.POSLEDNI_ZASTAVKA_ID* a *zastavky_orig.IdZastavka*.

Za předpokladu, že bezbariérovost spoje je závislá pouze na vozidlu, které spoj obsluhuje, by bylo také možné vytvořit samostatnou tabulku spojující atributy *zaznamy_polohy_orig.CISLO VOZIDLA* a *zaznamy_polohy_orig.BEZBARIEROVOST* a předejít tak opakování dat o bezbariérovosti v tabulce *zaznamy_polohy_orig*.

Výše uvedené postupy sice platí v databázové teorii, prakticky je ale současný způsob ukládání dat dobré čitelný a vhodný pro účely, ke kterým je tato geodatabáze využívána.

Jako nevhodná se jeví volba názvu atributů *zaznamy_polohy_orig.POSLEDNI_ZASTAVKA_NAME* a *zaznamy_polohy_orig.CILOVA_ZASTAVKA_NAME*, územ je volba jednojazyčných názvů - vhodnější by tedy byla (pro první uvedený případ) volba *LAST_STOP_NAME*, nebo *POSLEDNI_ZASTAVKA_NAZEV*. V této práci je nicméně operováno s názvy atributů z originálních dat.

3.3 Prostorová kontrola dat – rekonstrukce tras linek z naměřených záznamů, identifikace mimořádností

Pro možnost provádět sofistikovanější analýzy nad naměřenými daty je, kromě důkladné kontroly atributových dat (viz kapitolu 3.2), zásadní také kontrola prostorová. V té je nezbytné ověřit polohovou přesnost zaznamenaných dat a zjistit, zda se naměřené body nacházejí na trase odpovídající linky. Body se nemusejí nacházet přímo na geometrické linii příslušné linky, jelikož přesnost GNSS záznamů není dokonalá. Stanovením tolerance odchylky měření se také zabývá tato část práce.

Součástí prostorové kontroly dat se rozumí též porovnání geometrií dat z tabulek *zaznamy_polohy_orig* a *linky*. Aby bylo možné porovnat trasování vozidel v reálném provozu (body z tabulky *zaznamy_polohy_orig*) s liniemi linek (tak jak jsou uloženy v tabulce *linky*) je nutné vytvořit z bodů pomyslné linie po kterých se vozidla reálně pohybovala – tyto pomyslné linie jsou reprezentovány polygony, které obalují dostatečně koncentrované shluky bodů naměřené pro danou linku. Takové polygony jsou dále nazývány jako koridory linky.

Bez této kontroly, kterou se zabývá následující část práce, by mohly být výsledky dalších analýz zavádějící. Konkrétní zjištěné prostorové chyby jsou diskutovány v kapitole 3.2.4.

3.3.1 Cíle

Cílem této části práce je:

1. odstranit polohově nepřesné záznamy – zjevné chyby a nereálné hodnoty měření GNSS (např. body mimo území provozu, mimo komunikace apod.).
2. automatizovat rekonstrukci reálných tras linek MHD a identifikovat případný nesoulad mezi plánovanou a realizovanou trasou linky, který může být způsoben chybou v datech linek (nesouladem tras linek s reálnými trasami spojů), trvalou změnou trasy linky v průběhu sledovaného období, plánovanou výlukou (objízdnou trasou, tedy krátkodobou změnou trasy linky) či neplánovanou mimořádností.

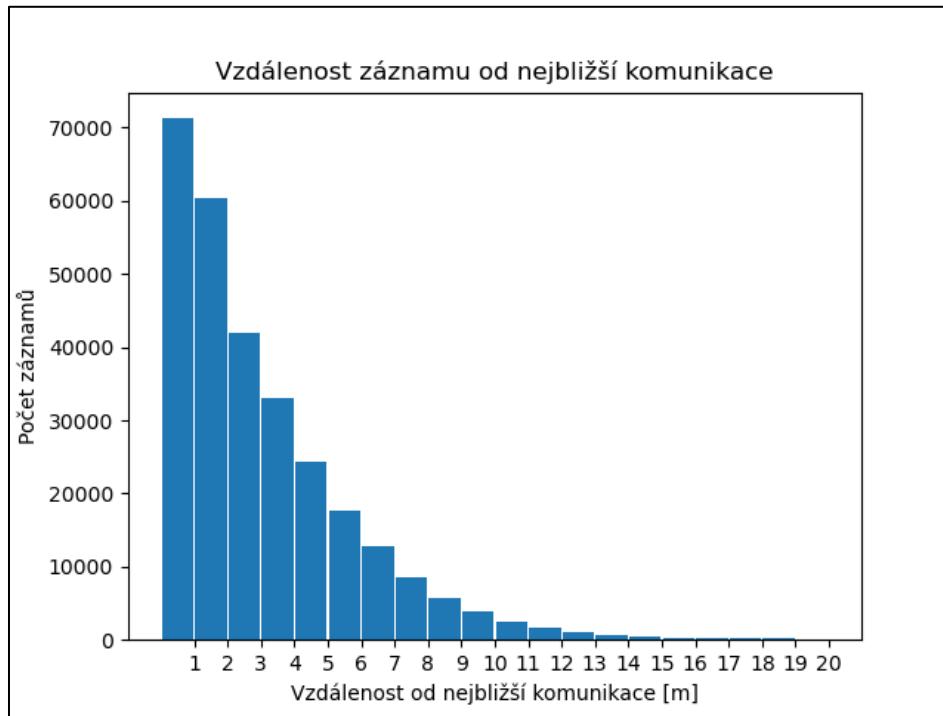
Na základě koncentrace naměřených bodů by za tímto účelem měl být vytvořen koridor trasy linky, tedy označena trasa, kterou vozidla reálně vykonala v provozu. Porovnání takto vymodelované trasy s geometrií příslušné linky z tabulky *linky* (reprezentující plánovanou trasu) vede k identifikaci míst, kde se reálná trasa odchyluje od trasy plánované. Poté lze označit místa, kde spoje jezdit mají, ale v reálu nejezdí, a naopak.

3.3.2 Praktická realizace

Odstanění polohově nepřesných záznamů

Polohově zjevně nepřesné záznamy zcela mimo sledované území, definovány jako záznamy nacházející se mimo obdélníkový extent vrstvy linek a zastávek zvětšený o 2 km, byly z dat odstraněny. Vzdálenost 2 km byla po testování zvolena jako dostatečná, pravděpodobnost mimořádnosti v provozu, která by vedla k pohybu vozidel mimo tento rozsah, je minimální. U ostatních naměřených dat byla provedena kontrola jejich odchylky od osy nejbližší komunikace. Využity byly objekty silničních komunikací z datové sady ZABAGED od ČÚZK (tzn. objekty *Ulice* a *SilniceDalnice*) a objekty tramvajových tratí z dat Open Street Maps (objekty *railways*, kde hodnota atributu *fclass* je *tram*). ZABAGED byla zvolena s ohledem na vhodný stupeň generalizace pro objekty ulic, silnic a dálnic a jejich správnou kategorizaci. Nedochází v ní k míchání s chodníky, cestami či pěšinami jako v případě dat z Open Street Maps (kde jsou data tvořena samotnými uživateli a jsou tak výrazně náchylnější k chybám). Objekty tramvajových tratí byly přesto vybrány z dat OSM z důvodu jejich přesnějšího zakreslení v případech dvoukolejnosti trati. Geoprocessingovou funkcí *near* byla vypočtena vzdálenost každého záznamu od nejbližší komunikace či tramvajové trati. Výpočet byl rozdělen na záznamy tramvajové a autobusové, aby nedošlo k výpočtu vzdálenosti autobusových záznamů ke kolejím či naopak.

Medián vzdáleností záznamů k nejbližší ose komunikace je **3,32 metru**. V potaz je nutné brát i to, že linie komunikace vede jejím středem, ale komunikace je v reálu široká minimálně 5,5 metru (ČSN 73 6110). Na základě distribuce vzdáleností (graf 1) byla zvolena hraniční hodnota 12 metrů. Záznamy se vzdáleností vyšší než 12 metrů od nejbližší komunikace byly vyhodnoceny jako polohově příliš nepřesné záznamy. Příliš nepřesných záznamů je 1,89 % ze všech. V případě nastavení menší přípustné odchylky by pravděpodobně bylo vyřazeno mnoho validních záznamů.



Graf 1: Vzdálenost záznamu polohy od nejbližší komunikace.

Absolutní polohová přesnost není pro účely dalších analýz nezbytná, body mohou být v případě potřeby přichyceny na nejbližší komunikaci. Při nastavení vyšší tolerance by ale mohlo docházet k přichytávání na nesprávnou komunikaci. V potaz bylo bráno i paralelní vedení samostatného tělesa tramvajové tratě asilnice mezi Mostem a Litvínovem. Vzdálenost mezi osou silnice a osou přilehlých kolejí tramvajové tratě se pohybuje v místech jejich nejbližšího souběhu mezi 10–12 metry. Aby došlo ke správné identifikaci, zda jde o záznam pro jednu či druhou komunikaci, bylo by v tomto případě korektní nastavit hranici 5–6 metrů. V tomto konkrétním případě lze ale v bodových záznamech (tabulka *zaznamy_polohy_orig*) rozlišit, zda jde o záznam polohy tramvaje, či autobusu, čímž je v dalších analýzách možné přiřazovat záznamy ke správné komunikaci (tramvajové trati nebo silnici). Navíc by například při nastavení hranice 5,5 metru bylo odstraněno 16,71 % záznamů – vzhledem k vlastnostem GNSS přijímačů nelze předpokládat takto vysokou reálnou chybovost měření.

Automatizace rekonstrukce reálné trasy linky, její porovnání s plánovanou trasou

Celý níže popsaný postup je proveden pro každou linku zvlášť. Postup se skládá ze dvou fází:

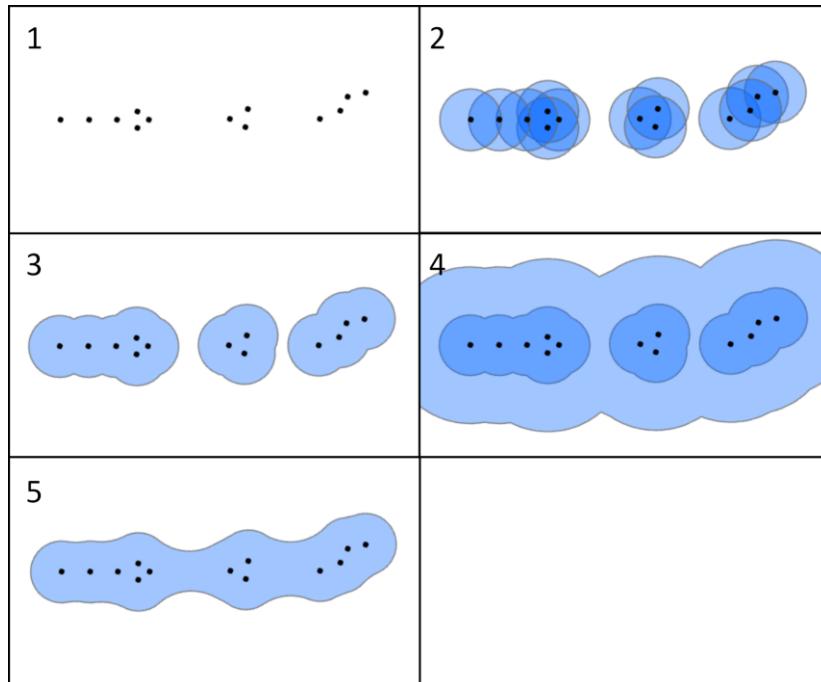
1. Vytvoření průjezdních koridorů linek na základě naměřených záznamů poloh vozidel.
2. Porovnání vytvořených koridorů s plánovanými trasami linek dle datasetu *linky*.

Při provedení této části práci nebylo operováno s body s naměřenou rychlostí 123, která (viz kapitolu 3.1.2) symbolizuje jízdu vozidla na první zastávku. Takové záznamy se z logiky věci vyskytují mimo plánovanou trasu dle tabulky *linky*.

První fáze postupu vytváří průjezdové koridory linky z naměřených bodů. Schematický průběh postupu zobrazuje obrázek 8, v textu jsou jednotlivé kroky označeny čísly.

Nejdříve jsou z dat naměřených bodů (*zaznamy_poloxy_orig*) vyfiltrovány pouze body vztahující se ke konkrétnímu číslu linky (1), stejně jako z datasetu linek (*linky*) pravidelná trasa dané linky. Kolem záznamů polohy je vytvořen *buffer* o velikosti 15 m (2) (15 metrů je zvoleno po empirickém testování jako nejfektivnější hodnota pro účely dalšího postupu). Vytvořené polygony jsou následně spojeny do jednoho (3) (v ArcPy pomocí geoprocessingové funkce *dissolve*).

Vzniklý polygon je rozšířen pomocí bufferu o velikosti 75 m (4) a následně zmenšen pomocí záporného bufferu stejné velikosti. Tímto postupem bylo docíleno zacelení drobných mezer mezi nenapojenými úsekům koridoru v méně frekventovaných úsecích linek (5). Jde o vektorovou analogii morfologických operací dilatace a eroze, prováděných za stejným účelem v rastrovém modelu, taková posloupnost aplikace morfologických operátorů je nazývána *uzavřením rastru* (Ansault, Soille 1990).



Obrázek 8: Schématický postup tvorby koridoru linky.

Cílem druhé fáze výpočtu je porovnat shodu vytvořeného koridoru linky (který vyplývá z poloh vozidla v tabulce *zaznamy_polohy_orig*) s plánovanou trasou z tabulky *linky*. V ideálním případě leží celá linie linky v koridoru vytvořeném v první fázi výpočtu. Pokud tato situace nenastane, dochází ke dvěma situacím: úseky linie z tabulky *linky* leží mimo koridor (situace a), nebo se pomyslná linie koridoru nepřekrývá s linií z tabulky *linky* (situace b).

Za účelem identifikace míst, kde plánovaná linka není překryta vytvořeným polygonem (situace a) byla od předpokládané trasy z tabulky *linky* odečtena vrstva vytvořeného koridoru, využito bylo geoprocessingové funkce *erase*. Výsledkem jsou linie, kde vozidla dle plánu (z tabulky *linky*) měla jezdit, ale nejezdí. Z výsledků jsou vybrány linie, které jsou delší než 150 metrů. Po testování na zkoumaných datech bylo shledáno, že tato hodnota vyřadí z výsledků krátké úseky vzniklé nespojitostí koridoru v části linky, ale zároveň pravděpodobně neodebere žádnou reálnou nesrovnost v datech. Takové úseky (delší než 150 metrů) jsou uloženy do výstupního souboru *useky_mimo_{cislo_linky}.shp* pro každou linku samostatně. Zároveň je vytvořen textový soubor *output_linka_mimo.txt*, do kterého se ukládá výpis jednotlivých nesouhlasících úseků linky s informací o jejich délce a poloze. Soubor *output_linka_mimo.txt* sdružuje seznam úseků pro všechny zpracované linky, včetně úseků kratších než 150 metrů.

Za účelem porovnání v opačném směru (identifikace situace b), tedy plánované linie s linky s vytvořeným polygonem reálného trasování linky, je kolem linie z tabulky *linky* vytvořen *buffer* velikosti 100 metrů (hodnota určena po opakovaných pokusech jako nejefektivnější). Opět byla využita funkce *erase*, od vrstvy koridoru realizované trasy linky je odečtena vrstva vytvořeného bufferu kolem plánované linky. Tím jsou identifikovány segmenty, kde vozidla jezdí mimo svou plánovanou trasu. Takové segmenty jsou uloženy do souboru *kor_{zpr_linka}_mimo.shp*. Identifikovány jsou i malé polygony kolem jednotlivých izolovaných bodů a štěpiny na rozhraních překryvu vrstev. Aby byly ve výsledku pouze relevantní polygony, byla po testování stanovena hranice minimální velikosti polygonu na 2 000 m², menší polygony jsou z výsledků odstraněny.

Úseky koridoru (větší než 2 000 m²), kde vozidla nemají dle plánu jezdit, ale jezdí, jsou uloženy do výstupního souboru *koridor_{zpr_linka}_mimo_FINAL.shp* pro každou linku zvlášť, zároveň je vytvořen textový soubor *output_koridor_mimo.txt*, do kterého se ukládá výpis jednotlivých segmentů koridoru s informací o jejich velikosti a poloze. Soubor *output_koridor_mimo.txt* sdružuje informace o všech zpracovaných linkách.

Vzhledem k množství zpracovávaných dat je relevantní otázkou i rychlosť výpočtů a optimalizace programu. Výše uvedený postup byl zásadně zrychlen využitím *pairwise* geoprocessingových funkcí, konkrétně byly

všechny funkce *buffer*, *dissolve* a *erase* nahrazeny jejich *pairwise* alternativami – ty zpracovávají data paralelně a jsou navrženy tak, aby maximalizovaly výkon a přesnost analýzy při zpracování velmi rozsáhlých a složitých souborů dat na jednom počítači (Esri 2024).

Ačkoliv tato změna vedla k výraznému zrychlení programu, nabízela se možnost vyhnout se tvorbě *bufferů* a následnému volání funkce *dissolve* úplně.

Alternativní program *prostorova_kontrola_fishnet.py* vytváří pravidelnou síť bodů překrývající oblast obsluhovanou MHD (za využití funkce *create fishnet* s následným převedením z polygonů na body, protože v knihovně ArcPy by šla vytvářet přímo síť bodů pouze postupem s využitím *InsertCursoru*). Velikost mřížky byla nastavena na 2,5x2,5 m. Tato hodnota byla po opakovaných pokusech shledána nejlepším kompromisem mezi přesností výsledku a rychlostí výpočtu.

Z těchto pravidelných bodů byly za pomoci funkce *select layer by location* vybrány body, které jsou maximálně 15 metrů vzdálené od nejbližšího záznamu zkoumané linky. Jde v podstatě o zpracování problému převedením na pravidelnou mřížku (byť je stále pracováno s vektorovou reprezentací dat, nikoliv s rastrem), čímž se postup efektivně vyhýbá výpočetně náročné kombinaci funkcí *buffer* a *dissolve*, jejíž geometrická přesnost není pro účely dalšího postupu nezbytná. S využitím funkce *aggregate points* byl vytvořen polygon pokrývající nejmenší možnou oblast tak, aby vybrané body byly zahrnuty v tomto polygonu. Funkce pracuje s parametrem určujícím maximální možnou vzdálenost bodu od jiného dalšího, což umožňuje efektivně vyřadit odlehlá pozorování. Tento parametr (*aggregation_distance*) byl, po testování na vzorku dat, nastaven na 75 metrů. Tímto postupem byly vytvořeny koridory podobné těm z předchozího postupu, včetně jejich úpravy dilatací a erozí. Následný postup, včetně způsobu ukládání výsledků, je totožný s předchozím postupem.

Navzdory předpokladům alternativní postup nevykazuje vyšší výpočetní rychlosť, naopak je výrazně pomalejší (přibližně 10krát). Důvodem je dlouhá doba vytváření pravidelné sítě bodů a následný převod z polygonů na body. Ani při testování postupu tvorby bodů přímo s využitím *InsertCursoru* nebylo dosaženo stejně rychlosti výpočtu jako při využití postupu s kombinací *bufferu* a funkce *dissolve*. Nadále je tedy pro polohovou kontrolu využito prvního uvedeného postupu. Tato zjištění platí při implementaci postupu v programovacím jazyce *Python*. Je možné, že při využití jiných prostředků pro provedení analýzy by byla výpočetní rychlosť postupů odlišná.

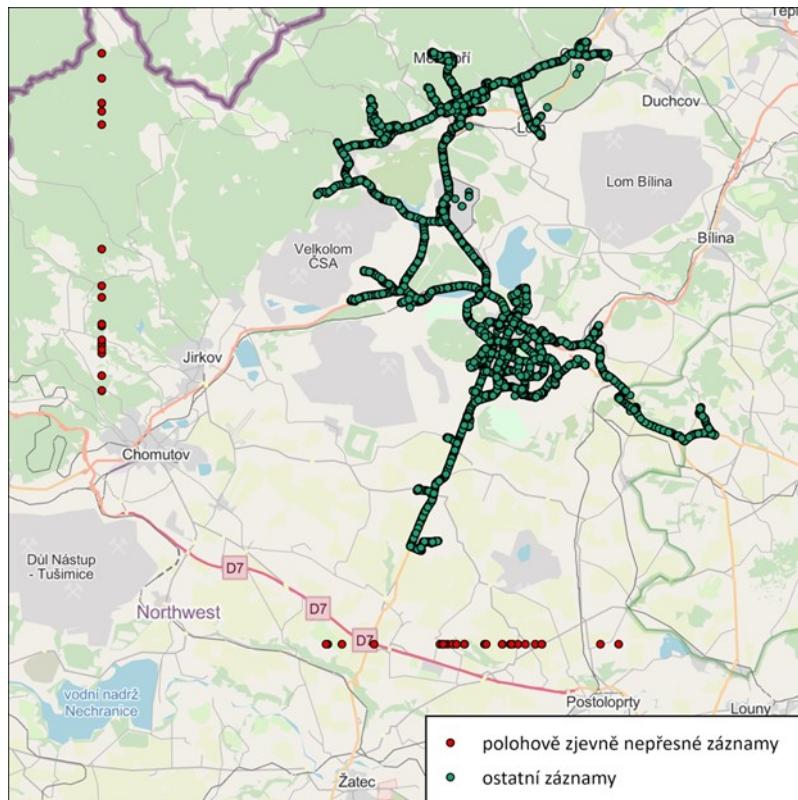
Skript využitý pro praktickou realizaci analýzy je dostupný jako příloha této práce (*prostorova_kontrola.py*), přílohou práce je i alternativní testovaný skript s pravidelnou sítí bodů (*prostorova_kontrola_fishnet.py*).

3.3.3 Výsledky

Odstanění polohově nepřesných záznamů

V zaznamenaných datech se objevilo 211 bodů zaznamenaných polohově zjevně nepřesně. Tyto body bylo možné identifikovat už při pohledu na vizualizaci naměřených dat. Jeden bod byl zaznamenán se souřadnicemi 0,0. V ostatních případech jde o body, které jsou pravidelně uspořádány ve dvou na sebe kolmých úsečkách (přibližně na rovnoběžce $50^{\circ}23'3''$ s. š. a na poledníku $13^{\circ}23'4''$ v. d.), umístění těchto bodů zachycuje obrázek 9. Takový záznam vznikl v situaci, kdy jedna ze souřadnic záznamu překročila povolené rozmezí záznamů. Přesažené souřadnici byla přidělena maximální povolená hodnota a druhá souřadnice zůstala zachována.

Dále bylo na základě vzdálenosti záznamu od nejbližší komunikace bylo po stanovení limitu 12 metrů identifikováno 5 298 nedostatečně přesných záznamů. Takové záznamy byly z dat odstraněny.



Obrázek 9: Polohově zjevně nepřesné záznamy.

Automatizace rekonstrukce reálné trasy linky, její porovnání s plánovanou trasou

Analýzou dat bylo identifikováno 59 případů, kdy po úseku plánované trasy linky nejezdila vozidla. Segmentů, kde koridor linky nesouhlasí s plánovaným vedením linky, bylo identifikováno 20. Reálný stav je výrazně nižší, viz kapitolu 3.3.4.

Mezi nejzajímavější zjištěné odchylky provozu od plánované trasy dle tabulky *linky* patří tato zjištění:

1. Uzavírka ulice U Bílého sloupu v Litvínově (plánovaná mimořádnost)

Metoda dokázala identifikovat uzavírku ulice U Bílého sloupu v Litvínově, kdy autobusy linky 13 využívaly objízdnou trasu ulicí Ruská.

2. Výluka tramvajové trati mezi zastávkami Litvínov, Citadela a Záluží, CHEMOPETROL (plánovaná mimořádnost)

Od 23. října 2023 do konce měsíce probíhala výluka tramvají mezi stanicemi Litvínov, Citadela a Záluží, CHEMOPETROL. Pro náhradní autobusovou dopravu byla zrušena zastávka Litvínov, U Dílen. Autobusy náhradní dopravy využívaly ulic Podkrušnohorská a S. K. Neumanna, z tohoto důvodu jsou v těchto ulicích zaznamenány polohy tramvají, navzdory absenci tramvajové trati. Zasažen byl provoz linek 1, 3 a 4.

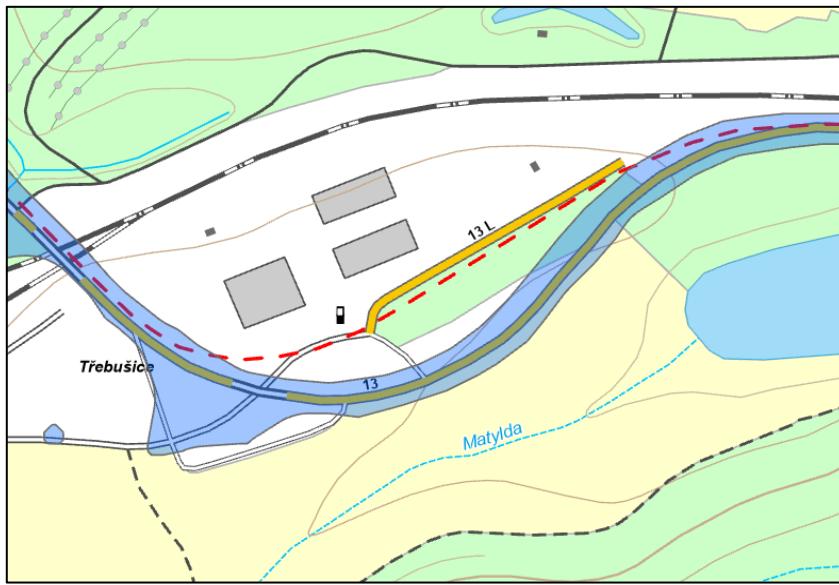
3. Zajíždění linky 9 do zastávky Zd. Štěpánka a k zastávce 1. náměstí

Pravidelně ve večerních hodinách mezi 20. a 21. hodinou je identifikováno zajíždění autobusů linky 9 mimo svou trasu do zastávky Zd. Štěpánka. Četnost je spíše sporadická, ale dostatečná pro identifikaci nesouladu trasy. Bez časové pravidelnosti bylo identifikováno i zajíždění linky do stanice 1. náměstí, zde je frekvence výskytu záznamů ještě nižší, nicméně pro identifikaci nesouhlasícího koridoru stále dostačuje.

Dopravní podnik po vznesení dotazu uvádí, že většina vozů po spojích linky 9 pokračuje jako linka 17 do ulice a zastávky Zdeňka Štěpánka, přejezdy na 1. náměstí jsou přejezdy na další, jiné linky. Pravděpodobně zde dochází opakovaně k chybě v definici přejezdu v dispečerském systému (Šefr 2024).

4. Přeložka silnice I/13 - nesoulad trasy linky 12 (chyba v datech linek)

V místní části Komořany proběhlo rozšíření a přeložka silnice I/13, címž došlo od 18. 8. 2020 (DPmML 2020) ke změně trasys linky 12 a tím vzniku nesouladu trasys linky 12 s jejími zaznamenanými polohami (obrázek 10). Jde o identifikaci chyby v datech trasování linek.



Obrázek 10: Nájezd na most v Komoranech, modré koridor záznamů linky, červenou přerušovanou linií trasa linky uložená v tabulce *linky*.

5. Linka 22 zaznamenaná i za konečnou zastávkou (mimořádnost bez vlivu na provoz linky v úseku s cestujícími)

Za konečnou zastávkou linky 22 *Souš, Matylda*, byl identifikován koridor, ve kterém probíhal provoz vozidel linky až k zastávce *Třebušice, DTS Vrbenský*. Záznamy byly pořízeny v termínu 9. – 25. 10. 2023. V této době probíhala oprava okružní křižovatky (Mostecké listy 2023), na které běžně docházelo k otáčení vozidel. Z důvodu opravy křižovatky se vozidla otáčela až u nájezdu na most přes železniční trať v Třebušicích.

Při příjezdu linky s výraznějším zpožděním mohlo být toto zpoždění z důvodu delší doby obratu vozidla na protisměrnou výchozí stanici přeneseno na navazující protisměrný spoj.

6. Pro linku 30 jsou uloženy záznamy ze zajížďky na zastávku *Dopravní podnik*

Mezi zastávkami *1. náměstí* a *Dopravní podnik* je identifikován koridor záznamů linky 30 mimo plánovanou trasu. Vzhledem k nízké frekvenci záznamů lze předpokládat špatně zaznamenaná data manipulačních jízd z/do Dopravního podniku.

7. Závlek linky 17 do zastávky Okružní, Shell (diskutabilní chyba v trase linek)

Byla identifikována zajížďka linky 17 přes zastávky Vodárna a 18. ZŠ do zastávky Okružní, Shell. Tato trasa sice je v jízdním řádu plánována (pro první dva ranní spoje linky 17), ale není zachycena v plánu linek, tedy ani v datasetu *linky*. Situaci zobrazuje obrázek 11.



Obrázek 11: Nesoulad linky 17, modré koridor souhlasící s trasou linky, červeně nesouhlasící koridor, zelené body reprezentují jednotlivé záznamy polohy.

Všechna ostatní místa nesouladů, tj. nevýznamné odchylky od trasy a neprojízděné úseky, jsou uloženy v souborech *useky_mimo_{zpr_linka}.shp* a *koridor_{zpr_linka}_mimo_FINAL.shp*, které jsou přílohou této práce.

3.3.4 Diskuse

Postup tvorby koridorů a následného porovnávání s geometrií linek je možné použít za předpokladu, že je k dispozici geometrie linek a záznamy bodů v dostatečné hustotě pro vytvoření koridorů linky. Teoreticky dostatečnou hustotou bodů je situace, při které největší mezera mezi dvěma body v pomyslné linii naměřených bodů není větší než hodnota max dle vzorce

$$max = 2 \cdot \sqrt{(buf_1 + buf_2)^2 - buf_2^2}$$

kde buf_1 je velikost bufferu, kterým jsou obalovány zaznamenané body a buf_2 je velikost bufferu, kterým je uzavírána (tzn. dilatován a erodován) vytvořený koridor.

Vzorec, který vychází z Pythagorovy věty o pravoúhlém trojúhelníku, reflekтуje, že vzdálenost okrajů koridoru po jeho dilataci musí být v nejužším místě rovna dvojnásobku velikosti erozního bufferu (ta se rovná velikosti dilatačního bufferu). Hodnota max je teoretickou hodnotou, při které bude vytvořen souvislý polygon. Pro další postup ale není žádoucí, aby se šířka koridoru v jeho nejužších místech blížila nule. Pro další reálné použití koridoru je vhodné operovat s jeho šířkou alespoň 20 metrů, v takovém případě lze předchozí vzorec upravit do podoby

$$max = 2 \cdot \sqrt{(buf_1 + buf_2)^2 - (buf_2 + 20)^2}$$

Při využití této podoby vzorce a dříve zvolených velikostí bufferů musí být body vzdálené nanejvýš 162,48 metru, aby byl vytvořený koridor alespoň 20 metrů široký. Teoreticky by ale pro vytvoření souvislého koridoru stačila vzdálenost 200 metrů (dle prvního uvedeného vzorce).

Hustota záznamů je závislá na časové frekvenci sběru záznamů, na četnosti spojů dané linky (či úseku linky) a na délce období, za které jsou data zpracována. S frekvencí sběru záznamů a četnostmi spujících linky souvisí také rychlosť pohybu vozidel. Při nejvyšší povolené rychlosti 50 km/h autobus ve městě ujede za minutu až 833 metry (reálně se hodnoty pohybují výrazně níže), v síti MHD Mostu a Litvínova se ale nacházejí i úseky mimo obec s vyšší povolenou rychlosťí. Čím rychleji se ve sledovaném úseku vozidla pohybují, tím vyšší musí být četnost spojů, nebo frekvence záznamů, aby byl počet záznamů dostatečný k vytvoření průjezdového koridoru pro identifikaci trasy linky. Nižší četnost spojů může být kompenzována vyšší časovou frekvencí záznamů, a naopak.

Na tomto místě je třeba diskutovat také pravidelnost ukládání záznamů dat, pokud jsou záznamy ukládány vždy ve stejnou minutu hodiny, tak jako je tomu ve zpracovávaných datech, body jsou zaznamenávány

ve shlucích – pokud spoje jedou dle jízdního rádu, vyskytuje se vozidla v danou minutu vždy na podobném místě. Shlukování bodů není zřetelné na frekventovaných linkách, ale na úsecích s nižší intenzitou pohybu spojů může být viditelné. Náznak shlukování lze pozorovat například na řídce projížděném úseku linky 10 mezi zastávkami *Nádraží* a *Velebudice, škola* – situaci zachycuje obrázek 12.



Obrázek 12: Shluky bodů (zelené) a vytvořené koridory (modré polygony) na řídce projížděném úseku linky 10.

Ve zkoumaných datech z Mostu a Litvínova lze, při frekvenci ukládání záznamů 18krát za hodinu, konstatovat minimální průjezd 4 spojů za pracovní den (v ideálním případě 2 každým směrem) pro spolehlivé vytvoření koridoru linky i v místech s nejrychlejším provozem (na silnici I/27 mezi oběma městy) při zpracování dat za 1 měsíc.

Uvedené předpoklady nebyly naplněny na všech úsecích všech linek. Využitá metoda tedy narazila i na své výše uvedené limity, kdy v případě velmi řídkého provozu nedokáže být průjezdový koridor identifikován souvisle, případně nedokáže být identifikován vůbec. Za situace, kdy je průběh linky zanesený v datech tabulky *linky*, lze úsek identifikovat díky seznamu nalezených úseků, které byly zdánlivě neprojety. Překryvem plánované trasy a vrstvy bufferů okolo naměřených bodů lze určit, zda trasou spoje skutečně projížděly. Je kontrolována pravidelnost rozložení bodů, tedy zda například neleží jen v jedné polovině zkoumaného úseku. I tento proces by bylo možné automatizovat, bylo by nutné určit potřebný podíl pokrytí sledovaného úseku naměřenými body a také vyhodnocovat pravidelnost pokrytí. Vzhledem k výjimečnosti výskytu takových úseků a komplikovanosti automatizace, která by pro relativně malý provoz nedávala smysl, bylo v této práci přistoupeno k jejich individuálnímu ručnímu posuzování, které bylo efektivnější.

V praxi nejčastěji docházelo k identifikaci neprojížděných segmentů linky v místech drobné mezery mezi dvěma průjezdovými koridory v průběhu linky, i přes nastavený limit 150 metrů délky úseku došlo k identifikaci mnoha případů pouhé nespojitosti koridoru na trase linky, přičemž úsek ale zřejmě nebyl neprojížděný. Takové případy byly při interpretaci výsledků vynechány.

Stejně tak ve výsledcích zůstalo několik záznamů koridorů, které neodpovídaly charakteru linky jedoucí mimo plánovanou linku z tabulky *linky* - jednalo se typicky o místa na začátku a konci linek, kde docházelo k manipulačním přesunům vozidel například po prostoru nádraží, protože prosté štěpiny okrajů polygonů byly eliminovány nastavenou hranicí minimální velikosti polygonu $10\ 000\ m^2$. Geometrie linky v takových případech ale zasahovala pouze k zastávce, a tak tento manipulační prostor byl vyhodnocen jako koridor mimo trasu linky. Stejně jako v předchozím případě byly takové případy při interpretaci výsledků vynechány.

Za příklad neúspěšného identifikování nesouladu mezi projetou trasou linky a trasou linky z datasetu *linky* může být považován úsek linky 28 mezi zastávkami *H. Jiřetín, rozcestí a Janov, konečná*. Autobus na tento úsek linky zajíždí pouze jednou denně (jen v pracovní dny), spoj číslo 16 s odjezdem v 15.48 ze zastávky *H. Jiřetín, rozcestí* tedy projel úsek celkem 22krát. Ani tento počet průjezdů nebyl dostatečný pro identifikaci průjezdového koridoru. Důležitým faktorem bylo i to, že spoj jezdí pouze jednosměrně, což vede k vyšší náchylnosti ke shlukování zaznamenaných bodů. Úsek linky v datasetu linkového vedení nefiguruje, zvolená metoda tudíž tento nesoulad neodhalila.

Specifickým případem, kdy chyba v datech nebyla nalezena, jsou prodloužené spoje linky 12 mezi Komořany a Litvínovem jedoucí přes Horní Jiřetín či okolo Chemparku Záluží. V dodaných datech jsou

takové spoje označeny jako linka 122, nelze tedy jejich spojitost s linkami 12 (respektive 13 a 14) přímo z dat zjistit.

Ve výsledcích uvedený případ linky 17 vede k otázce, jaký podíl spojů projíždějících úsekem trasy linky je nutný k tomu, aby byl daný segment označován za standardní trasu linky. Linka 17 odbočuje na zastávku *Okružní, SHELL* dvakrát denně a nestandardní trasa není v tabulce linky zaznačena. Podobně je tomu i u nestandardních tras linky 12, která projíždí dvakrát denně v každém směru úseky mimo její nejčastější trasu (pokračuje po trasách linek 13 a 14). Ani tyto úseky nejsou v tabulce *linky* zaznačeny. Naopak prodloužení linky 10 z Nádraží do zastávky Velebudice, škola, které je v pracovní dny obsluhováno v každém směru jedenkrát, je součástí geometrie v tabulce *linky*. Z těchto zjištění je zřejmé, že jasná podmínka pro zaznamenání geometrie v tabulce linky neexistuje.

Zmíněné úseky linek 12 a 17 (neplatí pro linku 10) nejsou zaneseny ani v oficiálních schématech a mapách vydávaných dopravním podnikem, stejně jako chybí v interaktivní mapové aplikaci na webové adrese <https://mapy.mesto-most.cz/app/mhd/>, tedy i v tabulce *linky*. Taková situace je odůvodnitelná lepší přehledností schémat pro cestující, informace o zajízdění některých spojů do alternativních větví linky se mohou dozvědět ze zastávkového jízdního řádu či z online vyhledávačů spojení. Takový přístup je běžný a v souladu se zvyklostmi z jiných měst. Stejně se ke značení alternativních větví spojů staví Dopravní podnik hlavního města Prahy, v jehož systému mnoho tramvají obsluhuje zastávky při jízdě z/do tramvajové vozovny (DPP 2023). Dalším příkladem může být měřítkově podobnější systém MHD v České Lípě, který také ve svém oficiálním schématu nezachycuje alternativní větev linky 225 (Odbor dopravy města Česká Lípa 2023). Pro analýzy sítě MHD by nicméně bylo vhodnější pracovat s tabulkou *linky*, která by tyto situace zachycovala.

Při určení hranice počtu spojů nutných pro zanesení větve linky do schémat a map lze operovat s prostým počtem průjezdů, ale vhodnější je sledovat podíl takových spojů na celkovém počtu spojů dané linky.

V závěru této části práce je podstatné zmínit, že na základě zjištěných vlastností dat z nich byly odstraněny příliš nepřesná pozorování či jiné chyby a upraveny chybné hodnoty atributů. Takto upravený dataset je součástí geodatabáze *MostMHD_10_23.gdb* pod názvem *zaznamy_poloxy_ocisteno*, tato geodatabáze je přílohou této práce. Přehled všech datasetů odvozených z dat *zaznamy_poloxy_orig* je uvedený v kapitole 3.1.2.

3.4 Analýza rozložení zpoždění dle trasy linky a denní doby

Rozložení zpoždění, jako jedné z nejpodstatnějších metrik systému MHD, lze sledovat v prostoru a v čase. Míra zpoždění spojů výrazně ovlivňuje spokojenost cestujících s MHD, s delším časem čekání na spoj klesá spokojenost cestujícího (Lunke 2020). Nespokojenost cestujících s kvalitou poskytovaných služeb může vést až k jejich odlivu k jinému druhu dopravy, umožňuje-li jim to jejich ekonomická situace. S menším počtem cestujících nemůže být hromadná doprava ekonomicky udržitelně provozována se stejnou frekvencí spojů, čímž může docházet k odlivu dalších cestujících, kterým nižší frekvence spojů nedostačuje. Tím se celý dopravní systém může ocitnout v *začarovaném kruhu hromadné dopravy*, který popisuje ve své práci například Nutley (1996). Pro každého provozovatele hromadné dopravy by tedy měla být eliminace zpoždění jednou z priorit.

Pokud je nalezen opakovaný výskyt zpoždění v určitém místě a čase, lze tuto pravidelnost reflektovat při tvorbě jízdního řádu.

V následující části práce je popsáno několik analytických pohledů na zpoždění v síti MHD Mostu a Litvínova. Nejdříve je pohled zaměřen na celou síť MHD, je zde vizualizováno a interpretováno zpoždění diferencované dle prostoru, času a také v závislosti na konkrétní lince MHD. Druhá část analyzuje časové řady průměrného zpoždění v měřítcích dne, týdne, měsíců a let.

3.4.1 Cíle

3.4.1.1 Prostorová a časoprostorová analýza zpoždění

Cílem této analýzy je vytvořit souhrnnou mapu zobrazující průměrné zpoždění v celé síti MHD a vytvořit mapy zachycující průměrné zpoždění v celé síti MHD pro časové úseky během dne. Výsledkem této části analýzy by měly být mapy zachycující rozdílnými barvami segmentů linie hodnoty průměrného zpoždění v takovém úseku. Jedna z map bude souhrnná, shrnující všechna dostupná data., ostatní mapy budou zachycovat průměrné zpoždění v datech omezených daným časovým rámcem.

V druhé části analýzy bude pohled zaměřen na jednotlivé linky MHD, cílem bude zjistit jejich průměrné zpoždění a automatizovat pro ně tvorbu map zpoždění. Cílem je vytvořit program, ve kterém bude možné zvolit číslo linky, případně i časové období dne, pro které bude automaticky vygenerována mapa zpoždění.

3.4.1.2 Časová analýza zpoždění

Cílem je analyzovat vývoj zpoždění během hodin v rámci dne, dnů v rámci týdne, měsíců v průběhu roku a let. Cílem je také definovat, kdy v Mostě a Litvínově nastávají dopravní špičky a porovnat výsledek s jinými městy v Česku.

3.4.2 Praktická realizace

Při analýzách zpoždění byly zanedbány bodové záznamy s naměřenými rychlostmi 121, 122 a 123 km/h. Tyto rychlosti symbolizují staničení vozidla v zastávce, čekání vozidla před jízdou a jízdu vozidla na první zastávku. Jízda vozidla na první zastávku není z pohledu zpoždění podstatná. Čekání vozidla před jízdou zkresluje (výrazně snižuje) průměrné zpoždění v prvním úseku linky, jelikož je v datech zaznamenáno několik bodů nulového a záporného zpoždění. Podobně je tomu i u čekání vozidla v zastávce – čeká-li vozidlo v zastávce delší časový úsek, generuje více zaznamenaných bodů, čímž zkresluje průměrnou hodnotu zpoždění v úseku linky kolem zastávky.

Z dat byly odstraněny záznamy se zpožděním vyšším než 60 minut a násokem proti jízdnímu řádu vyšším než 20 minut (zpoždění < -20). Jízdní doba žádné linky v síti MHD není vyšší než 60 minut (výjimkou je jeden spoj linky 30 v letní sezóně), navíc záznamy s takovými hodnotami jsou zaznamenány především na konečných zastávkách, pravděpodobně z důvodu nepřepnutí systému do režimu „po výkonu spoje“ (tzn. zdánlivé neprojetí konečné zastávky). Stejně tak i data o násoku vozidel (tzn. se záporným zpožděním) se vyskytují v okolí konečných/počátečních zastávek. Na základě tohoto klíče bylo z dat odstraněno 353 záznamů, které nepatřičně zkreslovaly průměrné hodnoty zpoždění.

Takto vyfiltrovaná data tabulky *zaznamy_polohy_ocisteno* jsou označeny jako *zaznamy_polohy*, jak bylo popsáno již v kapitole 3.1.

3.4.2.1 Prostorová a časoprostorová analýza zpoždění

Praktickou realizaci časoprostorové analýzy zpoždění lze rozdělit na dvě části. V první z nich jsou filtrována bodová data *zaznamy_polohy*, v druhé části jsou vybraná data vizualizována v podobě map. Data jsou filtrována dle místa, času a linky. Místem jsou rozuměny segmenty trasy linky, pro které je vizualizováno zpoždění, tzn. že linie linky je rozdělena na stejně dlouhé úseky, které jsou označován jako segmenty.

Filtrace dat

Pokud data nejsou filtrována dle čísla linky, vznikají mapy, které jsou označovány jako celosítové. V takových mapách se do průměrného zpoždění na úsecích společných pro více linek započítávají všechny projíždějící linky. Při filtrace dat pro jednu linku jsou vygenerované mapy označovány jako linkové.

Samotná filtrace je prakticky realizována funkcí *filtrace_linky*, která vybírá z bodů *zaznamy_polohy* body pro vybranou linku a funkcí *filtrace_cas*, která z bodů vybírá body dle zadaného hodinového rozmezí a dle zvolených dnů v týdnu.

Volena je také délka segmentů, na které budou linie rozdeleny a pro které bude vizualizováno zpoždění. Tato délka je v programu i v pokračování tohoto textu označována jako *delka_useku*.

Vizualizace dat

Struktura dodané geometrie linek v tabulce *linky_orig* je taková, že v úsecích, kde dochází k souběžnému vedení více linek, má každé číslo linky v geometrii svou vlastní reprezentaci, což vede k tomu, že se linie linek překrývají. Pro vytvoření map souhrnného zpoždění v celé síti MHD bylo nezbytné geometrii linek *linky_orig* nejprve sloučit do jedné polylinie (v prostředí ArcGIS Pro pomocí funkce *dissolve*), která byla poté rozdělena na nekrížící se linie (*feature to line*). Takto vytvořené linie byly generalizovány (především byly na některých místech sloučeny linie vedoucí paralelně velmi blízko sebe) pro lepší vizualizaci v měřítku 1:58 000, ve kterém jsou tvořeny celosítové mapy. Tabulka takových linií je dále nazývána jako *linky_nekrizici_se* (uloženo v *MostMHD_10_23.gdb*).

Geometrie linií *linky_nekrizici_se* či *linky* (pro linkové mapy) jsou poté rozdeleny na úseky dlouhé *delka_useku* metrů (ideální volba této hodnoty je podrobně popisována v diskusi). Atribut s unikátním identifikátorem takového segmentu je připojen k vyfiltrovaným bodům z tabulky *zaznamy_polohy* na základě toho, který segment je ke každému bodu nejbližší (*Spatial Join*). Současně je vytvořen slovník, který ke každému segmentu ukládá seznam hodnot zpoždění naměřených na bodech z tabulky *zaznamy_polohy*, pro něž byl daný segment nejbližším. Průměr hodnot zpoždění připadajících danému segmentu je následně zapsán do vytvořeného atributu *ZPOZ_PRUM* v tabulce segmentů.

V prostředí ArcGIS Pro je vrstvě segmentů nastavena symbologie vykreslující segment v různých barvách v závislosti na průměrném zpoždění. Intervaly zpoždění byly voleny s ohledem na tvorbu všech map zpoždění (celosítových i linkových) tak, aby nebyly měněny a mapy tak mohly být porovnány mezi sebou. Barvy symbolizující velikost zpoždění vycházejí ze zvyklostí používaných v informačních systémech hromadné dopravy (např. IDOS, IDOL, PID, České Dráhy) a přecházejí od zelené pro minimální hodnoty zpoždění, přes oranžovou a červenou, až do fialové pro maximální hodnoty zpoždění. Součástí vytvořených

map jsou také zastávky, ty jsou symbolizovány šedou kružnicí tak, aby byl střed průhledný a bylo možné určit velikost zpoždění i v místě zastávky. Významné zastávky jsou v mapách popsány. Podkladovou mapou byla zvolena *Light Gray Base* od společnosti Esri. Jde o nevýraznou podkladovou mapu, která dobře nechává vyniknout barevnou symbologii linií.

Z důvodu lepší vizualizace je v této analýze pracováno s datasetem *zastavky*, který sdružuje odjezdové sloupky stejného jména do jednoho bodu.

Při tvorbě linkových map je možné vypočítat a vizualizovat zpoždění pro (typicky) oba směry linek (pokud linka není (polo)okružní), což je v souhrnných mapách zanedbáno. Postup je tedy iterován pro každou konečnou zastávku linky zvlášť. Při přiřazování bodů k nejbližšímu segmentu jsou vybírány pouze body s konečnou zastávkou v aktuální iteraci. To vede k tomu, že jsou vytvořeny mapy pro každou konečnou zastávku, která se pro vybranou linku objevuje alespoň jednou v atributu *zaznamy_polohy.CILOVA_ZASTAVKA_NAME*.

Při tvorbě linkové mapy zpoždění je potřeba vybrat do mapy pouze ty zastávky, které daná linka obsluhuje. Z tabulky *zastavky* jsou vybrány zastávky, které v atributu *LINKY* obsahují záznam o vybrané lince. Jelikož atribut obsahuje výčet linek jako text, ve kterém jsou čísla linek oddelená čárkou, je nutné kalkulovat při výběru s tím, že na hledané číslo linky může v textovém řetězci přímo navazovat čárka, může být mezi dvěma čárkami, může být na konci výčtu a mít tak čárku pouze před sebou, ale může být i samo, bez čárek, pokud je zastávka obsluhována pouze jednou linkou. Na základě těchto předpokladů je sestaven SQL dotaz do funkce *Select by Attribute*, a to následovně (proměnná *zpr_linka* označuje číslo zpracovávané linky):

```
query_expression= f"LINKY LIKE '{zpr_linka},%' OR LINKY LIKE '%, {zpr_linka},%' OR LINKY LIKE '%, {zpr_linka}' OR LINKY LIKE '{zpr_linka}'"
```

Poté, co jsou vytvořeny segmenty linky s přiřazeným průměrným zpožděním z naměřených bodů v daném směru a zastávky obsluhované danou linkou, je připraveno vše, co bude vizualizováno v mapě zpoždění.

Za vstupní data je možné považovat také 3 soubory formátu *lyrx*, které nesou informace o symbologii vrstev. Na základě těchto souborů může být v nich přednastavená symbologie aplikována na nově vytvořené vrstvy. Vrstvy nesou níže uvedené názvy a jsou přílohou této práce:

- *rozsekana_linka_vzor.lyrx* - vrstva se symbologií vrstvy segmentů linky
- *vybrane_zastavky_vzor.lyrx* - vrstva se symbologií vrstvy zastávek

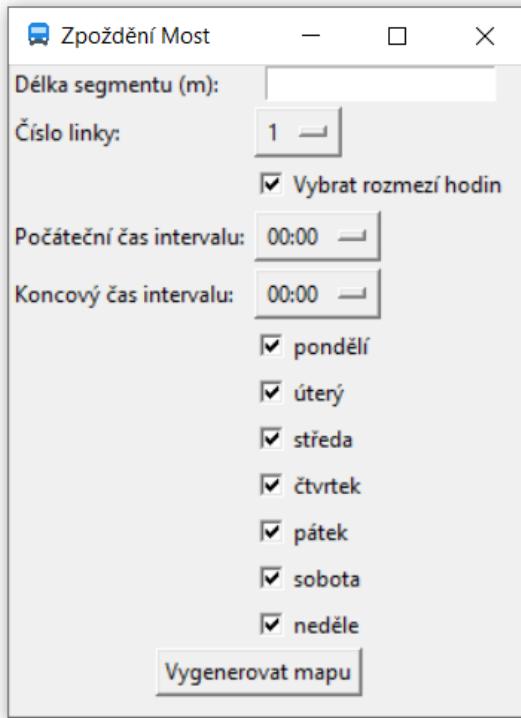
- *extent_layer_vzor.lyrx* - vrstva symbologie vrstvy sloužící pro nastavení rozsahu generované mapy, tvořena především kvůli zobrazení v legendě (podrobně popsáno v příloze *tvorba_layoutu.docx*)

Samotný proces automatické vizualizace mapy a tvorby *layoutu* v prostředí knihovny *ArcPy* je popsán v příloze *tvorba_layoutu.docx*.

Pro účely této práce byla vygenerována souhrnná celosítová mapa průměru celodenního zpoždění, vygenerováno bylo též 10 celosítových map pokrývajících časy od 4.00 do 0.00 s dvouhodinovým intervalom. Tyto mapy jsou přílohou práce pod názvy *mapa_cela_sit_{pocatecni_hodina}_{koncova_hodina}.png*, kde *{pocatecni_hodina}* a *{koncova_hodina}* reprezentují počáteční a koncovou hodinu sledovaného intervalu. Prakticky byl iterován předchozí postup pro automaticky se navýšující dvojici proměnných s počátečními hodnotami 4 a 6, které na konci každé iterace byly zvýšeny o 2. Tyto proměnné reprezentují počáteční a koncovou hodinu každého časového intervalu. Skript pro tvorbu celosítových map je přiložen k práci pod názvem *celositove_mapy.py*.

Také byly vygenerovány mapy pro všechny existující linky s délkou segmentů 500 metrů, ty jsou dostupné jako příloha této práce pod názvy *layout_{cislo_linky}_smer_{konecna_zastavka}.pdf*.

Vstupní parametry do programu byly při generování zmíněných map zadávány formou iteračního cyklu. Přílohou této práce je ale i program *Zpoždění Most*, který nabízí uživateli volbu proměnných v dialogovém okně (obrázek 13) a následně vygeneruje požadované mapy. Celý program je dodán v souboru *zpozdeni_linky_most_PROGRAM*, ve kterém jsou připraveny všechny potřebné soubory ke správnému běhu programu (tj. geodatabáze s daty, připravený projekt ArcGIS Pro, *.lyrx* vrstvy a grafické prvky programu). Samotný skript v jazyce python je v této složce (*zpozdeni_linky_most_PROGRAM*) uložen pod názvem *zpozdeni_linky_mapa.py*.



Obrázek 13: Dialogové okno aplikace Zpoždění Most.

Po dokončení výpočtu a vygenerování map je uživatel o této skutečnosti informován vyskakovacím oknem, výsledné mapy jsou poté k dispozici v adresáři *vysledky*.

3.4.2.2 Časová analýza zpoždění

Pro analýzu vývoje zpoždění v jednotlivých měsících roku byla využita data za rok 2023. Při analýze vývoje zpoždění v průběhu let byla využita datová sada *zaznamy_poloxy_od_2020*, ve které jsou uloženy data archivovaná Odborem informačního systému města Most od 22. 6. 2020 do 31. 12. 2023. Data byla podobně jako data za měsíc říjen 2023 očištěna o příliš nepřesná pozorování a o záznamy se zpožděním přes 60 minut a méně než - 20 minut.

S využitím knihoven *statistics* a *matplotlib* jazyku python byly vizualizovány statistiky rozložení zpoždění v čase.

Data byla filtrována jednoduchým SQL dotazem ve funkci *Select Layer by Attribute*, pomocí SQL funkce *extract* bylo přistupováno k potřebným částem data a času z atributu *TIME_DATE* v tabulce *zaznamy_poloxy*. Přístup k informaci o konkrétním dni v týdnu bylo nutné získat jiným způsobem, a sice přes *SearchCursor*, aby na atribut *TIME_DATE* mohla být volána metoda *weekday()*. SQL funkce *DOW*,

vražející číselné označení dne v týdnu, není implementována v SQL dialekту používaném v softwaru ArcGIS Pro (Esri Community 2017).

Výhoda zpracování statistik tímto způsobem spočívá v jejich snadné aktualizaci pro nová data či jiná časová období, stačí změnit vstupní soubor dat. Vybrané skripty zpracovávající statistické výstupy jsou dostupné jako příloha této práce pod názvy *statistiky_cas_{}.py*.

3.4.3 Výsledky

3.4.3.1 Prostorová a časoprostorová analýza zpoždění

V celé síti MHD je průměrné zpoždění v datech naměřených za celý měsíc říjen 2023 **22,38** sekundy. Pro pracovní dny jde o hodnotu **23,58** sekundy. Předpoklad, že zpoždění se bude koncentrovat v centrech obou sledovaných měst, se nepotvrdil. Naopak, zpoždění je rozloženo velmi rovnoměrně. Úseků, ve kterých by průměr zpoždění přesahoval 40 sekund, je minimum. Podrobné rozložení celkového zpoždění v síti MHD je znázorněno na mapě v příloze *mapa_cela_sit.png*.

Velikost zpoždění se během dne mění (podrobněji popsáno v podkapitole 3.4.3.2), ale jeho rozložení v prostoru zůstává relativně vyrovnané. Vyšší naměřená zpoždění lze pozorovat v obou městech, nejvíce v centru Mostu na třídě Budovatelů a na Podkrušnohorské ulici v Litvínově. Nejvyšší zpoždění lze sledovat na mapě pro 14.–16. hodinu. Mapy s rozložením zpoždění v dvouhodinových intervalech během pracovního dne jsou přílohou této práce.

Průměrné zpoždění na jednotlivých linkách zobrazuje tabulka 4 níže. V celkovém průměru je nejvíce zpožděnou linkou je autobusová linka č. 15, naopak nejméně tramvajová linka č. 1. V tabulce jsou kromě celkového průměrného zpoždění zanesena i zpoždění ve třech obdobích dne – dopoledne (6–12), odpoledne (12–17) a večer (17–21). Den byl rozdelen na tyto intervaly, protože při dvouhodinových intervalech (jako v mapě zpoždění v celé síti) nebyl za jeden měsíc naměřen dostatečný počet záznamů, aby data ve všech hodinách mohla být považována za reprezentativní. Při rozdelení dne do intervalů bylo přihlíženo k průměrnému zpoždění v celé síti v jednotlivých hodinách. Časové intervaly sdružují hodiny s podobnými průměrnými hodnotami zpoždění. I v této podobě je u méně frekventovaných linek množství záznamů nízké, především v těch časech, kdy linka jezdí s nízkou frekvencí. Z tabulky je také patrné, že mnoho linek v určité denní době vůbec nejezdí. V takovém případě je v tabulce zanesena hodnota “bez dat”.

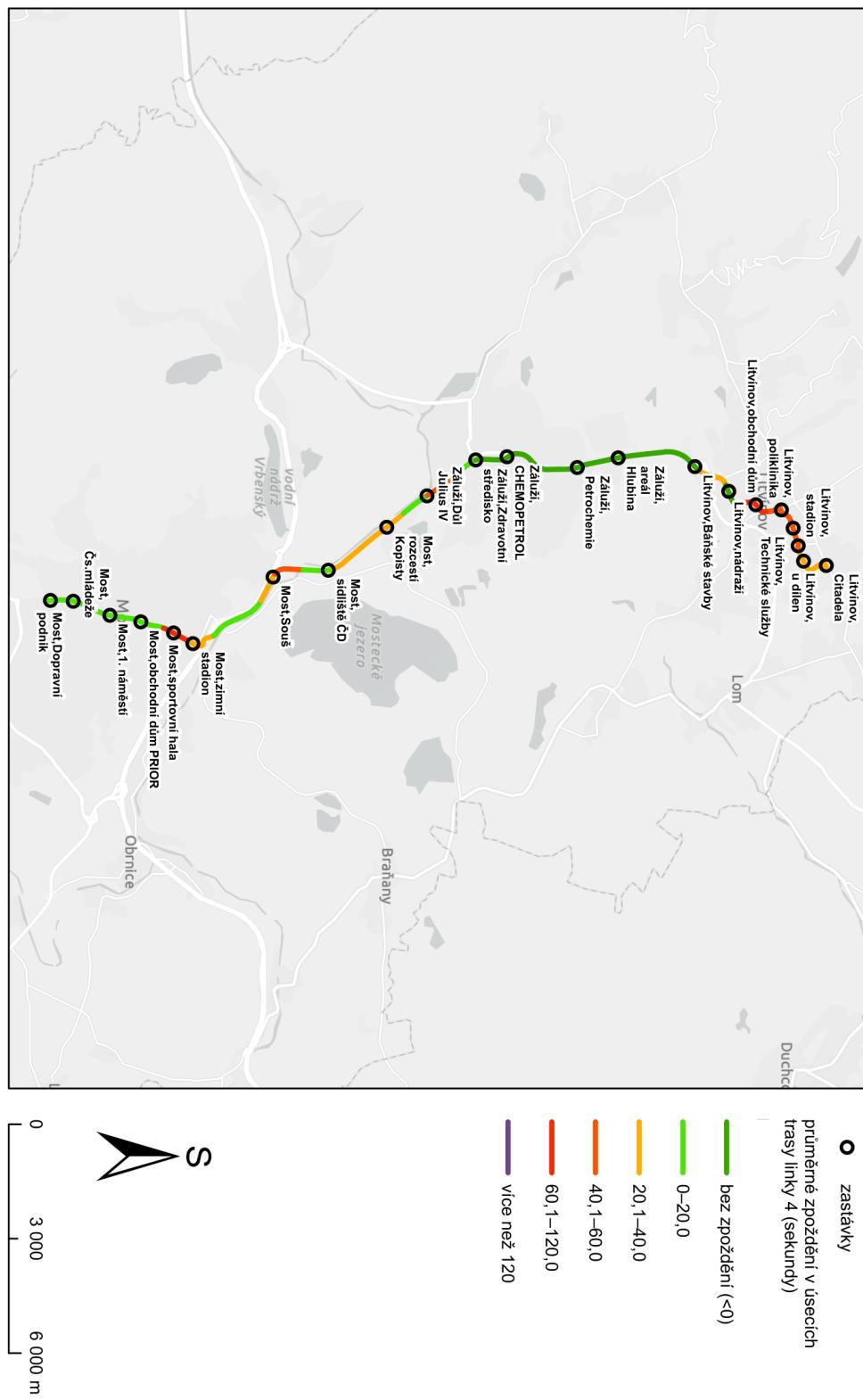
Tabulka 4: Průměrné zpoždění na jednotlivých linkách v průběhu dne

číslo linky	průměrné zpoždění (v sekundách)			
	celkově	6–12	12–17	17–21
1	-110.78	-76.68	-121.52	bez dat
2	28.76	41.43	29.40	18.82
3	2.45	24.03	bez dat	0.00
4	-1.02	11.38	1.32	-4.42
5	11.12	8.74	21.20	6.70
8	34.64	-9.23	-8.57	37.83
9	43.98	13.97	114.01	9.35
10	3.78	17.88	-15.28	19.48
12	24.89	33.22	46.44	8.54
13	44.06	45.65	67.53	29.76
14	27.57	18.42	44.51	31.82
15	50.94	41.02	65.95	bez dat
16	38.40	36.30	53.17	9.35
17	16.39	12.87	33.95	5.66
18	17.25	bez dat	17.25	bez dat
20	13.11	15.21	28.77	-3.95
21	8.54	2.47	0.00	0.00
22	-96.97	-294.19	-23.52	4.10
23	43.40	44.72	66.23	26.15
25	34.56	50.01	25.65	3.73
27	5.29	6.02	11.05	-1.86
28	-21.54	2.57	-67.99	1.18
30	21.04	18.37	35.28	6.30
31	-8.83	3.42	-6.18	-5.01
40	1.12	bez dat	bez dat	bez dat
50	18.06	18.06	bez dat	bez dat
51	-7.11	-7.11	bez dat	bez dat
53	30.52	30.52	bez dat	bez dat
60	39.40	35.11	49.76	bez dat

Dále bylo vygenerováno 78 jednotlivých map zpoždění pro 31 linek mostecko-litvínovské sítě MHD (linky mají více než 2 konečné zastávky, a tak vzniklo nadbytečné množství map) v příloze této práce bylo ponechány i mapy s nedostatečným množstvím záznamů polohy pro méně časté konečné zastávky. Při vyhodnocování zpoždění z takových map je nutné volit verzi mapy s nejčastější konečnou zastávkou, pro kterou jsou vypočtené hodnoty zpoždění nejspolehlivější.

Obrázek 14 je ukázkou automaticky vygenerované mapy zpoždění pro konkrétní směr jedné linky MHD. Na vybrané mapě tramvajové linky 4 ve směru *Litvínov, Citadela* lze pozorovat výskyt zpoždění především na konci linky v centru Litvínova, ale také v Mostě za obchodním domem Prior.

PRŮMĚRNÉ ZPOŽDĚNÍ na lince 4 ve směru Litvínov,Citadela



Obrázek 14: Automaticky vygenerovaná mapa průměrného zpoždění linky 4 ve směru *Litvínov, Citadela*

Při analýze 78 vytvořených map lze rozdělit linky a jejich směry dle typologie lokalizace zpoždění. Byly definovány vzorce prostorového rozložení zpoždění dle opakujících se rysů lokalizace zpoždění. Těmito kategoriemi jsou:

- nárůst zpoždění při průjezdu centrem města,
- zpoždění rostoucí směrem ke konečné zastávce,
- nejvyšší zpoždění na začátku trasy, postupně klesající,
- nízké zpoždění v celé trase linky,
- vysoké zpoždění v celé trase linky,
- nepravidelné zpoždění neodpovídající žádné z definovaných kategorií.

Rozdělení linek do kategorií dle vzorce rozložení zpoždění je zaznamenáno v tabulce 5. Nejvyšší zastoupení má kategorie linek s nízkým zpožděním v celé délce trasy. Vysoké zastoupení, 8 směrů linek, má i případ, kdy se zpoždění kumuluje a roste s blížící se konečnou zastávkou. Ve dvou případech, u linek 13 a 22, lze pozorovat situaci, kdy v jednom směru je zpoždění nabíráno směrem k poslední zastávce, ale v opačném směru je zpoždění naopak nejvyšší na začátku linky a poté opadá. Tato situace může souviset s tím, že vozidlo přijede zpožděné na konečnou zastávku a rezerva před odjezdem do opačného směru není dostatečná – spoj poté vyjíždí se zpožděním přeneseným z předchozího spoje.

U linky 13 na nejčastější konečné zastávce (*Janov, konečná*) je čas plánovaného příjezdu většiny spojů skutečně shodný s odjezdovým časem spoje z této zastávky do opačného směru. U linky 22 jsou na dotčené konečné nejčastěji 13minutové rozdíly mezi časem příjezdu spoje a odjezdem spoje v opačném směru. V analyzovaném období ale probíhala oprava okružní křižovatky, na které se spoje otáčely. Otáčení autobusů probíhalo na vzdálenější křižovatce a doba přesunu na protisměrnou zastávku tak trvala výrazně déle. Navíc zde, dle terénního pozorování, řidiči autobusu vykonávají zákonné přestávku v práci, jejíž zkrácená délka je 10 minut (Peřina 2019). Při odečtení tohoto času od 13minutové rezervy v jízdním rádu, dochází teoreticky k přenosu zpoždění už při zpoždění 3 minut na příjezdu, nehledě na prodlouženou dobu přejezdu do protisměrné zastávky kvůli rekonstrukci okružní křižovatky. Reálný oběh vozidel ale není autorovi této práce znám, a tak tato hypotéza nemůže být s jistotou potvrzena.

U linek 1, 4 a 17 bylo klasifikováno zpoždění při průjezdu centrem města. Tramvajové linky 1 a 4 se ale pohybují na rozmezí s kategorií narůstajícího zpoždění směrem ke konečné zastávce. Největší zpoždění je u nich totiž pozorováno vždy v centru toho města, do kterého tramvaj jede. Při vedení z Mostu do Litvínova se zpoždění objevuje v Litvínově, při opačném směru naopak. Celkově lze konstatovat, že zpoždění zcela jednoznačně související s dopravní kongescí v centrech žádného z měst není z dat patrné.

Jedinou linkou, u které lze sledovat velmi mírný nárůst zpoždění na hlavní třídě Budovatelů v Mostě, je polookružní linka č. 17. Obecně se ale v Mostě zácpny objevují spíše výjimečně, lokalitou s jejich nejčastějším výskytem je okružní křižovatka ulic Višňová, Lipová, Velebudická a Okružní. Pravděpodobně větší vliv na nárůst zpoždění má nástup do autobusů, je cestujícím umožněn v celé síti MHD pouze předními dveřmi, přičemž probíhá odbavení u řidiče autobusu. To prodlužuje pobyt autobusu v zastávce přímo úměrně počtu nastupujících pasažérů. Nejvíce cestujících nastupuje na zastávkách v centrech obou měst.

Tabulka 5: Rozdelení linek dle vzorce rozložení zpoždění.

kategorie vzorce rozložení zpoždění	linky	počet směrů*
nárůst zpoždění při průjezdu centrem města	1 směr Most, Velebudická 4 17	4
zpoždění rostoucí směrem ke konečné zastávce	9 13 směr Janov 18 22 směr Souš 25 směr Vtelno (alt. Obrnice, odb. Vtelno 0,5) 30 směr 1. náměstí 60	8
nejvyšší zpoždění na začátku trasy, postupně klesající	13 směr Litvínov, Koldům a dále 22 směr Most, nádraží	2
nízké zpoždění v celé délce linky	1 směr Litvínov, Citadela 2 směr Most, Velebudická 8 směr Litvínov, nádraží 10 20 směr Most, nádraží 27 28 30 směr Most, nádraží 31 51	14
vysoké zpoždění v celé délce linky	8 směr Litvínov, průmyslová zóna 14 směr Horní Jiřetín, pekařství 15 16 v prodloužené verzi k jezeru Most 23	6

nepravidelné zpoždění neodpovídající žádné z definovaných kategorií	2 směr Most, nádraží 3 12 14 směr Litvínov, nádraží 16 20 směr Muzeum 25 směr Halasova 40 50 53	12
---	--	----

*okružní i polookružní linky považovány za jednosměrné, ostatní
linky 2 směry – i pokud mají alternativní konečné zastávky

3.4.3.2 Časová analýza zpoždění

Průměrné zpoždění ve vteřinách pro každý den v týdnu zobrazuje tabulka 6. Je z ní patrné, že dnem s nejvyšším průměrným zpožděním (30,68 sekundy) je pondělí, které především v ranní a odpolední špičce výrazněji odskakuje od ostatních dnů. Naopak dnem s nejnižším průměrným zpožděním (11,92 sekundy) je nepřekvapivě neděle.

Tabulka 6: Průměrné zpoždění v jednotlivých dnech v týdnu.

den v týdnu	průměrné zpoždění (s)
pondělí	30,68
úterý	23,14
středa	25,38
čtvrtok	17,57
pátek	21,20
sobota	20,11
neděle	11,92

Podrobný vývoj zpoždění během jednotlivých dnů v týdnu je znázorněn v grafice nazvané jako grafy 2. Na osách y jsou vyneseny hodnoty průměrného zpoždění měřené po jedné hodině – vždy od celé hodiny do celé hodiny. Číslo na ose x označuje počátek měřené hodiny, ke které se data vztahují. Tedy například hodnota zpoždění vynesená k číslu 8 označuje naměřené průměrné zpoždění v čase 8.00–9.00 hodin. Z průběhu velikosti zpoždění je zřejmé, že v pracovní dny dochází v ranní špičce k nejvyššímu zpoždění mezi 6.00–9.00 hodinou, následuje zklidnění s mírným výkyvem mezi 10.00–11.00 hodinou. Hodnoty

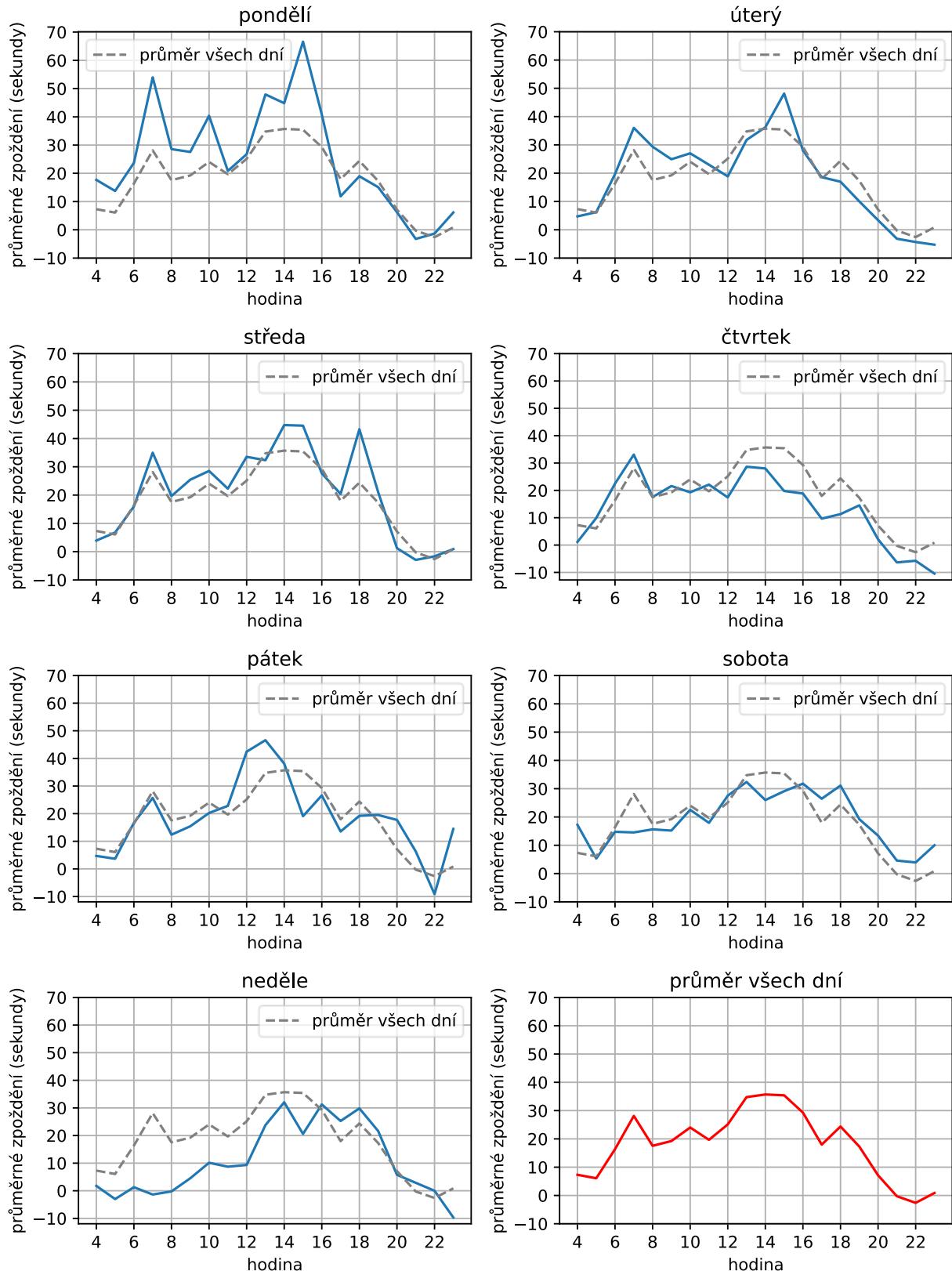
průměrného zpoždění poté kulminují v časech odpolední špičky mezi 13.00–16.00 hodinou, kdy se pohybují mezi 30 a 65 sekundami. Večer již průměrné zpoždění klesá, mezi 21.00–23.00 hodinou se dokonce dostává do záporných hodnot.

Porovnání dopravních špiček v Mostě s jinými městy, což bylo definováno jako jeden z cílů časové analýzy zpoždění, je věnován prostor v diskusi k této kapitole.

Specifické je rozložení zpoždění v pátek. Odpolední špička probíhá přibližně o hodinu dříve a večerní pokles průměrného zpoždění není stejný jako v ostatní pracovní dny, především hodnoty naměřené mezi 19.00–21.00 hodinou jsou výrazněji nad průměrem pracovních dní.

Víkendová zpoždění jsou nižší než v pracovní dny. Vyšší zpoždění jsou o víkendech zaznamenána v odpoledních a večerních hodinách, přibližně mezi 13.00–19.00 hodinou, naopak dopoledne jsou zpoždění podprůměrná. V sobotu jsou průměrná zpoždění vyšší než v neděli a jejich večerní pokles nastává později.

I z dat vývoji zpoždění v průběhu dne a týdne je patrný očekávaný vzorec prostorové mobility obyvatelstva – denní špičky v době přesunu obyvatel do zaměstnání a škol a v době návratu zpět domů, zvýšené zpoždění v páteční a sobotní večer a noc způsobené cestami za zábavou, dřívější nástup odpolední špičky v pátek z důvodu přicházejícího víkendu, a další.



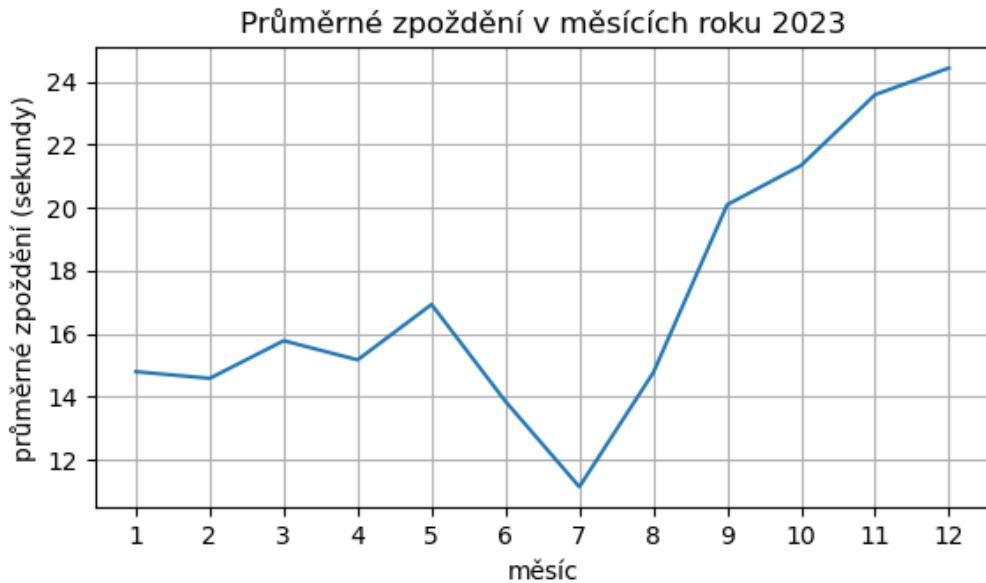
Grafy 2: Vývoj průměrného zpoždění ve dnech v týdnu.

Graf 3 zobrazuje průměrné zpoždění za jednotlivé měsíce roku 2023. Nejnižší průměrné zpoždění, jehož hodnota je 11,14 sekundy, bylo zaznamenáno v měsíci červenec. Nižší hodnoty oproti zbytku roku mají i zpoždění v červnu a srpnu. Nižší zpoždění v červenci a srpnu lze přičítat období letních prázdnin, kdy vytížení sítě cestujícími není tak velké jako ve zbytku roku a zároveň i automobilová doprava ve městech je klidnější.

Zajímavým zjištěním je, že velikost zpoždění v první polovině roku (před letními prázdninami) je výrazně nižší než v měsících po prázdninách. Zcela nejvyššího průměrného zpoždění je dosaženo v posledním měsíci roku, v prosinci, kdy dosahuje 24,43 sekundy. Tento trend může souviset s předvánoční špičkou mobility a následným nižším využíváním MHD v době nepříznivých povětrnostních podmínek, které v prvních měsících roku běžně panují. V únoru snižují poptávku po dopravě v jednom týdnu i podzimní prázdniny. Vývoj průměrného zpoždění v průběhu roku je podobný vývoji počtu přepravených osob v Pražské integrované dopravě, kde jsou tyto pohyby interpretovány jako předvánoční špička a následný propad způsobený nejmenším počtem turistů ve městě, probíhajícím zkouškovým obdobím na vysokých školách, odjezdem lidí z města za zimní rekreaci a také jarními prázdninami (PID 2019).

Data za delší časová období je ale nutné interpretovat

vat s opatrností, protože faktorů, které může vývoj zpoždění ovlivnit je nepřeberné množství. Velký vliv může mít i prostá změna jízdních řádů.



Graf 3: Průměrné zpoždění v měsících roku 2023.

Pozornost byla věnována i vývoji zpoždění v průběhu let. Časová řada je bohužel relativně krátká, a tak v hodnotách průměrných zpoždění za jednotlivé roky (tabulka 7) nelze sledovat žádný trend. Nejnižší bylo průměrné zpoždění za rok 2022, nejvyšší v roce 2021.

Tabulka 7: Průměrné zpoždění v letech 2020–2023.

rok	Ø zpoždění (s)
2020*	16,31
2021	20,64
2022	15,30
2023	19,27

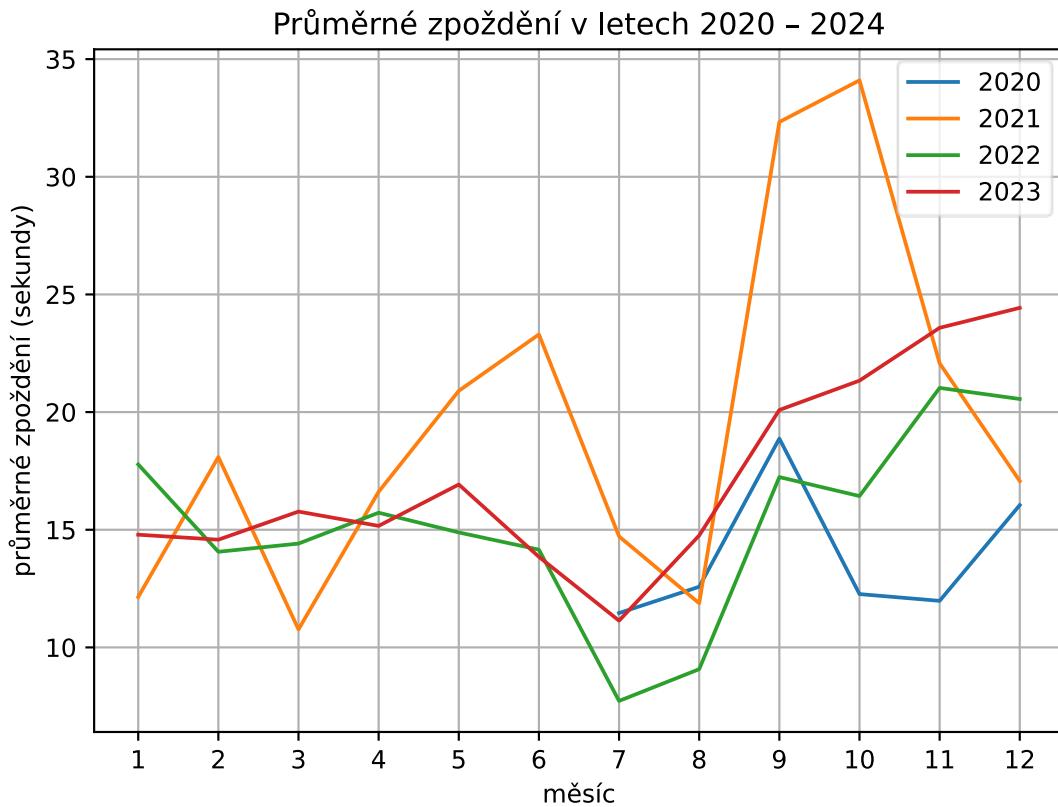
*pouze data zaznamenaná po 22. 6. 2020

Vliv letních prázdnin na nižší zpoždění v letních měsících by mohl být potvrzen srovnáním s daty za říjen a listopad 2020 (graf 4). Od 15. 10. 2020 do 30. 11. 2020 bylo v platnosti mimořádné opatření o zákazu osobní přítomnosti žáků na vysokých, středních a základních školách v souvislosti s 2. vlnou pandemie Covidu-19 (MŠMT 2021). Hodnoty průměrných zpoždění v těchto měsících se pohybují v podobných hladinách jako v měsících červenec a srpen (graf 4). Druhé stupně základních a střední i vysoké školy

ale byly v souvislosti s Covidem-19 uzavřeny i v období 4. 1.–30. 4. 2021. Mezi 1. 3.–10. 4. 2021 se k nim přidávají i první stupně základních škol a mateřské školy (MŠMT 2021). Data za leden a březen vykazují nižší průměrná zpoždění, srovnatelná s hladinou zpoždění v průběhu prázdnin, v únoru a dubnu nikoliv. Březnové nižší zpoždění může být také způsobeno odlivem cestujících v důsledku zákazu překročení hranice okresu mezi 1. 3. 2021–21. 3. 2021 (MVČR 2021). Část linky 13 zajíždějící do Oseka vjíždí do okresu Teplice. Efekt ale pravděpodobně měl i úbytek cest mezi okresy, které začínají či končí cestou MHD v Mostě a Litvínově, ale hranice při nich nejsou překročeny cestou MHD.

Pro rok 2020 jsou dostupná data až od měsíce červenec, bohužel tedy není možné zkoumat vliv první vlny onemocnění, která probíhala mezi březnem a květnem téhož roku.

Data o z průměrném zpoždění v jednotlivých měsících let 2020–2023 jsou vynesena v grafu 4. Nejvyšší zaznamenané průměry zpoždění, které se pohybují okolo 33 sekund, lze sledovat v září a říjnu roku 2021. V postcovidových letech 2022 a 2023 se objevuje shodný trend vývoje zpoždění v průběhu roku, kdy se před létem průměrné zpoždění pohybuje v nižších číslech než po letních prázdninách, kdy naopak v průběhu podzimu a začátkem zimy průměrné zpoždění roste. Roky 2020 a 2021 jsou velmi specifické z důvodu již skloňované pandemie, a tak průměry zpoždění jsou v nich proměnlivé.



Graf 4: Vývoj průměrného zpoždění v letech 2020–2023.

3.4.4 Diskuse

Pro časoprostorové analýzy provedené v této kapitole je nezbytné disponovat prostorovými daty o zpoždění s atributem o času záznamu. Aby bylo možné vytvářet vizualizace rozložení zpoždění v segmentech linek, musí ke každému vytvořenému segmentu linie linky připadat alespoň jeden záznam polohy, ze kterého bude segmentu přiřazeno zpoždění. Proto musí velikost segmentů reflektovat hustotu zaznamenaných bodů. Teoreticky tedy lze určit minimální velikost segmentu jako velikost největší mezery mezi sousedními body na lince.

Pro reprezentativnost výsledného průměrného zpoždění je ale v každém případě vhodnější vyšší počet záznamů pro jeden segment. Čím více záznamů obsahuje databáze zaznamenaných poloh, tím kratší mohou být segmenty, na které jsou linie linek rozdeleny. Svou roli zde také hraje rovnoměrnost rozdělení bodů podél linií, která většinou není ideální. Některé úseky sítě jsou častěji obsluhovány než jiné, někde jezdí vozidla rychleji než jinde atd. Je proto vhodné pro zvolená data otestovat různé délky segmentů a sledovat metriky průměrného a minimálního počtu bodových záznamů připadajících na segment.

Při tvorbě souhrnné mapy v části A průměrně k jednomu 250metrovému segmentu připadlo 431 záznamů. Nejnižší počet záznamů pro jeden segment byl 6. Pokud by segmenty měly délku 500 metrů, na každý by v průměru připadlo 942 záznamů, nejnižší počet záznamů k segmentu by byl 12. Naopak při délce segmentu 100 metrů by tato čísla klesla na 163 a 1.

Kromě počtu záznamů připadajících na segment je směrodatným faktorem při volbě velikosti segmentu také vizuální stránka mapy. Segment by se na mapě neměl jevit jako příliš krátký, protože rychlé střídání krátkých, různě barevných segmentů může působit velmi rušivě. Čím méně je k segmentu přiřazeno záznamů, tím více je výsledek průměrného zpoždění ovlivněn odlehlymi pozorováními a tím pravděpodobněji bude k rychlému střídání barev docházet. Zde samozřejmě záleží na měřítku mapy. Čím větší měřítko mapy, tím kratší reálná délka segmentu připadá v úvahu.

Při zvoleném měřítku mapy 1 : 58 000 tak, aby se celá síť MHD v Mostě a Litvínově vešla na mapu formátu A3, je velikost 250metrového segmentu na mapě reprezentována linií délky 4,3 mm.

Po testování více variant a zvážení uvedených faktorů byla délka segmentu 250 metrů pro celosítové mapy vybrána jako nejvhodnější.

Pro mapy jednotlivých linek bylo přistoupeno k 500metrovým segmentům, aby byl zajištěn dostatečný počet záznamů i v segmentech nejméně frekventovaných linek. V tomto případě nelze určit jednotnou velikost segmentu na mapě, protože měřítko mapy je pro každou linku jiné v závislosti na jejím rozsahu. Pro frekventovanější linky je možné s využitím vytvořeného programu snadno individuálně vygenerovat mapy s kratšími segmenty.

Při rozdělování linie na segmenty byl volen postup, který nejdříve zjistí délku linie a poté vypočítá na kolik úseků se musí rozdělit, aby byl jeden úsek dlouhý zadaný počet metrů. Nakonec je využita funkce *SegmentAlongLine*, které se jako argumenty vkládají počáteční a koncová vzdálenost měřená od začátku celé linie. Tímto postupem poslední úsek obvykle nemá délku odpovídající zadané délce segmentu, ale má délku odpovídající zbytku po dělení celkové délky linie zadánou délkou segmentu.

Vylepšením takového postupu by, v případě nesoudělnosti délky úseku a délky celé linie, mohlo být zaokrouhlení zjištěného potřebného počtu úseků na celé číslo. Délka celé linie by byla vydělena tímto číslem, výsledek by určil délku segmentu. Ten by tak byl oproti zadáné délce mírně delší, nebo kratší.

V celosítových mapách je zanedbána obousměrnost zobrazovaných tras linek. Z tabulky *zaznamy_polohy* lze cíl vozidla určit z atributu CILOVA_ZASTAVKA_NAME. Směr pohybu vozidla lze vyčíst z atributu AZIMUT a také lze operovat s atributem POSLEDNI_ZASTAVKA_NAME, tento atribut byl využit

při určování směru v analýze zpoždění na jednotlivých zastávkách (viz kapitolu 3.5). Při tvorbě souhrnné mapy celé sítě by bylo možné vytvořit ze segmentů orientované linie, ty by se daly zdvojit (ideálně s využitím funkce *copy parallel*) a druhé linii by byla nastavena opačná orientace. Záznam by byl poté přiřazován k té linii, jejíž orientace by byla bližší atributu AZIMUT. Tento postup by s sebou nesl řadu komplikací souvisejících především s následnou generalizací a vizualizací mapy. Pokud by byla vytvořena pouze jedna mapa, bylo by možné detaily ručně upravit, jelikož ale byly generovány souhrnné mapy i pro dvouhodinové denní intervaly, tento postup by byl příliš komplikovaný. Jeho využití by mělo největší význam u těch linek, kde byl každý směr zařazen do jiné kategorie vzorce rozložení zpoždění (tabulka 5).

Automaticky generované mapy, ať už celosítové, nebo linkové, obsahují několik kartografických nedostatků. Jedním z problémů, kterému se nepodařilo vyvarovat, je zobrazení v mapě se nevyskytujících položek v legendě. Cílem symbolologie zpoždění v segmentech bylo, aby byly celosítové a linkové mapy snadno porovnatelné mezi sebou. Proto byla u všech map nastavena stejná vizualizace zpoždění (stejné mezní hodnoty i barvy). To ale vede k tomu, že se ve vygenerované mapě mohou objevovat pouze některý intervaly, v legendě jsou nicméně zachovány všechny. Jde formální kartografický, nikoliv praktický problém.

U linkových map zpoždění je často generováno nadmerné množství výstupních map, protože některé spoje jsou zkrácené a nepokračují až do nejzazší konečné zastávky. To je způsobeno tím, že jsou vytvářeny mapy pro každou konečnou zastávku, která se objevuje alespoň jednou v atributu *zaznamy_polohy.CILOVA_ZASTAVKA_NAME*. Řešením by bylo vytvoření seznamu variant konečných stanic v každém směru pro každou linku, což ale jde proti principu automatizace celého procesu. Pokud by byl autorovi práce k dispozici strojově čitelný jízdní řád, např. ve formátu GTFS, bylo by možné konečné zastávky seskupit automatizovaně. Řešením by mohla být také úprava geometrie linek a zastávek. Linky byly reprezentovány orientovanými liniemi a zastávkové sloupky by byly umístěny na odpovídající straně od orientované linie. Podrobněji je taková topologie popsána v kapitole 3.5.4.

Dopravní špička v Mostě

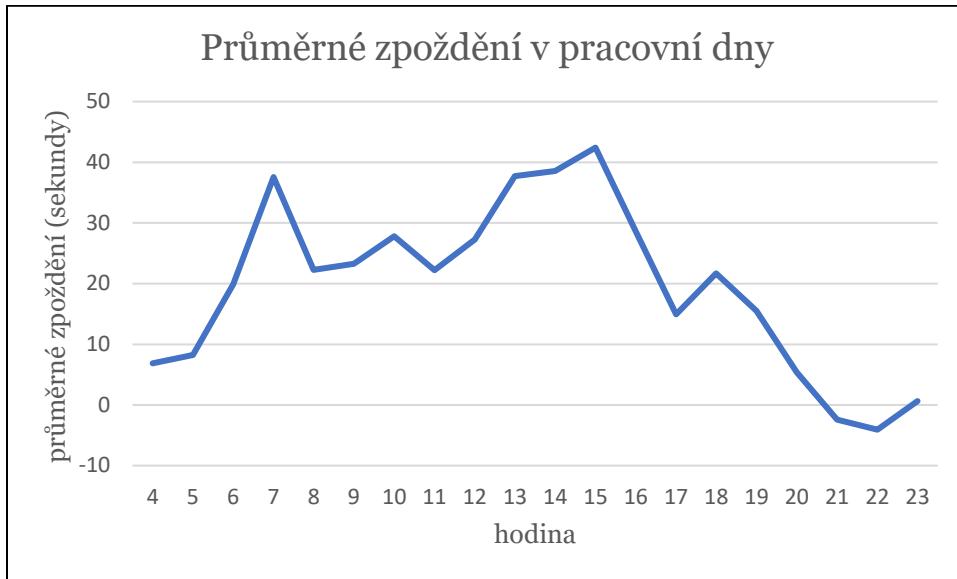
Dalším z cílů této části práce bylo porovnat časy dopravní špičky v Mostě s jinými městy v Česku. Dopravní špička je časový úsek, v němž dochází k výraznému zvýšení intenzity dopravy nad průměr sledovaného období (Široký a kol. 2020). Ministerstvo dopravy (2018) považuje za dopravní špičku v českém prostředí časy 7.00–9.00 a 15.00–17.00 hodin, přičemž připouští posun odpolední špičky dle regionu na dobu 13.00–15.00 nebo 16.00–18.00 hodin. Dopravní špička se typicky určuje na základě měření intenzity dopravy. Lze ji ale určit i na základě rychlosti vozidel, přičemž někdy je využívána pouze rychlosť vozidel

MHD (Rajman 2009). Hlisníkovský (2018) dokonce porovnával denní rytmy měst pouze na základě analýzy jízdních řádů MHD, z nichž určoval i dopravní špičky.

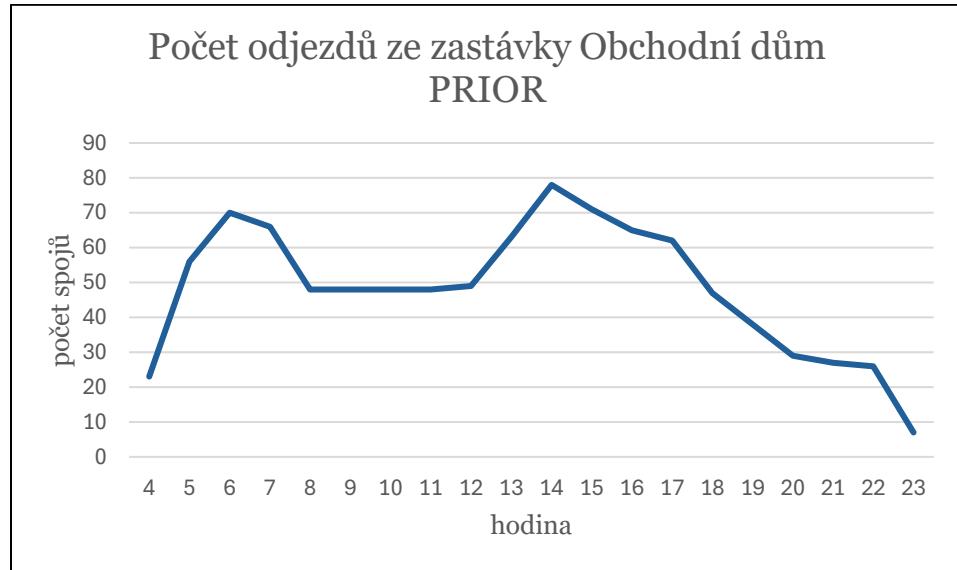
Teoreticky by mělo být možné určit dopravní špičku i z dat o zpoždění spojů MHD, za předpokladu, že je zpoždění ve většině případů způsobeno zvýšenou dopravní zátěží na komunikacích, nebo zvýšeným počtem cestujících. V případě mostecko-litvínovské MHD je souvislost mezi zpožděním a počtem přepravených osob umocněna skutečností, že nástup do autobusů je cestujícím umožněn v celé síti MHD pouze předními dveřmi, přičemž probíhá odbavení u řidiče autobusu. To prodlužuje pobyt autobusu v zastávce přímo úměrně počtu nastupujících pasažérů.

Ranní dopravní špička v pracovních dnech dle průměrného zpoždění nastává v Mostě a Litvínově v čase **6.00–8.00** hodin, přičemž mezi 7.00–8.00 hodin jsou zpoždění nejvyšší. V časová okna 6.00–8.00 hodin a 7.00–9.00 hodin jsou průměrná zpoždění velmi podobná, na základě analýzy jízdních řádů byla jako dopravní špička určena první jmenovaná doba. Odpolední špička dle zpoždění nastává v čase **13.00–16.00** hodin. Průměrná zpoždění v pracovní dny zobrazuje graf 5.

Při srovnání dat o průměrném zpoždění s počtem odjezdů spojů ze zastávky Obchodní dům PRIOR (graf 6), která se nachází v centru Mostu, je zřejmé, že zpoždění přibližně kopíruje počet spojů. Počet spojů zpravidla reflekтуje poptávku cestujících, která je nejvyšší v čase dopravních špiček. Dopravní špičky jsou tedy potvrzeny i počtem spojů.



Graf 5: Průměrné zpoždění (sekundy) v síti MHD Most a Litvínov v jednotlivých hodinách v pracovní dny.



Graf 6: Počet odjezdů spojů ze zastávky Obchodní dům PRIOR v jednotlivé hodiny pracovního dne.

Dopravní špičky měst Most a Litvínov se podobají jiným průmyslovým městům jako Pardubice, Havířov či Žilina (Hlisnikovský 2018). V Praze je ranní dopravní špička posunuta na čas 7.30–9.30, odpolední špička nekulminuje v jedné až dvou hodinách jako jinde, ale je roztažená asi od 15.00–19.00 (Metropole všech 2024, Golemio 2024). Doba dopravních špiček souvisí se zastoupením sekundéru a terciéru ve sledovaných

městech. Čím vyšší je podíl priméru a sekundéru ve městě, tím jsou dopravní špičky ostřejší (souvisí se směnným provozem) a nastávají dříve, roste také rozdíl mezi počty vypravovaných spojů ve špičkách a v sedlech (Hlisníkovský 2018).

3.5 Analýza zpoždění na jednotlivých zastávkách

Pro cestující městskou hromadnou dopravou je důležité zpoždění na příjezdu vozidla do konkrétní zastávky, na které začínají svoji cestu městskou hromadnou dopravou. Dává jim směrodatnou informaci o tom, kdy se na zastávku vydat, aby nemuseli na spoj zbytečně dlouho čekat. V následující analýze je navržen postup, který sleduje průměrné zpoždění na příjezdu spojů na jednotlivé zastávky.

3.5.1 Cíle

Cílem analýzy je vytvořit tabulky průměrného zpoždění na jednotlivých zastávkách pro každou linku MHD. Aby analýza poskytovala smysluplné informace, je také nutné rozlišit odjezdové směry, pokud je zastávka pro danou linku obousměrná.

Pro vytvoření takových statistik je nezbytné definovat zóny kolem zastávek, ze kterých budou vybírány body z tabulky *zaznamy_polohy* pro výpočet průměrného zpoždění. Kolem každé (obousměrné) zastávky se musí vytvořit dvě zóny, protože směrovost je v této analýze zásadní. Z bodů z tabulky *zaznamy_polohy* budou vybrány pouze odpovídající body a z nich vypočítáno průměrné zpoždění na příjezdu na zastávku z daného směru.

Cílem je vytvořit soubor formátu *csv* se záznamy o každém odjezdovém směru každé zastávky každé linky spolu s příslušnou hodnotou průměrného zpoždění.

3.5.2 Praktická realizace

Na následujících rádcích je nejprve popsán základní princip realizace výpočtu průměrného zpoždění pro každou zastávku. Postup u konečných zastávek je odlišný a je popsán zvlášť.

Je pracováno s odvozeným datasetem *zastavy* a datasetem *linky*, který je upraven tak, že je v něm každá linka reprezentována jednou spojitou linií.

Jsou použity záznamy polohy z tabulky *zaznamy_polohy*, jelikož záznamy vozidel stojících v zastávce by ovlivňovaly skutečnou velikost zpoždění na příjezdu vozidla (opakované záznamy záporného zpoždění

když předjetý spoj čeká na čas svého pravidelného odjezdu). Stejně tak by v analýze mohly být problematické záznamy jízdy vozidla na první zastávku. Dataset *zaznamy_polohy* je odvozen z datasetu *zanamy_polohy_orig*, datové sady jsou popsány v kapitole 3.1.2.

Základní algoritmus

Okolo každé zastávky je vytvořen buffer velikosti 100 metrů. Hranice tohoto bufferu protíná (v obvyklém případě) ve dvou bodech linii linky. Tyto body jsou uloženy a pomocí nich je vytvořena kolmice na úsečku jimi tvořenou, procházející jejím středem.

Jsou-li dány dva body, A a B, o známých souřadnicích, lze snadno vytvořit normálový vektor, který je kolmý na úsečku AB. Nejprve je zjištěn vektor úsečky AB, jako:

$$\overrightarrow{AB} = (x_B - x_A, y_B - y_A)$$

Kde x_A, y_A jsou souřadnice bodu A, x_B, y_B jsou souřadnice bodu B.

Kolmý vektor lze získat prostou výměnou souřadnic původního vektoru a vynásobením jedné z nich hodnotou -1 (tzn. otočením znaménka). Výsledný kolmý vektor je tedy:

$$\vec{n} = (y_B - y_A, x_B - x_A)$$

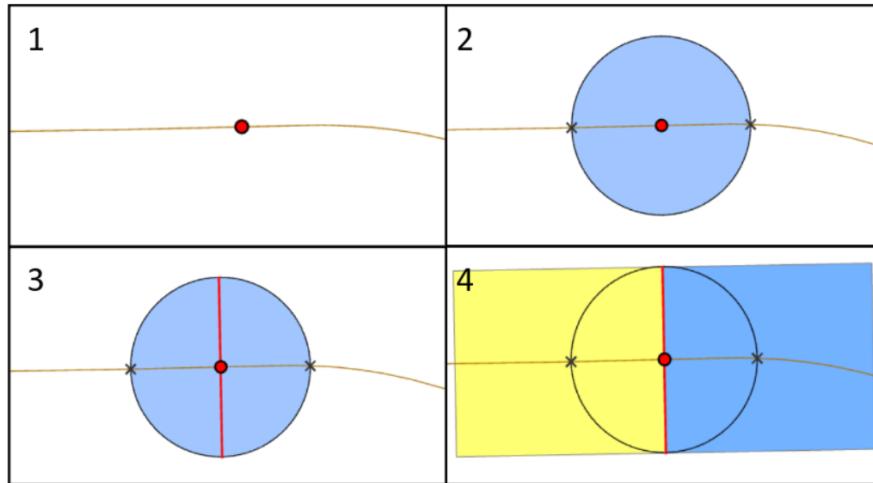
Souřadnice vektoru x a y se postupně přičetou a odečtou k souřadnicím středu úsečky AB, čímž se získají body výsledné kolmice na úsečku AB.

Od této kolmice jsou postupně vytvořeny buffery na jedné a na druhé straně (dvě volání funkce *buffer*, parametr *line_side* postupně "LEFT" a "RIGHT") velikosti 225 metrů. Tato velikost byla zvolena experimentálně. Po provedení několika pokusů bylo vyhodnoceno, že jde o nejlepší možný kompromis požadavku na dostatečně velký polygon, aby byl zaznamenán reprezentativní počet bodů, a tím, aby byla správně identifikována poslední zastávka a polygon příliš často nezasahoval až za sousední zastávku na trase linky. Vhodnější se pro další postup jeví volba parametru *line_end_type* jako "FLAT", což způsobuje nezaoblení výstupního polygonu.

Tím jsou vytvořeny pro každou zastávku 2 polygony tvaru obdélníků protažené ve směru linie linky. Postup tvorby těchto polygonů je ilustrován obrázkem 15, zobrazené kroky reprezentují:

1. bod zastávky (červený) a linie linky (hnědá)
2. vytvořený buffer (modrý) a nalezené průsečíky s linkou (dva body označené černými křížky)
3. vytvořená kolmá úsečka (červená) procházející středem pomyslné úsečky spojující nalezené průsečíky

4. vytvoření pravostranného a levostranného bufferu (žlutý a modrý obdélník) podél této kolmé úsečky



Obrázek 15: Tvorba polygonů *zony_zastavek_{číslo_linky}*.

Takto vytvořené pravostranné a levostranné polygony jsou sjednoceny do tabulky *zony_zastavek_{číslo_linky}* (podstatné atributy uvedeny v tabulce 8), jsou k nim přidány také zóny konečných zastávek (tvořeny jinak, popsáno v další podkapitole).

Tabulka 8: Podstatné atributy datasetu *zony_zastavek_{číslo_linky}*.

Název atributu	Význam	Datový typ
OBJECTID	Unikátní identifikátor záznamu	Object ID
nazev_zastavky	Název zastávky, ke které polygon připadá	Text String
konecna	Pokud se jedná o konečnou zastávku, je hodnota atributu rovna 1	Short Integer
PosledniZastavka	Zastávka, ze které přijíždějí spoje, jejichž průměrné zpoždění je uvažováno. De facto nepřímo vyjádřená informace o směru.	Text String
PrumerneZpozdeni	Průměrné zpoždění příslu spojů (minuty)	Double

Do vytvořeného atributu NejcastejsiZastavka tabulky *zony_zastavek_{číslo_linky}* byla, kvůli pozděší identifikaci směru, zapsána nejčastější zastávka vyskytující se v atributu POSLEDNI_ZASTAVKA_NAME záznamů polohy odpovídající linky nacházejících se uvnitř polygonu.

Zpoždění má být počítáno pro záznamy vytvořené vozidly přijíždějícími na danou zastávku. Proto nejsou v úvahu brány záznamy, kde je hodnota POSLEDNI_ZASTAVKA_NAME shodná s názvem právě zpracovávané zastávky, v tom případě se totiž jedná o záznamy ze zastávky odjíždějících vozidel (tj. jedou v opačném směru). Následně jsou vybrány záznamy polohy právě zpracovávané linky nacházející se uvnitř každého z těchto polygonů, jejichž poslední projetá zastávka (atribut POSLEDNI_ZASTAVKA_NAME) je shodná s vytvořeným atributem NejcastejsiZastavka tabulky *zony_zastavek_{číslo_linky}*. Tím je zajištěno, že jsou (v ideálním případě) vybrány záznamy odpovídajícího směru. Z těchto záznamů polohy je vypočtena průměrná hodnota jejich atributu ZPOZDENI_MIN a je uložena do vytvořeného atributu PrumerneZpozdeni tabulky *zony_zastavek_{číslo_linky}*.

Tím je zkomentována tabulka *zony_zastavek_{číslo_linky}*. Z ní jsou atributy nazev_zastavky, PosledniZastavka a PrumerneZpozdeni spolu s informací o číslu linky (doplňena dle aktuální iterace) přidány do výsledného souboru *zpozdeni_zastavky.csv*.

Celý tento postup je iterován pro každou linku zvlášť.

Přílohou práce je csv soubor s výsledky a vytvořený skript *zastavky_zpozdeni.py*, který iteruje popsaný postup pro každou zastávku každé linky.

Výjimka pro konečné zastávky

Konečná zastávka je identifikována, pokud je nalezen pouze jeden průnik hranice bufferu kolem zastávky s linií linky. Informace o tom, že je zastávka konečná, je v takovém případě zapsána do příslušného atributu. Není tvořena kolmice a buffery podél ní, ale celý polygon bufferu kolem konečné zastávky je přidán do tabulky *zony_zastavek_{číslo_linky}*. Směrovost není u konečných zastávek třeba řešit, protože příjezdový směr existuje pouze jeden, stačí tedy tento jeden polygon.

Okružní a polookružní linky

Postup není uzpůsoben tomu, že okružní a polookružní linky některé zastávky projíždějí pouze v jednom směru. Nedává pro ně tedy smysl tvořit průjezdový polygon v opačném směru. Postup, který by vyžadoval úpravu logiky vstupních dat, je navržen v diskusi. V aplikovaném postupu jsou takto vytvořené polygony z výsledků manuálně odstraněny.

3.5.3 Výsledky

Do výsledné tabulky (soubor *zpozdeni_zastavky.csv*) bylo zapsáno 846 záznamů. Ve výsledcích lze dohledat příslušné zpoždění každé linky pro každý směr každé obsluhované zastávky. Výjimkou je 61 případů, kdy v definovaném polygonu nebyl nalezen ani jeden záznam polohy. To se týká málo frekventovaných linek či jejich úseků.

Údaje o zastávkách málo frekventovaných linek mohou být zkresleny nízkým počtem bodů o poloze zaznamenaných uvnitř zóny zastávky. V takovém případě i jedno odlehlé pozorování výrazně ovlivňuje celkové průměrné zpoždění vypočítané pro danou zastávku. V hodnocení zastávek s nejvyšším a nejnižším zpožděním z toho důvodu nejsou uvažovány linky (či úseky linek) s průjezdem méně než 10 spojů denně.

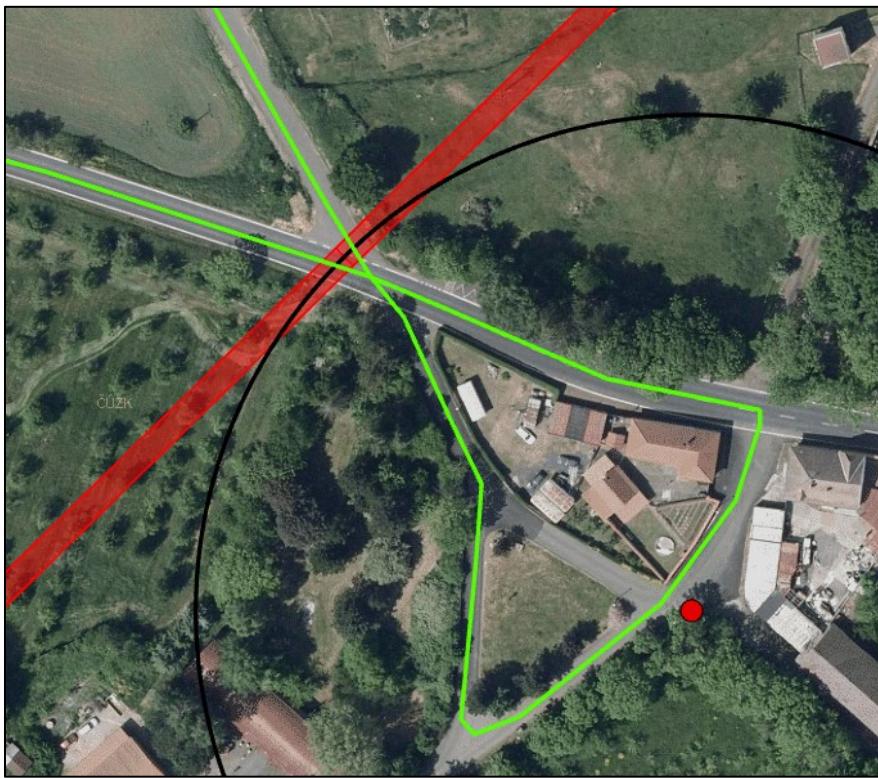
Celkově průměrné zpoždění na příjezdu spoje do zastávky spočítané popsaným způsobem dosahuje 22,14 sekundy. Nejvyšší zaznamenaná je hodnota 3,71 minuty při příjezdu linky 14 na zastávku *Janov, pekárny* ze zastávky *Hamr*. Nejnižší zaznamenané zpoždění se vyskytuje na lince 4, a sice na příjezdu na zastávku *Záluží, CHEMOPETROL* ze zastávky *Záluží, Zdravotní středisko*, kdy sem spoje dle vypočítaných údajů přijížděly v průměru s náskokem 6,45 minuty oproti jízdnímu rádu. Uvedené maximální průměrné hodnoty byly pravděpodobně ovlivněny odlehlými pozorováními, protože především náskok 6,45 minuty na příjezdu linky je ve zkoumaném systému MHD nereálný.

3.5.4 Diskuse

Tvorba zón zastávek

Namísto tvorby bufferů podél kolmic by se nabízelo polygony bufferů rozdělit na dva pomocí vytvořených kolmic. Tento postup by byl snadno proveditelný funkcí *Feature to Polygon*, ukázalo se ale vhodnější disponovat polygony protaženými ve směru linie, což použitá varianta splňuje. Alternativně by šlo tvořit buffer přímo podél linie linky, podobně jako v případě, kdy jsou nalezeny více než 2 průsečíky hranice bufferu a linie linky. Použitý postup se ale ukázal jako výpočetně méně náročný.

Vzhledem ke složitosti některých tvarů linek došlo ve výjimečných případech k nevhodnému vytvoření polygonů zón zastávek. Problémem je především změna směru jízdy linky pod velmi ostrým úhlem v blízkosti zastávky. Nejjejímavějším případem je situace u zastávky *Skršín, Chrámce*. Linka 10 v blízkosti vytváří smyčku zachycenou na obrázku 16, průsečíky hranice bufferu (na obrázku černě) s linkou (zeleně) jsou velmi blízko sebe, tím je způsobeno i to, že vytvořená kolmá úsečka má krátkou délku a výsledné polygony zón zastávky (červené) jsou zcela nevhodné pro další postup. Bod zastávky je na obrázku symbolizován červeně.

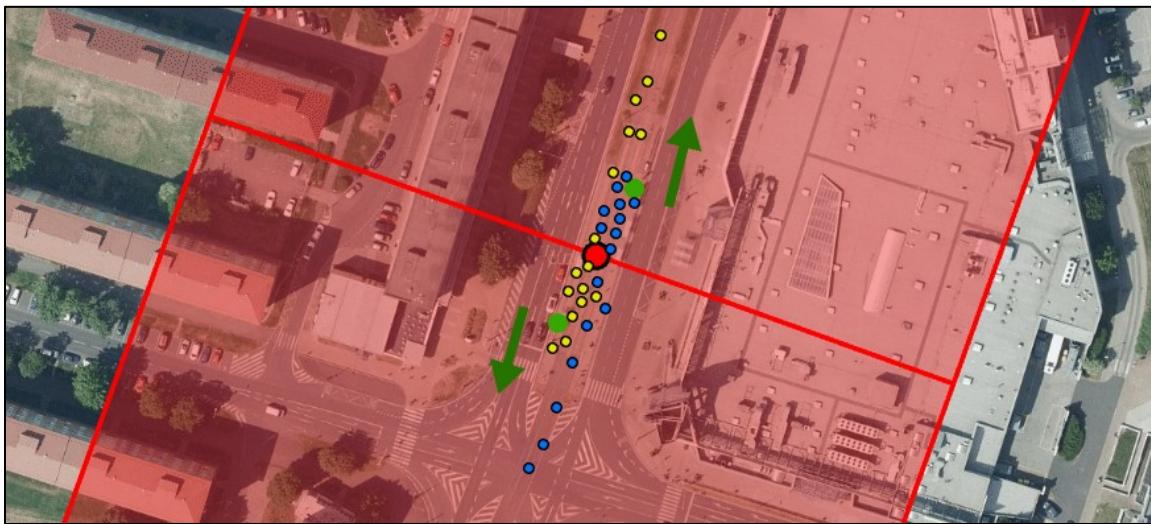


Obrázek 16: Příklad nevhodného vytvoření zón zastávek (červené polygony).

Chybné identifikace poslední zastávky

V místech, kde je protisměrný odjezdový sloupek v zájmovém polygonu, bývá u sloupku velká koncentrace záznamů protisměrně jedoucích vozidel a může dojít k zaznamenání stanice z opačného směru. Situace je ilustrována obrázkem 17, na kterém jsou žlutými body znázorněny záznamy spojů jedoucích jižním směrem, modrými body záznamy spojů jedoucích severním směrem. Bíle jsou body, jejichž poslední projetou zastávkou je zpracovávaná zastávka, tedy nejsou pro účely této analýzy relevantní. Zóny zastávky jsou znázorněny průhlednou červenou barvou, zpracovávaná zastávka vytvořená jako těžiště bodů odjezdových je označena červeným bodem. Samotné odjezdové sloupy jsou označeny zeleným bodem, šipkou je naznačen příslušný odjezdový směr.

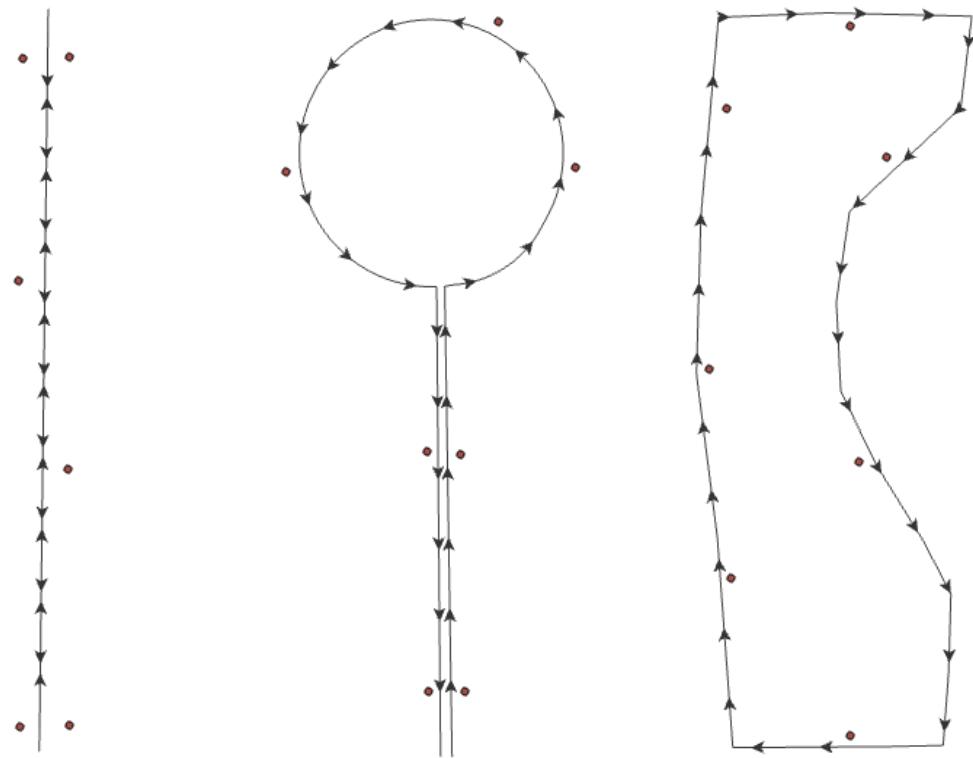
Z obrázku je zřejmé, že při takovém uspořádání prvků některé záznamy přesahují do protisměrné zóny zastávky. Při velké koncentraci takto zaznamenaných bodů může výjimečně docházet k situaci, kdy je v zóně zastávky nejvíce záznamů právě takových. Tehdy je do atributu PosledniZastavka tabulky *zony_zastavek_{číslo_linky}* zanesena nesprávná hodnota.



Obrázek 17: Příčina chybné identifikace poslední zastávky (popis obrázku v textu).

Jiné přístupy k určení směru příjezdu

Pokud by v datech existovaly pro každou obousměrnou linku dvě protisměrně orientované linie (nebo jedna překrývající se linie vedoucí trasou linky tam a zpět), pro každou polookružní linku jedna linie, která by byla správně orientovaná v jednosměrném úseku, v obousměrném úseku by vedla paralelně tam i zpět (případně by se překrývala) a pro každou okružní linku jedna správně orientovaná linie, bylo by možné generovat polygony zón zastávek závisle na směru. Vzor takové geometrie je zachycena na obrázku 18. Tento přístup by vedl k tomu, že odjezdové sloupky pro příslušný směr by byly snadno selektovatelné tím, že se nacházejí vpravo od linie linky. Díky této vlastnosti dat by šlo generovat polygony pro správný směr, navíc přímo od odpovídajícího odjezdového sloupku.



Obrázek 18: Navrhovaná topologie geometrie zastávek a linek. Zleva obousměrná, polookružní a okružní linka. Hnědě body odjezdových sloupků.

Tento postup by také vyřešil problematiku okružních a polookružních linek, jejichž protisměrné polygony bylo jinak nutné manuálně odstraňovat z výsledků.

Tvorba map průměrného zpoždění na příjezdu do zastávky

Nejlepším způsobem vizualizace získaných dat by bylo vytvoření map, které by zobrazovaly průměrné zpoždění na příjezdu vozidel do zastávky linky z příjezdových směrů. Automatická tvorba takových map pro každou linku by vzhledem k množství drobných chyb a nestandardních záznamů v datech byla (v rozumné kvalitě) téměř nemožná. Manuální tvorba map je s touto verzí analýzy nejlepším možným přístupem. Data každé linky je nutné individuálně prohlédnout a očistit od nepředpokládaných chyb, vzniklých nejčastěji situacemi popsanými výše.

Jako vizualizační prostředek se nabízí reprezentace zastávek bodovými symboly ve tvaru kruhu. Kruh by mohl být rozpůlen a barva každé jeho půlkružnice by symbolizovala zpoždění na příjezdu z daného směru. Samozřejmostí by musela být správná orientace symbolu. Konečné a jednosměrné zastávky by byly symbolizovány pouze půlkruhem.

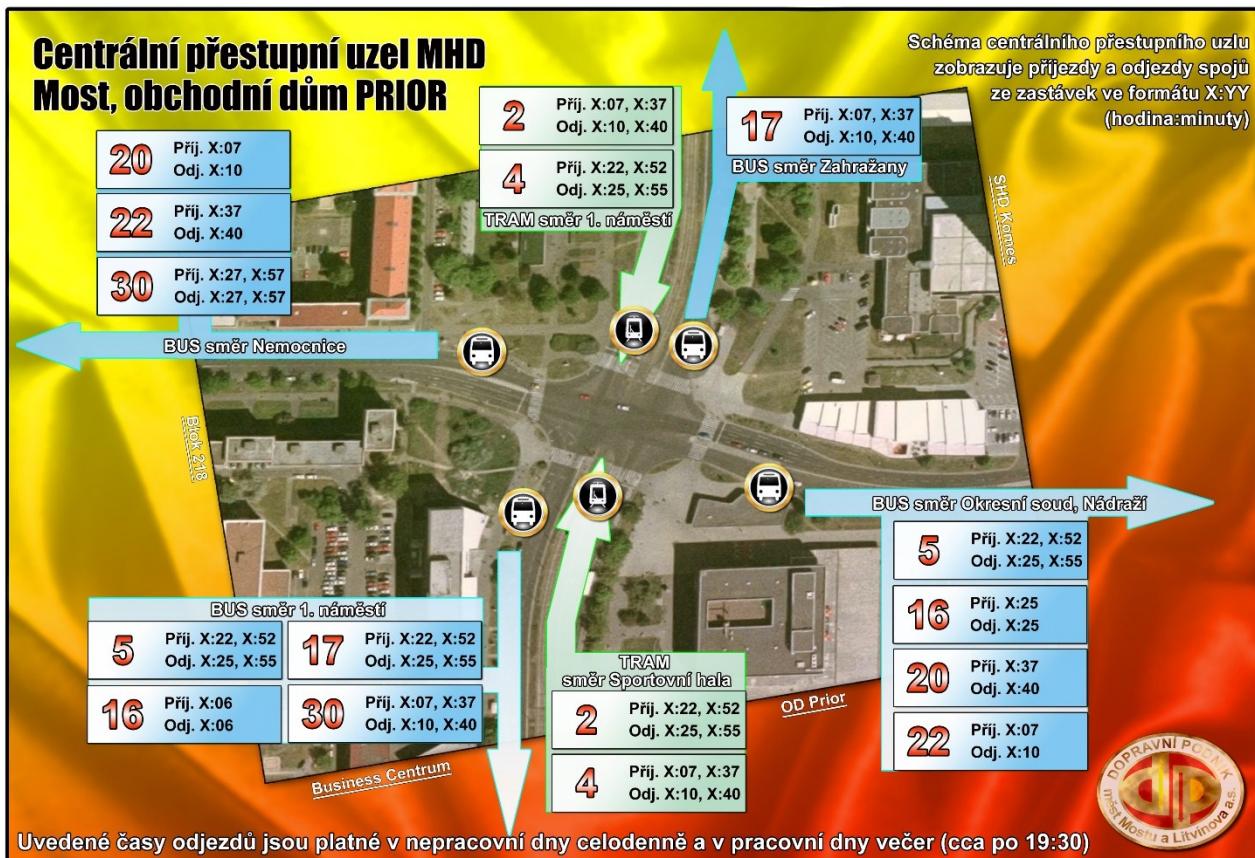
3.6 Analýza spolehlivosti přestupních vazeb na přestupních uzlech

V síti MHD v Mostě a Litvínově fungují od prosince 2012 dvě zastávky, na kterých je o víkendech celodenně a v pracovní dny ve večerních hodinách zajištěno sjíždění vybraných spojů tak, aby mezi nimi bylo možné pohodlně přestupovat. Tyto zastávky, kterými jsou *Obchodní dům PRIOR* (v Mostě) a *Litvínov, nádraží*, jsou označovány jako centrální přestupní uzly (dále jen CPU). Přestupní uzel je obecně místem, ve kterém je umožněn cestujícím přestup mezi více než dvěma linkami veřejné hromadné dopravy nebo mezi různými druhy dopravy (ČSN 73 6425-2).

Na sledovaných CPU se sjíždějí autobusy a tramvaje v pravidelných intervalech. CPU v Mostě zajišťuje přestupní vazby mezi 2 tramvajovými a 6 autobusovými linkami, které se rozjíždějí celkem do 16 směrů. V Litvínově CPU umožňuje přestup mezi 1 tramvajovou a 2 autobusovými linkami rozjíždějícími se do 5 směrů. V pracovní dny dochází k prvnímu rozjezdu v Mostě v 19.40 hodin, v Litvínově v 19.33 hodin. V pozdních nočních hodinách ubývá počet sjíždějících se linek. Poslední případy v pracovní dny, kdy se rozjíždějí alespoň 3 linky, nastává v Mostě ve 22.55 hodin, v Litvínově ve 22.33 hodin. V nepracovní dny fungují CPÚ po celý den, v Mostě v časech 5.10–22.55 hodin, v Litvínově v časech 5.03–22.33 hodin (opět uvažovány pouze rozjezdy s alespoň třemi rozjíždějícími se linkami).

Schéma CPU v Mostě zachycuje obrázek 19 převzatý od Dopravního podniku měst Mostu a Litvínova. Ve schématu jsou zaznamenány i časy odjezdů a příjezdů linek, ze kterých je zřejmé, že ne vždy se sjíždějí všechny linky všech směrů. Kombinace linek se liší v jednotlivé časy rozjezdů.

Specifické postavení mají na CPU v Mostě linky 16 a 30, které v jednom ze svých směrů (jde o polookružní linky) přijíždějí v nerozjezdové časy. V případě linky 16 jde o čas X.06 ve směru 1. náměstí, u linky 30 se jedná o časy X.27 a X.57 ve směru Nemocnice. Tyto spoje byly v analýze vynechány, protože přestup z nejbližšího sjezdu na linku 16 teoreticky nemůže být stihnut, stejně jako nemůže být stihnut přestup z linky 30 (v uvedených směrech).

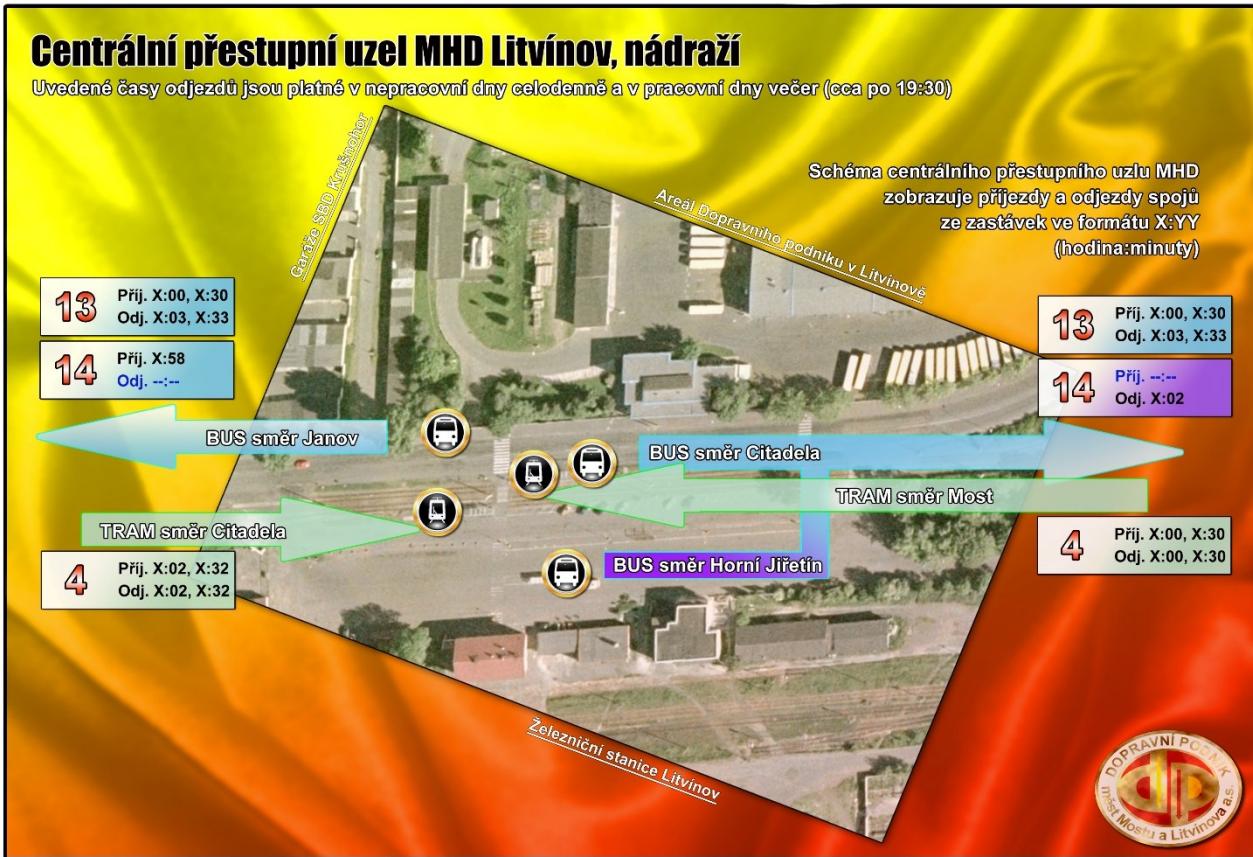


Obrázek 19: Centrální přestupní uzel Most, OD PRIOR. Zdroj: Dopravní podnik měst Mostu a Litvínova, a. s.

CPU v Litvínově prošel v uplynulých letech přestavbou a situace zobrazená na obrázku 20 byla platná do ledna 2022. Časy rozjezdů souhlasí, ale místa odjezdů linek nikoliv.

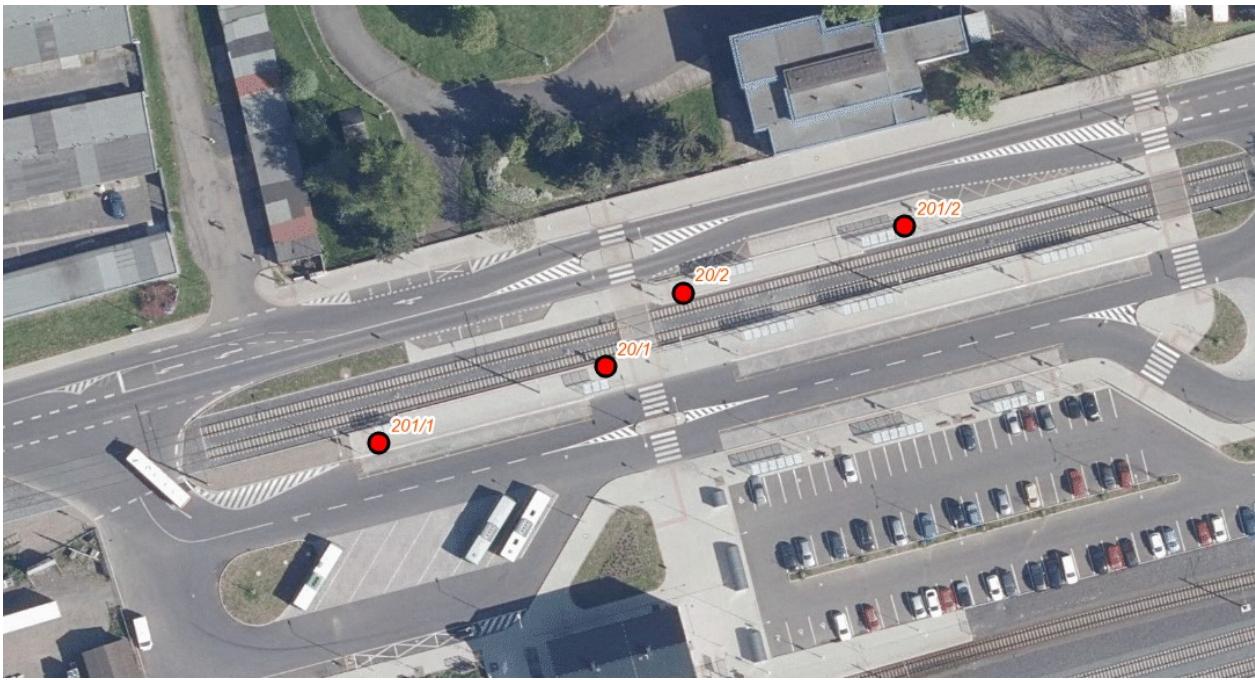
Aktuální rozmístění odjezdových sloupků je zobrazeno na obrázku 21. Ze sloupků 20/1 a 20/2 odjízdějí tramvaje číslo 4 ve směru *Litvínov, Citadela*, respektive *Most, Dopravní podnik*. Z odjezdového sloupku 20/2 odjízdějí spoje linky 13 ve směru *Litvínov, Citadela*, které dále pokračují do konečných zastávek *Litvínov, Koldům; Loučná, konečná; Lom, rozcestí M. Radčice; a Osek, kolonie*. Sloupek 20/1 slouží spojům linky 14 a linky 13 ve směru na Janov a Křížatky. Do CPU v Litvínově je zapojena i velmi zřídka jezdící linka 27, která ve schématu nefiguruje, ale časy odjezdů (jeden v pracovní dny večer a čtyři v nepracovní dny) přibližně respektují rozjezdové časy CPU. CPU je také přestupním místem na autobusovou a vlakovou dopravu. Časy sjíždění MHD jsou koorinovány i s autobusovými linkami 501, 521, 523, 525, 526, 529, 564 a linkou společnosti Arriva do zastávky Praha, Holešovice. V X:29 také přijízdějí osobní vlaky z Teplic v Čechách, přestup na linky 13, 14 a 4 ve směru *Litvínov, Citadela* by teoreticky měl

být možný. V této práci jsou nicméně řešeny pouze přestupní vazby mezi spoji znázorněnými na schématu Dopravního podniku (obrázek 20).



Obrázek 20: Centrální přestupní uzel Litvínov, nádraží. Zdroj: Dopravní podnik měst Mostu a Litvínova, a. s.

Linky do centrálních uzelů přijíždějí ve stejný čas (± 3 minuty) a po několika minutách setrvání v zastávce se ve stejný čas (± 3 minuty) i rozjíždějí. To znamená, že v ideálním případě, kdy žádná z linek nemá zpoždění, přestup mezi všemi linkami proběhne bez komplikací v časovém okně, kdy všechny linky setrvávají v zastávce. V případě, že některý ze spojů přijíždí s výraznějším zpožděním, může dojít k situaci, že ostatní spoje ze zastávky odjedou před příjezdem zpožděného spoje. Přestup ze zpožděného spoje na ostatní spoje tedy nemůže být realizován. Přestup na zpožděný spoj není ovlivněn.



Obrázek 21: Rozmístění odjezdových sloupků na CPU Litvínov, nádraží.

Dle emailové komunikace s Dopravním podnikem měst Mostu a Litvínova přestupy na uzlech obecně nejsou garantovány (Krtička 2013). Pan Krtička uvedl, že “v provozu na bázi centrálních přestupních uzlů samozřejmě na přestupy dbáme více, ale garantovat je obecně nemůžeme”, a dále, že “každý cestující si musí rozmyslet dle svých schopností a dle aktuálního počasí atd., jaká je pravděpodobnost přestup stihnout”.

Cestující ve veřejné dopravě vnímá velice citlivě spotřebu cestovního času. Přestože každý přestup odrazuje cestujícího od využití hromadné dopravy (Wendler 2003 v Matuška, Mrzena 2006), zcela se jim vyhnout nelze. Pro atraktivitu hromadné dopravy je proto zásadní, aby přestupy mezi spoji byly rychlé a spolehlivé. Přávě spolehlivostí přestupních vazeb na CPU v Mostě a Litvínově se zabývá tato část práce.

3.6.1 Cíle

Cílem této analýzy je vyjádřit spolehlivost přestupních vazeb na CPU v Mostě a Litvínově. Přestupní vazbu se rozumí přestup z prvního dopravního prostředku do druhého. Pro úspěšné vykonání přestupu je nutné, aby spoj A (ze kterého je přestupováno) přijel před odjezdem spoje B (do kterého je přestupováno) a zároveň měl cestující dostatek času k přesunu mezi oběma vozidly. Za úspěšnou přestupní vazbu je tedy považována situace, ve které platí následující nerovnice:

$$T_A + t_p \leq T_B$$

kde T_A je čas příjezdu spoje, t_p je doba přesunu na místo odjezdu druhého spoje a T_B je čas odjezdu spoje, na který je přestupováno.

Spolehlivostí přestupních vazeb se rozumí pravděpodobnost úspěšného stihnutí přestupu na navazující spoj. Pro zjištění spolehlivosti přestupní vazby je tedy nutné zjistit, kolik z celkového objemu přestupů za sledované období bylo možné realizovat. Dílčí spolehlivosti lze vypočítat také pro jednotlivé linky a konkrétní přestupové kombinace dvou linek.

K tomu je třeba, jak vyplývá z uvedené rovnice, disponovat třemi údaji pro každý přestup. Jelikož dostupné záznamy o poloze vozidel nemají dostatečnou frekvenci záznamu pro to, aby každý příjezd a odjezd autobusu na/ze zastávky byl v daný okamžik zaznamenán, je nutné tyto časy odhadovat na základě dostupných záznamů v tabulce *zaznamy_polohy_ocisteno*. Čas potřebný k přesunu mezi místem příjezdu a odjezdu lze měřit přímo v terénu. V případě CPU v Mostě do výpočtu času přesunu vstupuje navíc faktor semaforů, které zpomalují přesun cestujícího mezi dvěma příslušnými odjezdovými sloupky, protože přestup mezi některými linkami může znamenat nutnost přejít dvě ramena křižovatky. Dílčími cíli, které jsou popsány v závěrečné části následující podkapitoly, jsou tedy výpočty odhadovaného času příjezdu spoje A, výpočet odhadovaného odjezdu spoje B a výpočet času přesunu cestujícího mezi oběma spoji.

3.6.2 Praktická realizace

Aby byl samotný popis postupu přehledný, jsou dále nejprve popsány použité pomocné datové sady.

Pomocné datové sady

Uspořádaná dvojice (trojice) linka_smer

Aby bylo zřejmé, o který směr linky se jedná, jsou pro linky sjíždějící se v CPU vytvořeny uspořádané dvojice (*linka, ID konečné stanice*). V případě, že je linka okružní či polookružní, konečná zastávka

je v obou směrech linky totožná. V takovém případě je pro jednoznačné určení směru linky vytvořena uspořádaná trojice (*linka, ID konečné stanice, 1/2*), kde číslo 1 nebo 2 označuje směr.

Tabulka cas_presunu

Tabulka středních dob přesunu mezi dvojicemi odjezdových sloupků daného CPU. Ve střední době je zahrnuta střední délka čekání cestujícího na semaforu pro pěší (či semaforech, pokud jsou přecházena 2 ramena křižovatky). Světelná křižovatka se nachází pouze na CPU v Mostě. Postup měření doby přesunu je popsán v podkapitole doba přesunu.

Slovnik linky_info

Slovnik s informacemi o lince (v daném směru). Klíčem je uspořádaná dvojice či trojice *linka_smer*, hodnotami je údaj o příslušném odjezdovém sloupku (SLOUPEK_ID), o tom, zda linka přijíždí k odjezdovému sloupku přes křižovatku (pouze CPU v Mostě) a o střední době čekání autobusu na semaforu při průjezdu křižovatkou u Prioru (křížení třídy Budovatelů s ulicemi Moskevská a Josefa Skupy). Hodnoty slovníku *linky_info* shrnuje tabulka 9.

Tabulka 9: Hodnoty slovníku *linky_info*.

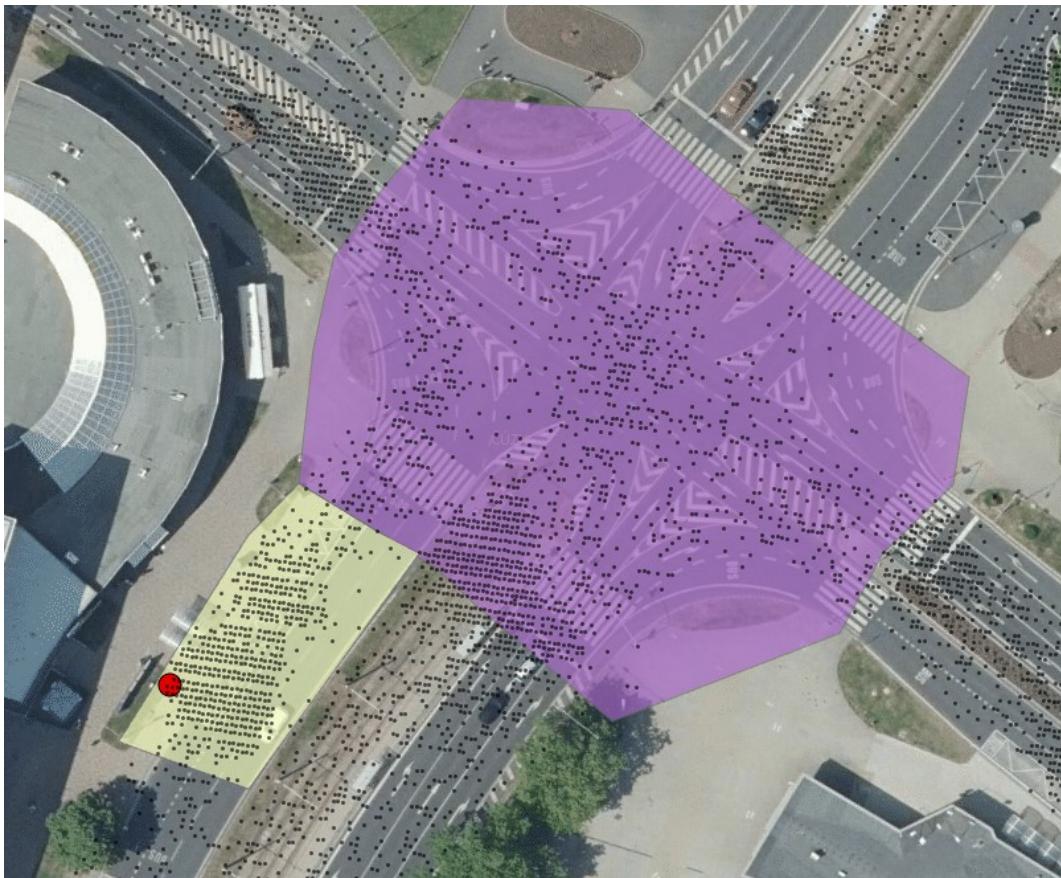
Hodnota	Datový typ
ID příslušného sloupku	Text string
Příjezd linky přes křižovatku	Boolean
Střední doba čekání na semaforu	Integer

Tabulka zona_zastavky

Tabulka nesoucí geometrii polygonů reprezentujících zónu v okolí každého odjezdového sloupku. Body z tabulky *zaznamy_polohy_ocisteno* nacházející se v této zóně jsou považovány za záznamy vozidla stojícího v zastávce. Jedná se tvarem přibližně o obdélníky s velikostí cca 30x15 metrů. Při jejich tvorbě bylo přihlíženo ke shlukům naměřených záznamů polohy tak, aby tyto shluky byly uvnitř zóny zastávky. Jediným atributem je SLOUPEK_ID, který vyjadřuje příslušnost zóny k odpovídajícímu odjezdovému sloupku. Ukázková situace je znázorněna obrázkem 22. Tabulky *zona_zastavky_prior* a *zona_zastavky_litvinov* jsou uloženy v přiložené geodatabázi *MostMHD_10_23.gdb*.

Tabulka *zona za semaforem*

Tabulka nesoucí geometrii polygonů reprezentujících zónu mezi semaforem a každým odjezdovým sloupkem. Body z tabulky *zaznamy_poloxy_ocisteno* nacházející se v této zóně jsou považovány za záznamy vozidla projíždějícího oblastí křižovatky, či nacházejícího se již za křižovatkou. Zóna je zakončena před vodorovným dopravním značením označujícím místo čekání vozidel na semafory. Protože na zastávku mohou teoreticky přijíždět vozidla ze všech směrů, je zóna v tomto místě ohraničena ve všech příjezdových směrech. Naopak na rameni křižovatky u příslušného odjezdového sloupku je prodloužena tak, aby přímo navazovala na zónu zastávky. Křižovatka řízená semaforem se nachází pouze na CPU v Mostě, v Litvínově tedy tato tabulka není v postupu využita. Ukázková situace je znázorněna obrázkem 22. Zóna za semaforem je znázorněna fialově, zóna zastávky žlutě. Červený bod reprezentuje zastávku, černé body záznamy polohy. Polygonová vrstva *zona za semaforem* je uložena v přiložené geodatabázi *MostMHD_10_23.gdb*.



Obrázek 22: Zóna zastávky (žlutě) a zóna “za semaforem” (fialově).

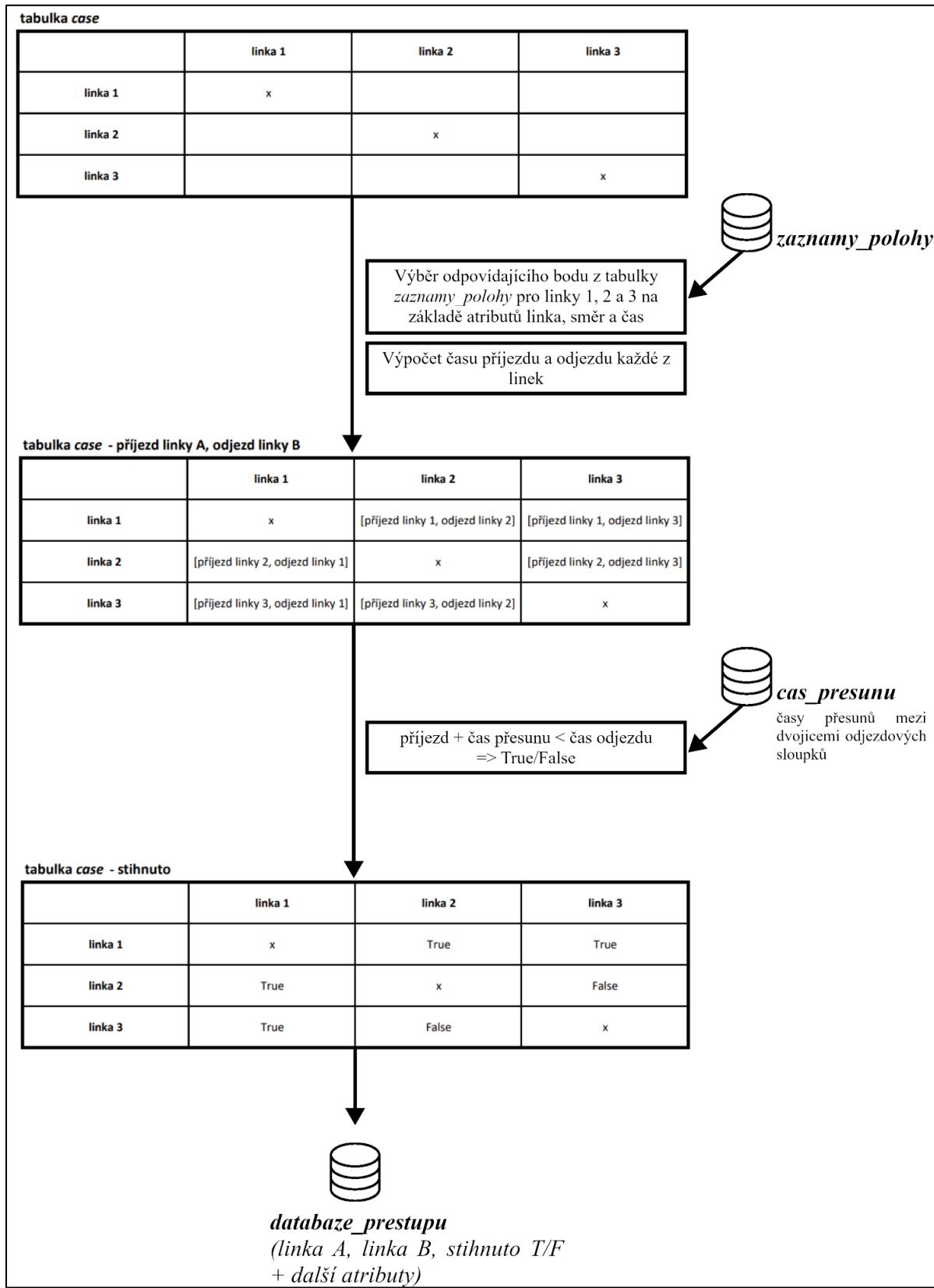
Vlastní postup

V rozjezdovém čase se na CPU sjíždí několik linek, zpravidla ale ne všechny linky jedoucí do všech směrů. Tabulka všech linek (a jejich směrů), mezi nimiž je v daný rozjezdový čas možné realizovat přestup, je nazvána jako případová tabulka *case*. Ke každé tabulce *case* se váže také seznam časů, ve kterých se dané linky sjíždějí do CPU. Pro daný případový čas je možné ke každé lince (a jejímu směru) v tabulce *case* vybrat z datasetu *zaznamy_polohy_ocisteno* bod, na základě kterého bude odhadován čas příjezdu linky do zastávky.

Časy rozjezdů začínají v pracovní dny až po 19.30, a tak je navíc nutné rozlišovat případové tabulky *case* pro pracovní dny a pro víkendy.

Bod z tabulky *zaznamy_polohy_ocisteno* je vybrán z podmnožiny bodů vzdálených nanejvýš 3 000 metrů od CPU. Bod musí příslušet odpovídající lince v odpovídajícím směru (tzn. atributy LINKA a CILOVA_ZASTAVKA) a být zaznamenán v čase *T*. Čas *T* je časem plánovaného příjezdu spoje do CPU, nebo nejbližším dřívějším časem z množiny záznamových časů (minutové záznamové časy jsou vyjmenovány v kapitole 3.1.1). Ve více než 95 % případů tato kombinace prostorové a atributové selekce dostačuje k tomu, aby byl vybrán pouze jeden bod. V některých případech (nejčastěji u linek okružních a polookružních, které přes CPU projíždějí v obou směrech) ale může být bodů nalezeno více, proto je z takto nalezených bodů vždy vybrán ten, který se nachází nejblíže k CPU. Za tímto účelem je dříve v běhu programu k záznamům polohy připojen atribut *vzdalenost_krizovatka* nesoucí informaci o vzdálenosti záznamu od CPU (vypočtena byla funkcí *near*). Způsob výběru bodu a s ním spojené komplikace jsou podrobněji popsány v diskusi. Na základě takto vybraného bodu je nejen kalkulován předpokládaný čas příjezdu linky do zastávky, ale také předpokládaný čas odjezdu, a sice dle plánovaného času odjezdu a odhadovaného času příjezdu. Přesný postup výpočtu časů příjezdu a odjezdu je popsán níže.

Po vypočtení časů příjezdu a odjezdu je tato dvojice časů uložena do tabulky *case* (ve schématu na obrázku 23 je výsledná tabulka označena jako tabulka *case - příjezd linky A, odjezd linky B*). Příjezd se týká linky, ze které je přestupováno (linka A), odjezd se týká linky, na kterou je přestupováno (linka B). Taková tabulka je poté propojena s údajem z tabulky *cas_presunu* o časové délce přesunu mezi odjezdovým sloupkem linky A a odjezdovým sloupkem linky B. Součet příjezdového času linky A a časové délky přesunu je porovnán s časem odjezdu linky B. V případě, že je součet menší nebo roven odjezdovému času, je do tabulky *case* doplněna na příslušnou pozici hodnota True – tedy přestup bylo možné stihnout. V opačném případě je do tabulky zanesena hodnota False. Vzniká tak tabulka ve schématu na obrázku 23 označena jako *case - stihnuto*.



Obrázek 23: Schéma tvorby databáze přestupů.

S využitím atributů tabulky označené jako *case - stihnutu* je vytvořena výsledná tabulka *databaze_prestupu*, ve které jsou k atributům linka A, linka B a informaci o stíhnutí přestupu doplněny i další údaje získané v průběhu výpočtu. Kompletní výčet položek uložených v každém záznamu je uveden v tabulce 10.

Tabulka 10: Položky záznamů tabulky *databaze_prestupu*.

Položka	Popis položky	Datový typ
Případ (case)	Označení unikátní sjezdové kombinace dvojic linek (<i>linka_smer</i>). Číslováno jako <i>case1-case32</i>	Text string
Linka A	Číslo linky A	Integer
Linka a směr A	Uspořádaná dvojice či trojice <i>linka_smer</i> linky A	Tuple
Linka B	Číslo linky B	Integer
Linka a směr B	Uspořádaná dvojice či trojice <i>linka_smer</i> linky B	Tuple
Rozjezdový čas a datum	Čas a datum ve kterém linky (většina linek) dle jízdního rádu odjíždějí z CPU	Date Time
Čas příjezdu linky A	Čas a datum příjezdu linky A	Date Time
Čas odjezdu linky B	Čas a datum odjezdu linky B	Date Time
Délka přesunu	Střední časová délka přesunu mezi dvojicí odpovídajících odjezdových sloupků v sekundách	Double
Stihnutý přestup	Informace, zda přestup teoreticky byl stihnut	Boolean
O kolik ne/stihnutu	Rozdíl mezi Časem příjezdu linky A + Délkou přesunu a Časem odjezdu linky B uvedený v sekundách. V případě nestihnutí přestupu jde o zápornou hodnotu.	Double
Centrální přestupní uzel	“PRIOR”, nebo “Litvínov”	Text string

Čas příjezdu

Výpočet času příjezdu na základě záznamu polohy z tabulky *zaznamy_polohy_ocisteno* probíhá několika možnými způsoby. Který způsob výpočtu odhadovaného času příjezdu spoje do zastávky bude zvolen, záleží na tom, kde vybraný záznam polohy leží. Bod záznamu byl naměřen v okamžík předpokládaného

času příjezdu spoje do zastávky, nebo jednotky minut před tímto okamžikem (záleží na tom, pro kterou minutu jsou data dostupná). Proto lze předpokládat, že se nenachází za zastávkou.

Zážnam se může nacházet:

- A. již přímo v zóně zastávky

V tomto případě je za okamžik příjezdu vozidla považován čas zážnamu, tedy:

$$T_{\text{příjezdu}} = T_{\text{zážnamu}}$$

Ačkoliv vozidlo mohlo do zastávky přijet i dříve a v zastávce v okamžik zážnamu již stálo, označením okamžiku zážnamu bodu za čas příjezdu nebude ovlivněno posouzení ne/stihnutí přestupu, protože na přestup byl při případném dřívějším příjezdu potenciálně delší čas.

- B. mimo zónu zastávky a zároveň má projíždět k odjezdovému sloupku přes semafory řízenou křižovatkou, přičemž se nachází:

- a. v zóně za semaforem (tj. mezi semaforem a zónou zastávky)

V tomto případě je čas příjezdu odhadován jako součet času zážnamu a doby nutné pro překonání vzdálenosti mezi bodem zážnamu a odpovídajícím odjezdovým sloupkem, tedy:

$$T_{\text{příjezdu}} = T_{\text{zážnamu}} + t_{\text{jízdy ke sloupku}}$$

- b. před semaforem

V tomto případě je čas příjezdu odhadován jako součet času zážnamu, doby nutné pro překonání vzdálenosti mezi bodem zážnamu a středem křižovatky, střední dobou čekání na semaforu (ta je uložena v *linky_info*) a doby nutné pro překonání vzdálenosti mezi bodem zážnamu a odpovídajícím odjezdovým sloupkem, tedy:

$$T_{\text{příjezdu}} = T_{\text{zážnamu}} + t_{\text{jízdy na křižovatku}} + t_{\text{čekání na semaforu}} + t_{\text{jízdy ke sloupku}}$$

Doba čekání na semaforu byla naměřena přímo na křižovatce u obchodního domu PRIOR.

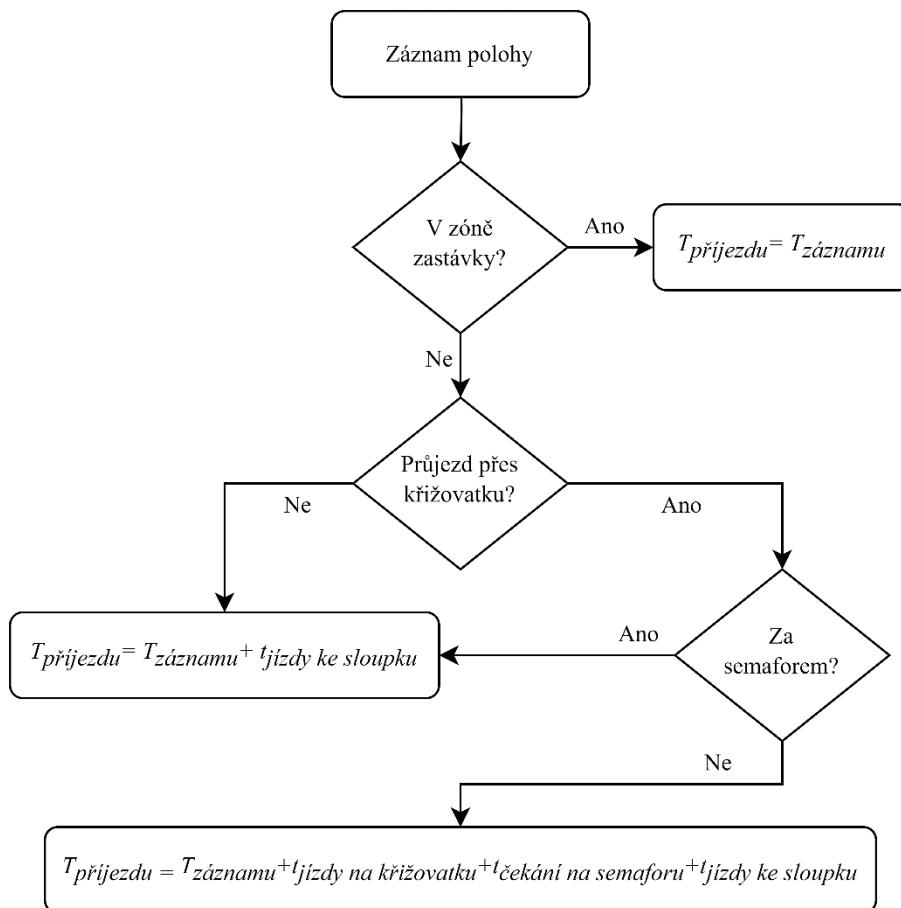
C. mimo zónu zastávky a neprojíždí k odjezdovému sloupu přes semafory řízenou křižovatkou

V tomto případě je postup výpočtu shodný se situací, kdy je vozidlo v zóně za semaforem – čas příjezdu je odhadován jako součet času záznamu a doby nutné pro překonání vzdálenosti mezi bodem záznamu a odpovídajícím odjezdovým sloupkem, tedy:

$$T_{\text{příjezdu}} = T_{\text{záznamu}} + t_{\text{jízdy ke sloupku}}$$

Doba jízdy potřebná pro překonání vzdálenosti mezi dvěma body je zjednodušeně počítána pro konstantní rychlosť 6,38 m/s (tj. 23 km/h), což je průměrná rychlosť zaznamenaná ve všech záznamech nacházejících se ve vzdálenosti do 1,5 km od CPU v Mostě.

Na litvínovském CPU se nenachází světelná křižovatka, varianta B zde tedy nikdy nenastává. Větvení variant výpočtu času příjezdu přehledně znázorňuje schéma na obrázku 24 níže.



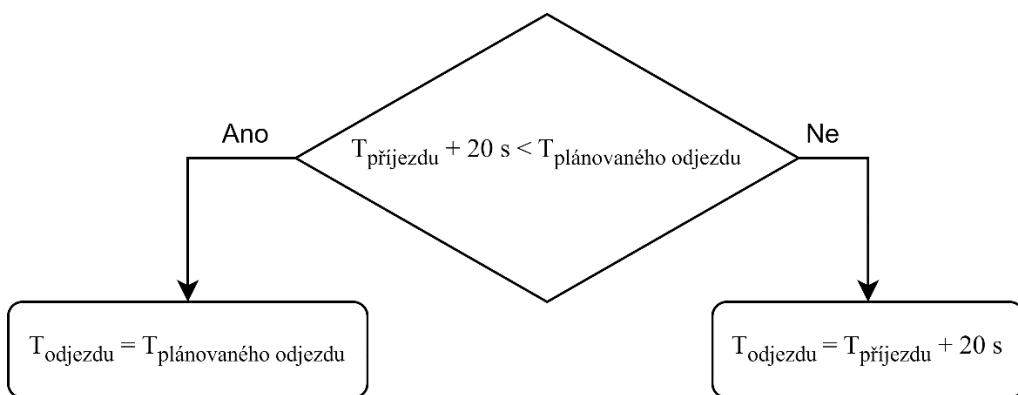
Obrázek 24: Schéma variant výpočtu času příjezdu.

Situace, která dosud nebyla popsána, nastane ve chvíli, kdy není nalezen žádný bod v tabulce *zaznamy_polohy_ocisteno*, který by splňoval výše uvedené podmínky výběru. V takovém případě lze předpokládat, že spoj se nachází ve vzdálenosti vyšší než 3 000 metrů od CPU, případně, že z důvodu mimořádnosti vůbec nevyjel. Z důvodu toho, že vzdálenost 3 000 metrů je měřena vzdušnou čarou, vozidlo musí k zastávce překonat většinou více než 3 000 metrů. V takovém případě, dle zvolené metodiky výpočtu doby potřebné k dojezdu vozidla do zastávky, bude zpoždění vždy vyšší než 5,5 minuty. Tak velké zpoždění vzhledem k časům záznamů vždy vede k tomu, že spoj přijede do CPU později, než je rozjezd ostatních spojů. Pro pokrytí této výjimky je pro tento případ čas příjezdu nastaven na 23:59:59. Tím je zajištěno, že všechny přestupy z tohoto spoje budou vyhodnoceny jako nestihnuté a přestupy na tento spoj jako stihnuté.

Čas odjezdu

Předpokládaný čas odjezdu je predikován na základě odhadnutého času příjezdu a plánovaného odjezdu. Je předpokládáno, že pokud spoj přijede do CPU včas, čas jeho odjezdu bude odpovídat plánovanému času odjezdu dle jízdního řádu. V potaz je nutné brát také čas pro nástup a výstup cestujících, který byl stanoven na spodní okraj jeho možného trvání, na 20 sekund.

Pokud čas příjezdu v součtu s těmito 20 vteřinami nepřesahuje plánovaný čas odjezdu, je za čas odjezdu prohlášen plánovaný čas odjezdu. Je-li ale tento součet vyšší, je za čas odjezdu považován právě čas příjezdu navýšený o 20 sekund. Situace je znázorněna také schématem na obrázku 25 níže.



Obrázek 25: Schéma výpočtu času odjezdu.

Stejně jako v případě času příjezdu, i v kalkulaci času odjezdu figuruje výjimka pro velmi zpožděné spoje, to jsou ty spoje, kterým byl čas příjezdu nastaven na 23:59:59. Stejný čas je v takovém případě nastaven i jako čas odjezdu.

Doba přesunu

V postupu je operováno s dobou přesunu cestujícího mezi odjezdovými sloupky. Tato doba byla experimentálně měřena na přestupních uzlech za využití svižné chůze, která odpovídala rychlosti přibližně 5,5 km/h, což odpovídá průměrné rychlosti chodců přesunujících se po rovném úseku na hlavním nádraží v Praze (Sodomková 2017), jelikož v obou CPU probíhá přestup cestujících po rovině, lze považovat tuto rychlosť za odpovídající.

V případě CPU v Mostě je doba přesunu ovlivněna také délkou čekání cestujícího na semaforu (případně semaforech) pro pěší. Délka intervalu semaforů, která se liší pro každý přestupový směr, byla na křižovatce naměřena. Polovina maximální možné doby čekání na zelenou je označena za střední dobu čekání na semaforu. Střední doba čekání na semaforu je přičtena k čisté době přesunu mezi odjezdovými sloupky. Na litvínovské CPU se semafory nenacházejí, a tak tento krok tedy nebyl proveden.

Celý postup je implementován jako dva samostatné skripty, pod názvy *prestupy_most.py* a *prestupy_litvinov.py*, které jsou dostupné jako příloha této práce. Výsledkem jsou soubory *databaze_prestupu_most.csv* a *databaze_prestupu_litvinov.csv*. Tyto soubory jsou také přílohou této práce. Pro zjednodušení implementace analýzy jsou v geodatabázi *MostMHD_10_23.gdb* uložené také Feature Classes *zastavky_prior* a *zastavky_most*, které obsahují odjezdové sloupky daných CPU vyfiltrované z tabulky *zastavky_orig*.

Některé přestupy mezi sjízdějícími se linkami zobrazenými na schématice od Dopravního podniku (obrázky 19 a 20) dle jízdního řádu možné jsou, ale prakticky je jistější realizovat je na dřívější zastávce. K této situaci dochází v případech, kdy pro spoj, ze kterého je přestupováno, se jedná o zastávku předcházející CPU a pro spoj, na který je přestupováno, jde o zastávku následující po CPU. Do csv souborů s výsledky byl přidán booleovský atribut *smysluplnost*, který nabývá hodnoty 0 pokud dochází právě k takové situaci, kdy je konkrétní přestup možné realizovat na dřívější zastávce s vyšší časovou rezervou.

3.6.3 Výsledky

Ve statistikách pro CPU Litvínov byly vynechány přestupní vazby z linky 4 ve směru *Litvínov, Citadela* na linku 14 ve směru *Horní Jiřetín, pekařství* a z obou směrů linky 13 na linku 4 ve směru *Most, Dopravní*

podnik. Tyto přestupy dle jízdního rádu teoreticky nejsou možné (spoje přijíždějí a odjíždějí ve stejný čas). Ve skutečnosti jsou tyto přestupní vazby někdy realizovatelné (přijíždějící linky typicky přijedou dříve), proto jsou zachovány ve statistikách spolehlivosti přestupních vazeb konkrétních kombinací linek, ale v ostatních statistikách jsou zanedbány. Stejně bylo naloženo i s přestupy realizovatelnými na dřívější zastávce (tzn. atribut *smysluplnost* je roven 0).

Ve výsledcích jsou, především v grafických prvcích zjednodušovány názvy zastávek, dle kterých je určován směr linky. U linek s alternativními konečnými zastávkami je uváděna ta nejčastější, případně poslední společná konečná stanice alternativních tras spoje.

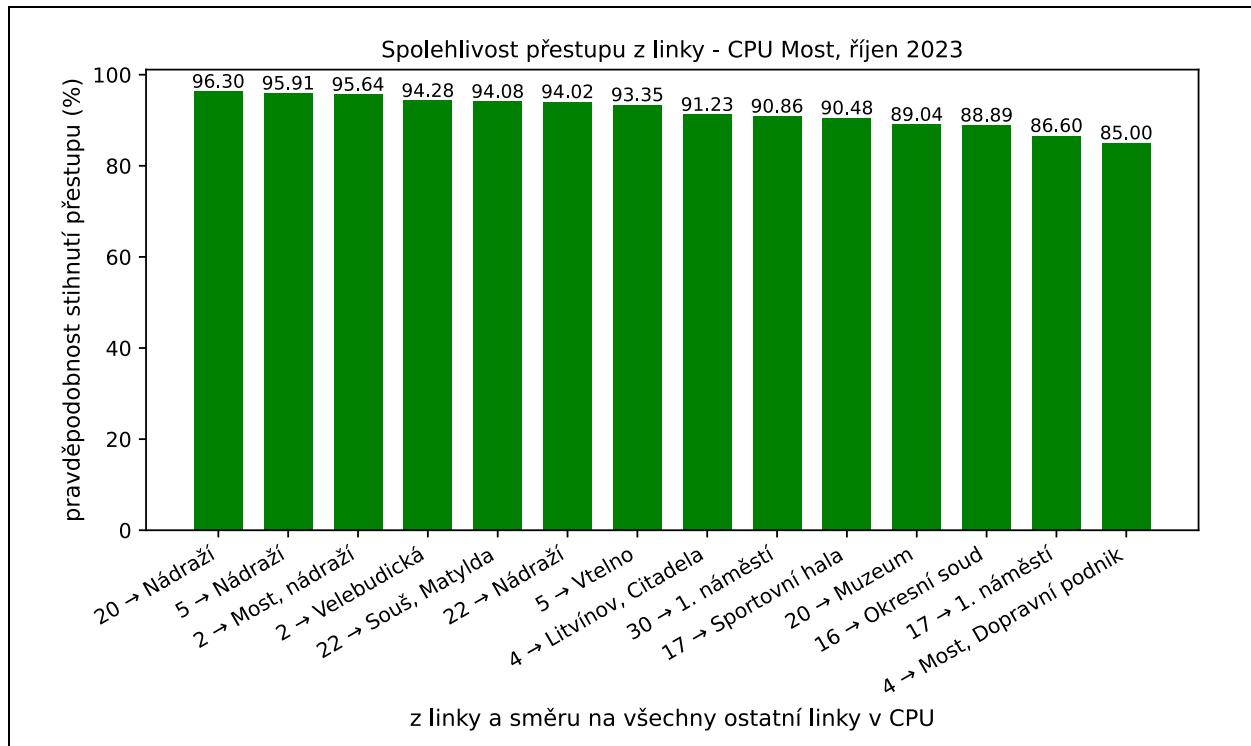
Celková spolehlivost přestupů na přestupních uzlech

Celková spolehlivost všech přestupních vazeb dosáhla na CPU v Mostě 91,44 %, na CPU v Litvínově 70,51 %. Celková spolehlivost je definována jako poměr počtu přestupů, které bylo možné stihnout, k počtu všech přestupů zachycených v datech.

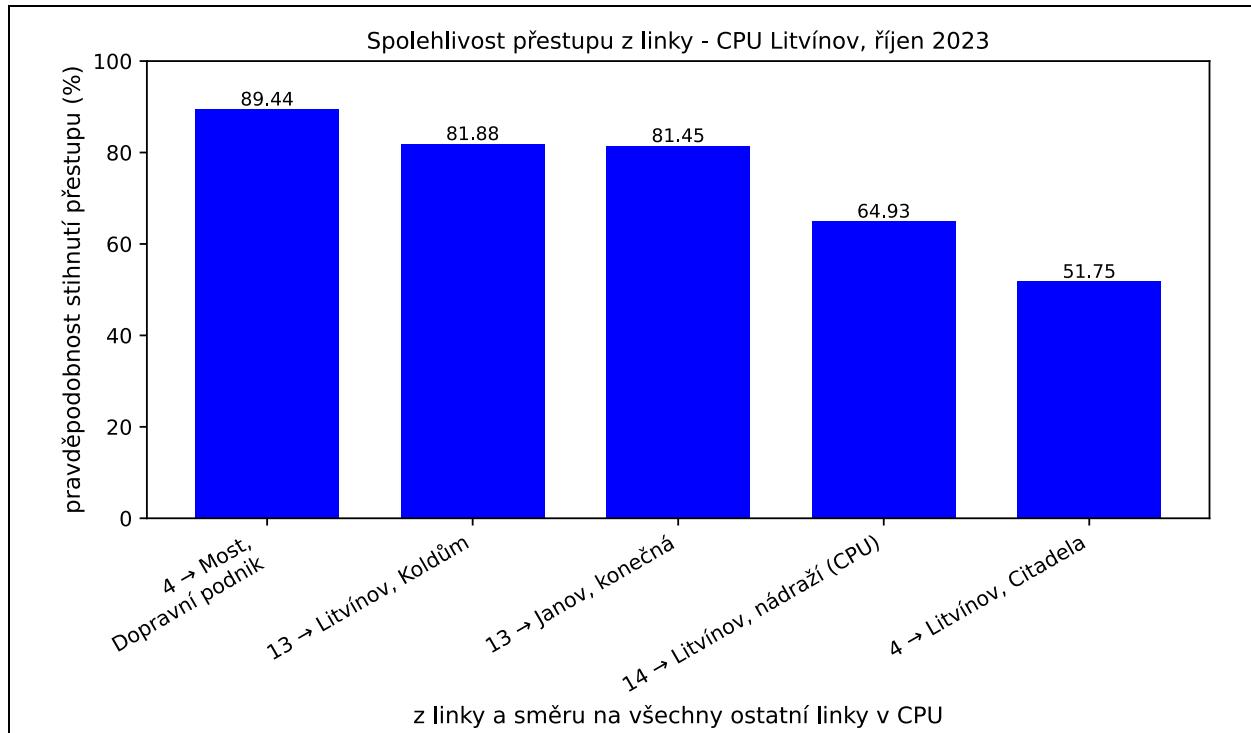
Vyšší spolehlivost vykazuje CPU v Mostě, svůj vliv ve sledovaném období jistě sehrála rekonstrukce tramvajové trati mezi oběma městy, stejně jako uzavírka ulice u Bílého sloupu, kterou na CPU v Litvínově běžně přijíždějí linky 13. Nejvýznamnějším důvodem jsou ale kratší doby na přestup mezi některými linkami na CPU v Litvínově, především z linky 4 ve směru *Litvínov, Citadela* na linky 13 v obou směrech – zde je doba na přestup dle jízdního rádu pouze 1 minuta.

Spolehlivost přestupů z jednotlivých linek

Grafy 7 a 8 prezentují spolehlivost přestupů z jednotlivých linek na všechny ostatní linky (v rámci realizovatelných přestupních vazeb). Nejvyšší spolehlivost v tomto ohledu zaznamenala na CPU v Mostě linka 20 jedoucí ve směru *Nádraží* s 96,30 % úspěšných přestupů, na CPU v Litvínově linka 4 jedoucí ve směru *Most, Dopravní podnik* s 89,44 % úspěšných přestupů. Naopak nejméně často bylo možné realizovat přestup na CPU v Mostě z linky 4 jedoucí ve směru *Most, Dopravní podnik*, a sice s rovnými 85 % úspěšnosti. Na CPU v Litvínově nabývá nejnižších hodnot spolehlivost přestupů z linky 4 jedoucí ve směru *Litvínov, Citadela* (51,75 %). Nutné je ale zmínit, že po většinu sledovaného období byla tramvajová linka 4 ovlivněna výlukou a náhradní autobusovou dopravou.



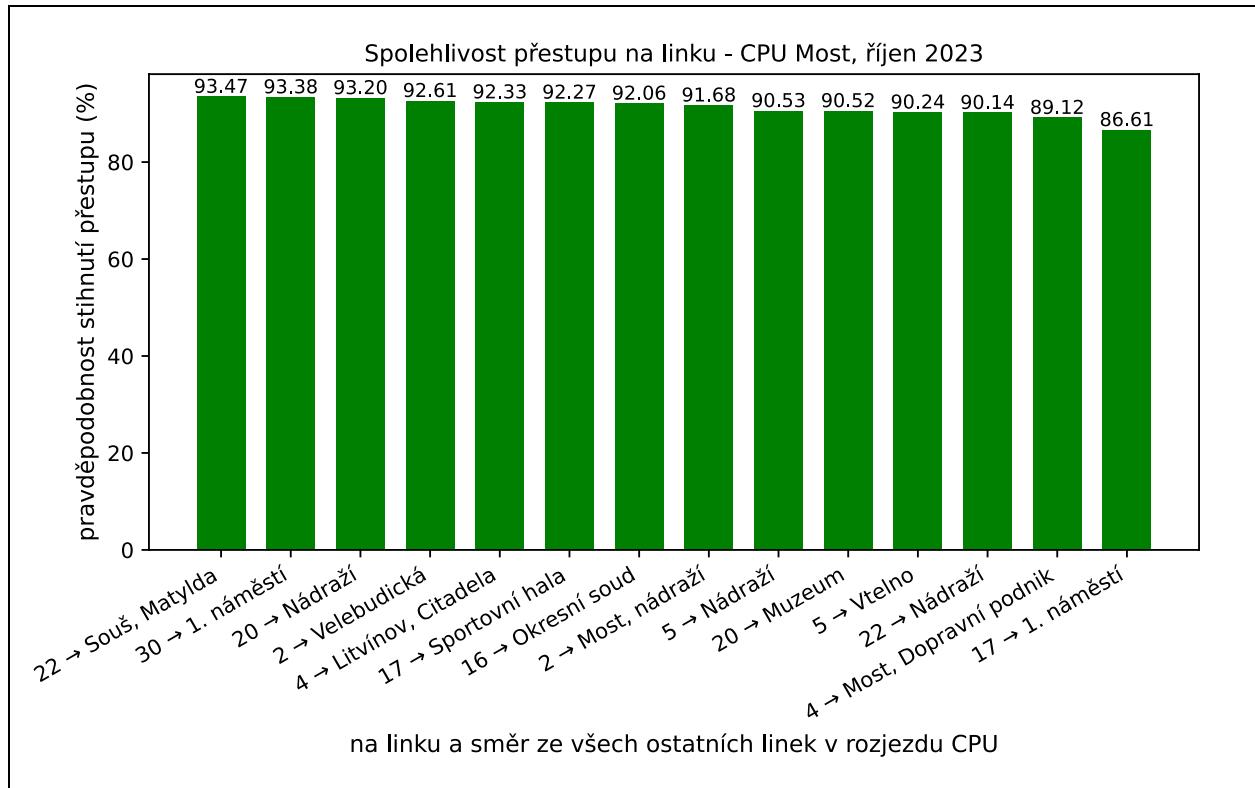
↑ Graf 7: Spolehlivost přestupu z linek a směrů v CPU Most v říjnu 2023.



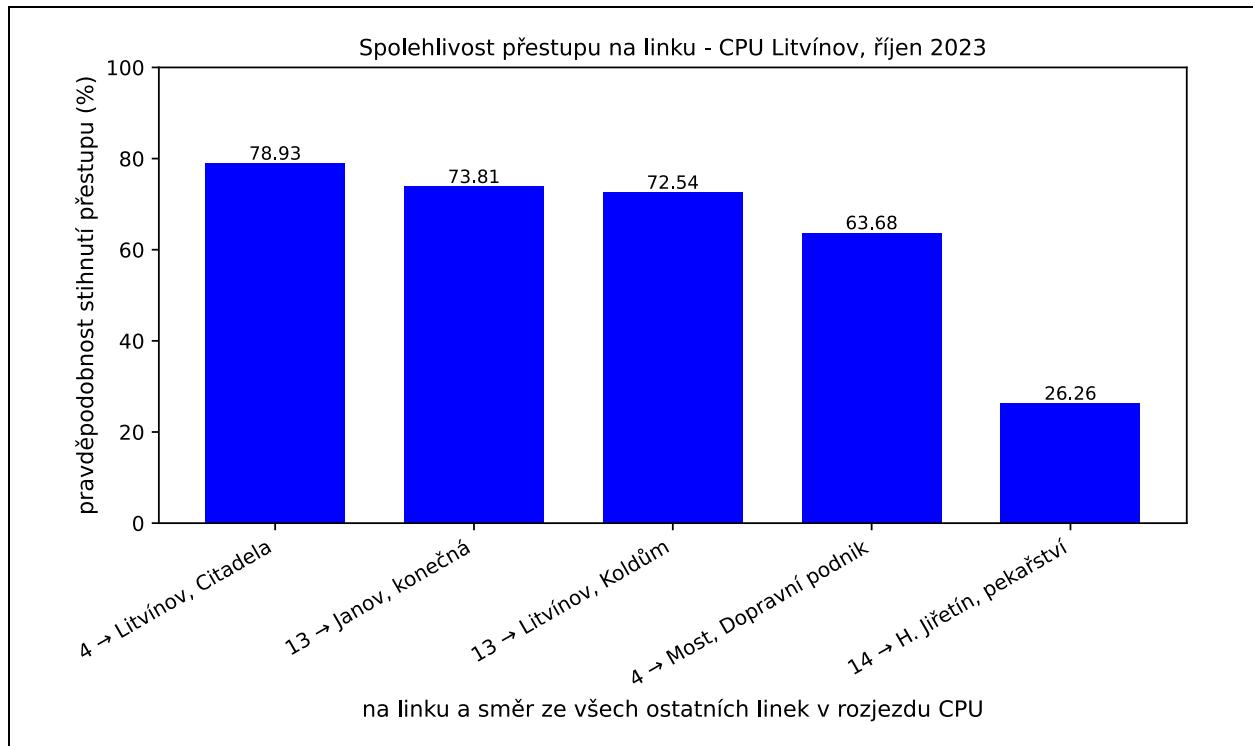
↑ Graf 8: Spolehlivost přestupu z linek a směrů v CPU Most v říjnu 2023.

Spolehlivost přestupů na jednotlivé linky

Grafy 9 a 10 prezentují spolehlivost přestupů na jednotlivé linky ze všech ostatních linek (v rámci realizovatelných přestupních vazeb). Nejvíce spolehlivý byl na CPU v Mostě přestup na linku 22 jedoucí ve směru *Souš, Matylda* s 93,47 % úspěšných přestupů, na CPU v Litvínově na linku 4 jedoucí ve směru *Litvínov, Citadela* se 78,93 % úspěšných přestupů. Naopak nejméně často bylo možné realizovat přestup na linku 17 jedoucí ve směru *1. náměstí* (86,61 %) na CPU v Mostě a na linku 14 jedoucí ve směru *Horní Jiřetín, pekařství* (26,26 %) na CPU v Litvínově.



Graf 9: Spolehlivost přestupu na linku a směr v CPU Most v říjnu 2023.



Graf 10: Spolehlivost přestupu na linku a směr v CPU Litvínov v říjnu 2023.

Spolehlivost konkrétních kombinací linek

Tabulka 11 zobrazuje procentuální spolehlivost konkrétních přestupních vazeb mezi každými dvěma možnými linkami pro CPU v Litvínově. Ze smysluplných přestupních vazeb je nejspolehlivější ta z linky 13 jedoucí ve směru *Litvínov, Koldům* na linku 4 jedoucí ve směru *Litvínov, Citadela*, spolehlivost této návaznosti je 81,88 %. Naopak nejnižší spolehlivost ze smysluplných přestupních vazeb zaznamenala ta z linky 4, jedoucí ve směru *Litvínov, Citadela*. Jde o přestup na linku 13 ve směru *Litvínov, Koldům (a dále)*, kde je spolehlivost dosáhla pouze 55,22 %. V tabulce 11 jsou zahrnuty i dle jízdního řádu nerealizovatelné, ale reálně existující přestupní vazby. Tyto hodnoty jsou v tabulce podbarveny červenou barvou. V tabulce jsou také šedou barvou zvýrazněny přestupní vazby, které sice dle jízdního řádu jsou realizovatelné, ale fakticky je pro cestujícího výhodnější vystoupit na zastávce předcházející CPU, protože bude mít více času na přestup (atribut smysluplnost je roven 0). Pro linku na, kterou bude přestupovat, je totiž v těchto případech taková zastávka první následující po CPÚ.

Tabulka 11: Spolehlivost přestupu (%) mezi linkami (z linky v řádku na linku ve sloupci) na CPU v Litvínově.

	13 → Janov, kon.	13 → L., Koldům	14 → Horní Jiřetín	4 → L., Citadela	4 → Most, DP
13 → Janov, kon.	x	x	85.47	81.45	61.72
13 → L. Koldům	x	x	78.21	81.88	62.55
14 → nádraží (CPU)	72.64	68.70	x	66.17	63.68
4 → L., Citadela	58.00	55.22	26.26	x	x

*Červeně jsou podbarveny dle jízdního řádu nerealizovatelné, ale reálně existující přestupní vazby. Šedě jsou podbarveny přestupní vazby, které je dle jízdního řádu možné realizovat, ale v praxi je výhodnější přestoupit na dřívější zastávce, kde je na přestup více času.

Stejná data pro CPU v Mostě zobrazuje tabulka 12. V Mostě je nejspolehlivější smysluplnou přestupní vazbou přestup z linky 5 jedoucí ve směru Nádraží na linku 16 jedoucí ve směru Nádraží, resp. Jezero Most s odjezdem na Okresní soud (jedná se o polokružní linku), spolehlivost této návaznosti je 99,21 %. Nejméně přestupů, z těch, které není výhodnější realizovat o zastávku dříve (podbarveny šedě), bylo naopak realizovatelných z linky 4 jedoucí ve směru Most, Dopravní podnik na linku 17 jedoucí ve směru 1. náměstí a Dopravní podnik (79,50% spolehlivost), linka 17 ale jede po zastávce 1. náměstí jinou trasou než linka 4, a tak lze považovat přestup za smysluplný

Tabulka 12: Spolehlivost přestupu (%) mezi linkami (z linky v řádku na linku ve sloupci) na CPU v Mostě.

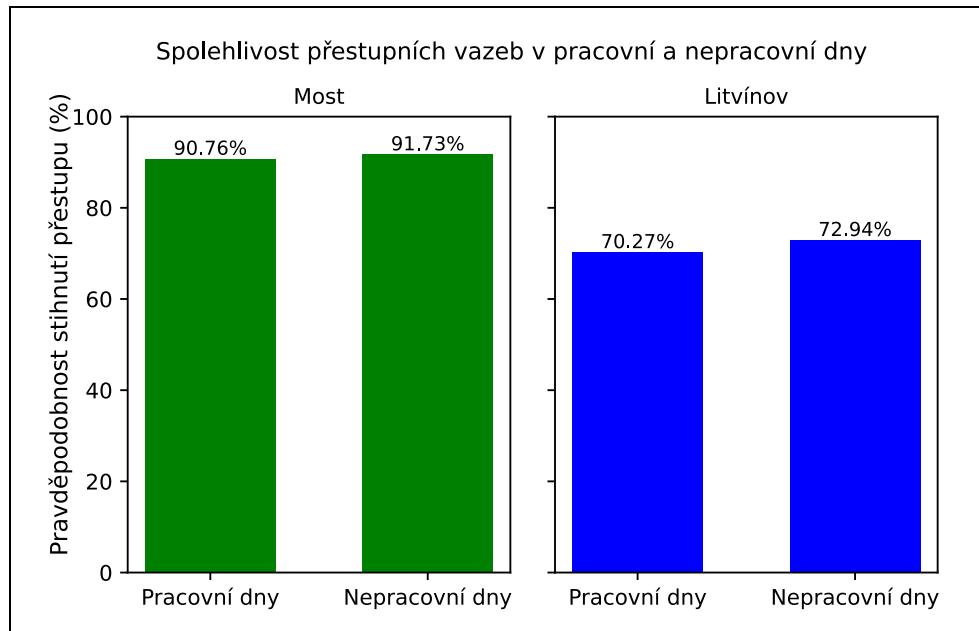
Část 1/2	16 → Okresní soud	17 → 1. náměstí	17 → Sportovní hala	2 → Most, nádraží	2 → Velebudická	20 → Nádraží	20 → Muzeum
16 → Okresní soud	x	63.49	x	84.92	x	x	x
17 → 1. náměstí	84.92	x	x	87.02	x	x	x
17 → Sportovní hala	x	x	x	x	91.04	92.40	87.67
2 → Most, nádraží	97.62	95.08	x	x	x	x	x
2 → Velebudická	x	x	95.10	x	x	95.60	94.30
20 → Nádraží	x	x	96.40	x	96.40	x	x
20 → Muzeum	x	x	88.58	x	89.91	x	x
22 → Nádraží	x	x	95.43	x	93.42	x	92.98
22 → Souš, Matylda	x	x	94.00	x	94.40	94.00	x
30 → 1. náměstí	x	x	90.19	x	90.59	91.20	90.79
4 → Litvínov, Citadela	x	x	91.47	x	91.00	92.80	89.47
4 → Most, DP	86.51	79.50	x	87.02	x	x	x
5 → Most, nádraží	99.21	95.19	x	x	x	95.75	x
5 → Vtelno	96.03	93.72	x	94.18	x	x	x

Část 2/2	22 → Nádraží	22 → Souš, Matylda	30 → 1. náměstí	4 → Litvínov, Citadela	4 → Most, DP	5 → Nádraží	5 → Ovocné sady
16 → Okresní soud	x	x	x	x	86.51	92.86	84.92
17 → 1. náměstí	x	x	x	x	85.56	86.19	88.08
17 → Sportovní hala	88.58	92.40	87.63	90.62	x	x	x
2 → Most, nádraží	x	x	x	x	95.08	95.08	95.08
2 → Velebudická	92.54	95.60	93.72	93.72	x	x	x
20 → Nádraží	x	96.00	x	96.40	x	x	x
20 → Muzeum	86.40	x	89.04	88.60	x	x	x
22 → Nádraží	x	x	93.42	93.86	x	x	x
22 → Souš, Matylda	x	x	94.00	94.00	x	x	x
30 → 1. náměstí	89.91	92.40	x	92.05	x	x	x
4 → Litvínov, Citadela	89.47	92.40	91.21	x	x	x	x
4 → Most, DP	x	x	x	x	x	87.66	87.45
5 → Nádraží	x	x	x	x	95.19	x	x
5 → Vtelno	x	x	x	x	92.68	x	x

*Sedě jsou podbarveny přestupní vazby, které je dle jízdního řádu možné realizovat, ale v praxi je výhodnější přestoupit na dřívější zastávce, kde je na přestup více času.

Spolehlivost dle pracovních/nepracovních dnů

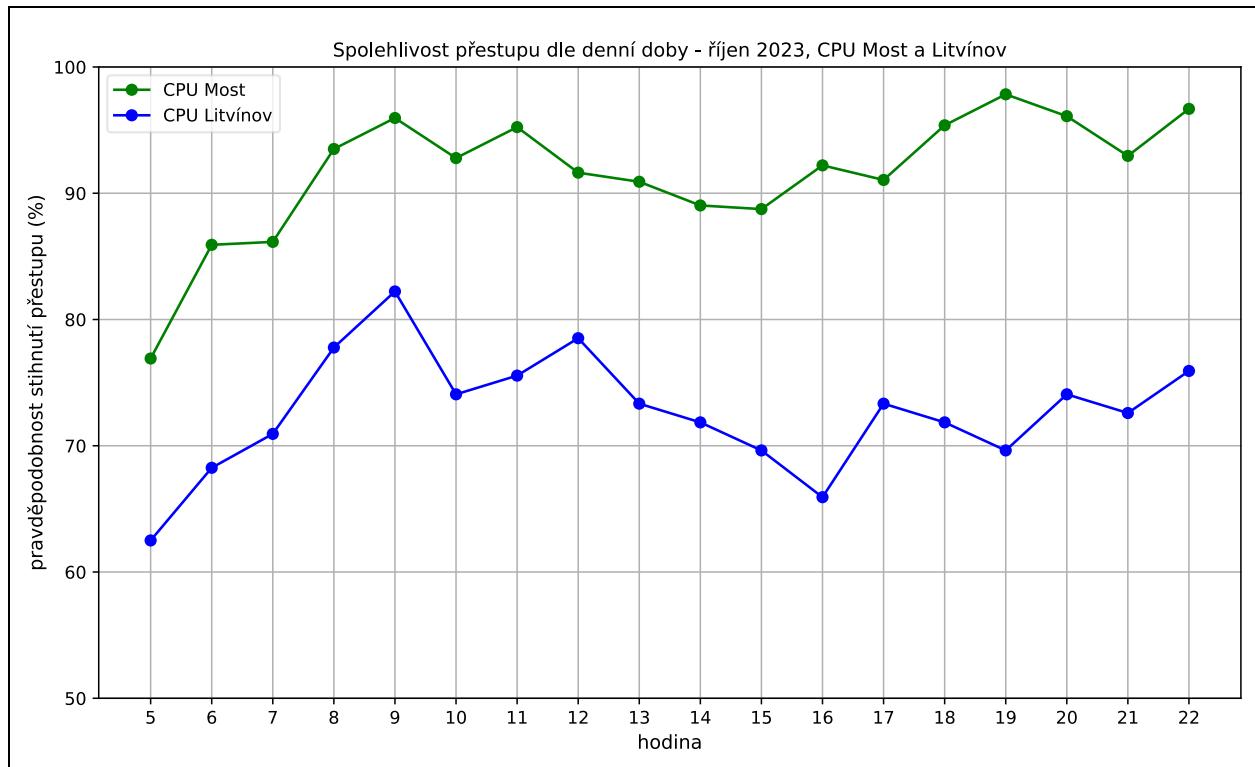
V Mostě je spolehlivost přestupních vazeb mírně vyšší v nepracovní dny, kdy dosahuje 91,73 %. V pracovní dny pak dosahuje hodnota spolehlivosti přestupů v Mostě 90,76 %. I litvínovský CPU vykazuje podobné spolehlivosti přestupů v pracovní i nepracovní dny, a sice 70,27 % respektive 72,94 %. Tyto hodnoty jsou zachyceny v grafu 11.



Graf 11: Spolehlivost přestupních vazeb na CPU v Mostě a Litvínově v říjnu 2023.

Spolehlivost v čase (v nepracovní dny)

Graf 12 zobrazuje průběh spolehlivosti přestupních vazeb v průběhu denní doby. Den byl pro účely analýzy rozdělen do intervalů po hodinách. Zpracována jsou pouze data z nepracovních dní, protože v pracovní dny CPU operují pouze ve večerních hodinách.



Graf 12: Spolehlivost přestupních vazeb dle denní doby na CPU v Mostě a Litvínově v říjnu 2023.

Oba přestupní uzly vykazují nejnižší přestupní spolehlivost v brzkých ranních hodinách, druhý propad ve spolehlivosti je viditelný v odpoledních hodinách. Naopak večer spolehlivost přestupních vazeb opět roste, v Mostě dokonce dosahuje hodnot vyšších než v brzkých ranních hodinách.

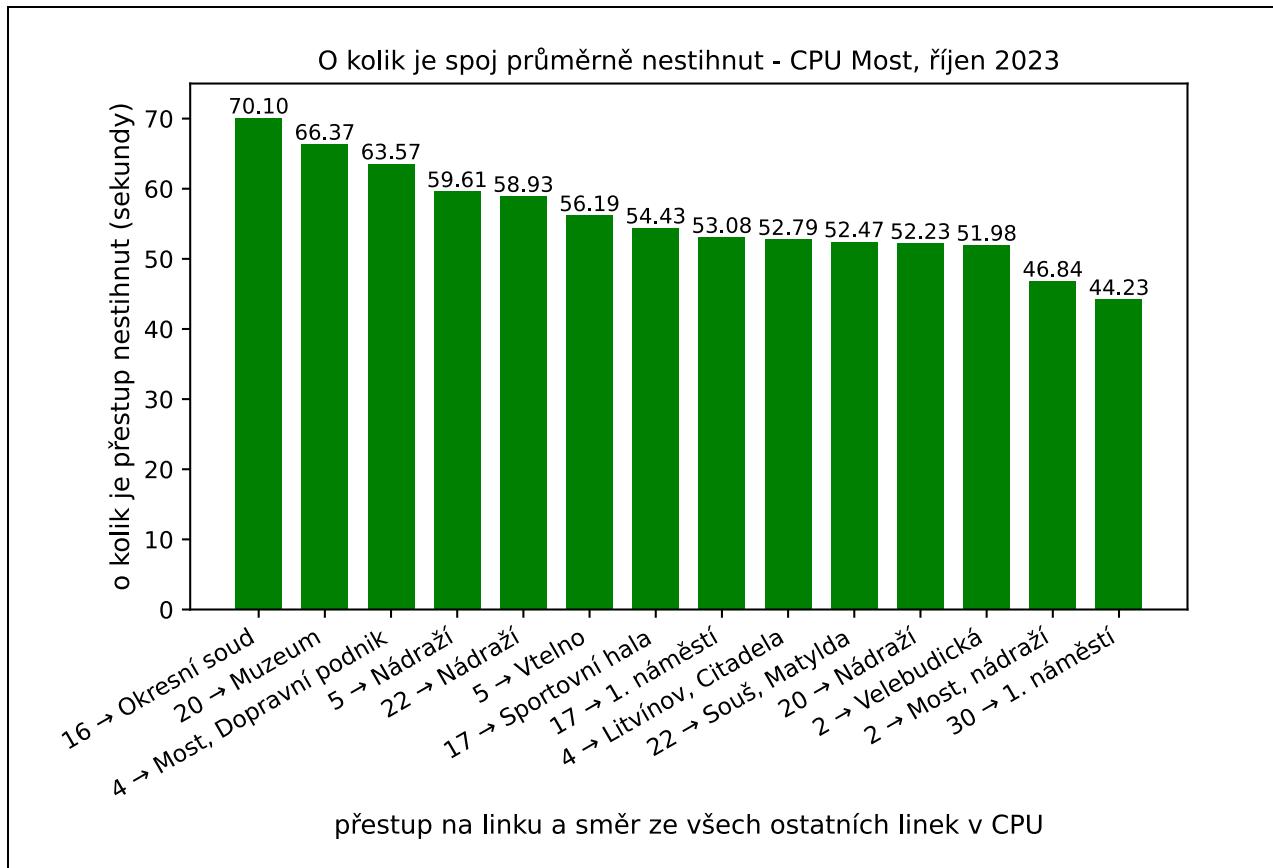
Kvantifikace nestíhání přestupů

Následující statistiky se týkají pouze záznamů nestihnutých přestupů. Cílem je zjistit o kolik byly přestupy v průměru nestihnutý. Zpracování takových statistik může být přínosné při potenciálních úpravách jízdních řádů, protože kdyby příslušný spoj odjel o uvedenou dobu později, statisticky by se měl v průměru vždy stíhat.

Při pohledu na data o tom, o kolik sekund nebyly přestupy stihnutý je důležité upozornit na fakt, že v případech, kdy byl čas příjezdu nastaven na 23:59:59, nebyla přesná informace o tom, o kolik sekund byl přestup nestihnut, zaznamenána (hodnota atributu *databaze_prestupu.o_kolik* je *None*). K této situaci došlo tehdy, když zpozdění přijíždějícího spoje bylo natolik velké, že nebylo možné najít jeho záznam ve vzdálenosti 3 000 metrů od CPU. Skutečné hodnoty průměrné doby, o kolik byl přípoj nestihnut, jsou tedy o něco vyšší, než je uvedené dále. Grafy 13 a 14, které zobrazují o kolik byly přípoje průměrně

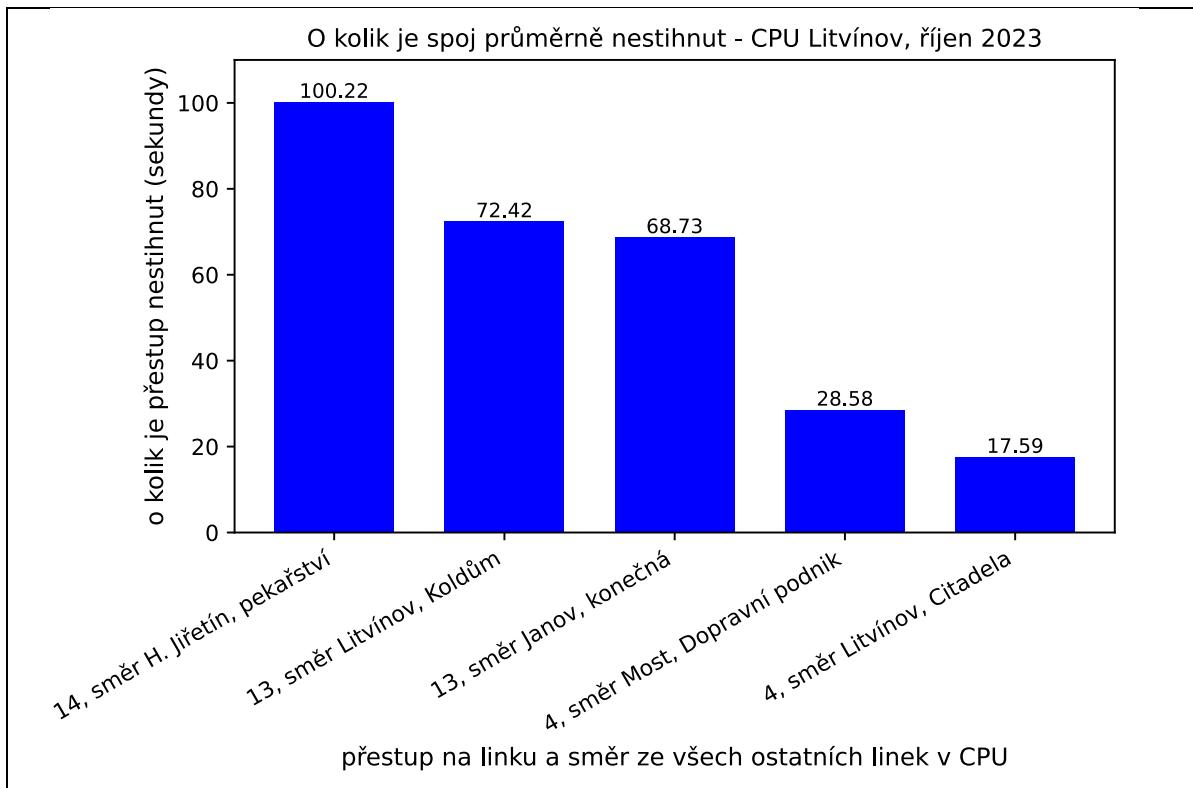
nestihnutý, je proto vhodnější využít pro porovnání přestupních vazeb mezi sebou, spíše než pro zjištění přesných hodnot průměrné doby, o kterou přestup nebyl stihnut.

Na CPU v Mostě nejvyšší průměrnou dobu, o kterou byl spoj nestihnut, vykazuje přestup na linku 16 ve směru *Nádraží, resp. Jezero Most* odjíždějící ve směru *Okresní soud* (polookružní linka) (průměrně nestihnut o 70,10 sekundy). Nejnižší spolehlivost má přestup na linku 30 ve směru *I. náměstí* (průměrně o 44,23 sekundy). Kompletní statistiky tohoto CPU jsou zobrazeny grafem 13.



Graf 13: O kolik je průměrně nestihnut navazující spoj (CPU v Mostě, říjen 2023).

Na CPU v Litvínově nejvyšší průměrnou dobu, o kolik byl spoj nestihnut, vykazuje přestup na linku 14 ve směru *Horní Jiřetín, pekařství* (průměrně o 100,22 sekundy) a nejnižší hodnotu přestup na linku 4, ve směru *Litvínov, Citadela* (průměrně nestihnuto o 17,59 sekundy). Kompletní statistiky tohoto CPU jsou zobrazeny grafem 14.



Graf 14: O kolik je průměrně nestihnut navazující spoj (CPU Litvínov, nádraží, říjen 2023).

Na získaná data by bylo možné pohlížet z mnoha dalších úhlů a analyzovat detailně jednotlivé přestupní vazby či rozjezdové časy. Za využití vytvořených dat ve formátu *csv* jsou další analýzy výsledků snadno uskutečnitelné a mohou být operativně provedeny například při predikci dopadu plánované mimořádnosti na přestupní vazby.

3.6.4 Diskuse

Pro analýzu přestupních vazeb je ve srovnání s předchozími analýzami nutné disponovat větším množstvím vstupních dat. Některá z těchto dat (zóny zastávek a zóny “za semaforem”) nesou prostorovou informaci a jejich vytvoření je specifické pro každý přestupní uzel. Tuto analýzu je tedy relativně složitější replikovat nad daty z jiných přestupních uzlů, resp. vyžaduje to specifickou přípravu dat.

Také se změnou jízdních řádů by již neplatily rozjezdové časy pro jednotlivé případy *case*. V takovou chvíli by bylo nutné upravit tabulky *case* a příslušné rozjezdové časy. Tato komplikace by teoreticky byla řešitelná detekcí rozjezdových časů ze strojově čitelných jízdních řádů, pokud by byly dostupné.

Stanovení zón zastávek by se ve zjednodušené podobě také dalo zautomatizovat, například vytvořením bufferu okolo odjezdového sloupku. Při individuálním posouzení a vymezení zóny zastávky jsou ale lépe pokryty shluky bodů očividně spadající k danému odjezdovému sloupku. Tyto shluky mohou být mírně posunuté oproti předpokládané pozici záznamů, typicky z důvodu opakující se chyby měření GNSS, například z důvodu umístění odjezdového sloupku v blízkosti vysokých budov.

Čas příjezdu a odjezdu

Správný výběr záznamu polohy, na základě kterého je čas příjezdu vozidla do zastávky vypočítán, je pro další postup velmi důležitý. Při zpracování dat nastaly případy, kdy úvodní filtrace pomocí linky, směru a času záznamu generovala více než jeden záznam polohy vozidla. K této situaci docházelo pouze v Mostě, kde se jednalo o 698 z 20 808 záznamů (tj. 3,35 %). Nejčastěji šlo o záznamy linky 30, která je polookružní a zajíždí od CPU na krátký okruh ve směru do zastávky *Nemocnice*, aby se po 10 minutách vrátila zpět do CPU a pokračovala směrem na *1. náměstí*. Navíc jde o frekventovanou linku, která jezdí častěji než pouze v uvedené rozjezdové časy.

Nejprve byl testován výběr na základě azimutu pohybu vozidla (atribut *zaznamy_polohy_ocisteno.AZIMUT*), který byl srovnáván s azimutem vozidla přijíždějícího ze správného směru. Tento postup by fungoval, pokud by se hledané záznamy nacházely pouze v poslední ulici, kterou přijíždějí k CPU. Jelikož se ale vozidla mohou v okamžik záznamu nacházet i v předcházejících, jinak orientovaných ulicích, filtrace pouze pomocí azimutu není funkční.

Pro funkčnost azimutové filtrace by bylo nutné vytvořit tabulku, ve které by byly uloženy geometrie polygonů obklopujících úseky trasy linky, kde by ke každému takovému úseku byla také uložena informace o směru k CPU. Poté by bylo možné každý záznam polohy přiřadit k polygonu a porovnat azimut směru k CPU s azimutem záznamu polohy.

Z důvodu složitosti tvorby takové tabulky pro výběr na základě azimutu byla nejdříve testována selekce na základě prosté vzdálenosti bodu od CPU, kdy byl vybíráno bod nejbliže k CPU. Tato metoda se ukázala jako funkční a také byla aplikována. Navíc je výpočetně jednodušší než výběr na základě azimutu.

Čas příjezdu také kalkuluje s proměnnou doby čekání na semaforu. Interval semaforu se ale mění v průběhu denní doby a je jiný o víkendech a v pracovních dnech. V pozdějších večerních hodinách jsou semafory dokonce vypnuty a platí standardní dopravní značení – ulice Josefa Skupy a Moskevská jsou hlavní silnicí, třída Budovatelů pak vedlejší komunikací. Snaha získat od města Most přesný rozpis intervalů semaforu nebyla úspěšná, a tak je v této práci kalkulováno s průměrnými hodnotami. Na výsledky by toto zjednodušení teoreticky nemělo mít velký vliv, protože je operováno s desítkami tisíc záznamů a cílem

je souhrnná statistika, nikoliv řešení konkrétních případů. V případě, že by taková data byla k dispozici, bylo by možné vytvořit tabulku, která by dle dne v týdnu a denní doby přiřazovala odpovídající střední dobu čekání na semaforu, která by nahradila nyní uvažovanou konstantní hodnotu. Zvolená metoda tak přináší z hlediska stíhání přestupů spíše pesimističtější výsledky, jelikož reálná doba čekání na křižovatce může být často nižší.

Důležitou proměnnou je dále rychlosť pohybu vozidel, na základě které je dopočítáno, za jakou dobu vozidlo překoná vzdálenost zbývající k zastávce. Kalkulováno je s průměrnou rychlosťí zaznamenanou v tabulce *zaznamy_polohy_ocisteno* u záznamů vzdálených nanejvýš 3 000 metrů od CPU. Obecně je odhad průměrné rychlosťi problematický, protože záleží na tom, zda vozidlo bude ještě před příjezdem do CPU zastavovat v jiné zastávce, na intenzitě provozu (byť uzly fungují mimo špičky) a obecně i na tom, kudy vozidlo k CPU přijíždí. Pro zpřesnění rychlosťi pohybu vozidel by bylo nezbytné měřit reálná data z provozu, ideálně v různé denní doby, a tyto rychlosťi poté z vytvořené tabulky dosazovat do výpočtu.

Výpočet je dále zjednodušen tím, že je délka přesunu počítána na základě vzdálenosti vzdušnou čarou, což není vhodné pro vzdálenější záznamy polohy. Vozidla totiž z takového místa nejdou po trajektorii blížící se nejkratší spojnici dvou bodů, ale přesouvají se uliční síti po trase linky, která se může od takové spojnice výrazně vzdalovat. Řešením by mohlo být přichycení bodu na nejbližší linii z tabulky *linky* a následný výpočet vzdálenosti do CPU pomocí síťové analýzy.

Zkoumána byla také doba, kterou zabere přenos informace z vozidla do dispečerského systému a do databáze uložených záznamů (tj. do tabulky *zaznamy_polohy*). Atribut *zaznamy_polohy.TIME_DATE* totiž reprezentuje čas uložení záznamu – k reálnému odeslání polohy z vozidla došlo dříve. Vztah mezi těmito časy tedy je:

$$T_{zaznamy_{polohy}} = T_{reálný} + t_{přenosu}$$

Na základě pozorování v terénu a porovnávání reálné polohy vozidla s polohou zobrazenou webovou aplikací *Poloha vozidel MHD měst Mostu a Litvínova* bylo zjištěno, že doba přenosu dat do systému je kratší než 5 sekund, a čas záznamu tedy téměř odpovídá času odeslání polohy z vozidla. To neznamená, že jsou k dispozici polohy vozidel každých 5 sekund, ale že žádná ze zaznamenaných poloh není reálně starší než 5 sekund. Tato odchylka byla v postupu zanedbána, pokud by byla zohledněna, vedla by k vyšší výsledné spolehlivosti přestupních vazeb, protože časy příjezdů vozidel by byly o jednotky sekund dříve. Komplikací při porovnávání reálné polohy vozidla a polohy zobrazené webovou aplikací byla obnovovací

frekvence webové aplikace, která je přibližně 20 sekund. Porovnávána tedy byla pozice vozidla vždy v okamžik obnovení webové aplikace.

Doba přesunu

Podobně jako při kalkulaci času příjezdu vozidla do zastávky, i v případě doby přesunu cestujícího mezi odjezdovými sloupky hraje důležitou roli doba čekání cestujícího na semaforu (případně semaforech, pokud se přesouvá přes dvě ramena křižovatky). Doba čekání na semaforu byla měřena v pracovní den v podvečerních hodinách. I zde se ale interval semaforu mění v průběhu denní doby a je jiný o víkendech a v pracovních dnech. V době psaní této práce nebylo disponováno informacemi o časových změnách v intervalech semaforů, i když se je autor snažil získat. V případě, že by taková data byla k dispozici, bylo by možné vytvořit tabulku, která by dle dne v týdnu a denní doby přiřazovala odpovídající střední dobu čekání na semaforu, která by nahradila nyní uvažovanou konstantní hodnotu.

Čas přesunu byl měřen pro průměrného cestujícího pohybujícího se svižnou chůzí (rychlostí přibližně 5,5 km/h). Jde tedy o dobu přesunu zdravého člověka, který vynakládá aktivní úsilí navazující spoj stihnout. Hromadnou dopravou ale cestují i osoby s omezenou schopností pohybu nebo orientace. Těmi jsou osoby s pohybovým, zrakovým, sluchovým či mentálním postižením, osoby pokročilého věku, těhotné ženy, osoby doprovázející dítě v kočárku nebo dítě do tří let věku (Vyhláška 398/2009 Sb.). U takových osob je rychlosť pohybu snížená, nejnižší je u skupiny osob využívajících pomůcky pro chůzi (hole, berle, či chodítka), jejich průměrná rychlosť přesunu po rovině je dle měření Sodomkové (2017) 3,17 km/h. Na druhé straně lze také uvažovat běžícího cestujícího, který je schopný přestup realizovat rychlostí výrazně vyšší než uvažovaných 5,5 km/h. Dalším faktorem může být nerespektování červené na semaforech, při takovém jednání by byl přesun cestujícího také rychlejší.

V praktické realizaci bylo testováno rychlosti přesunů upravit pro pomalejší přesuny, či naopak pro rychlosť běhu. Rozdíly ve výsledku ovlivnily pravděpodobnost stihnutí přestupu jen minimálně, protože na uvažované vzdálenosti jde o rozdíl v řádech sekund.

V malém dopravním systému, jakým je MHD Mostu a Litvínova navíc není výjimkou, že řidič vyčká na dobíhající přestupující cestující. Nezahrnutí takového faktoru vede k potenciálně horším výsledkům spolehlivosti přestupních vazeb. Pokud bychom předpokládali, že ochota vyčkat na dobíhající je 1 minuta, bylo by navíc stihnuto 807 teoreticky nestihnutých přestupů (50,16 % z nestihnutých přestupů) v Mostě a 679 v Litvínově (33,75 % z nestihnutých přestupů). Celková spolehlivost přestupových vazeb by se tak zvýšila na 96,15 % v Mostě a 74,94 % v Litvínově (z původních 91,56 % a 71,39 %).

Dobu přesunu ovlivňuje i doba výstupu z vozidla, která narůstá s počtem vystupujících osob. Při pozorování na CPU nebylo pozorováno zdržení delší než 5 sekund, doba výstupu byla z toho důvodu ve výpočtu zanedbána.

4 DISKUSE

Následující odstavce jsou souhrnnou diskusí poznatků, které nejsou přímo závislé na konkrétních analýzách. Dílčí diskuse se nacházejí vždy přímo u provedených analýz.

Přestože analýzy mnoha aspektů sledovaných v provozu MHD jsou v různé míře pro existující síť MHD v Česku zpracovávány, jen výjimečně jsou k jejich realizaci využívána prostorová data geoinformatických formátů, jako je tomu v předkládané práci. Důvodem může být relativně vyšší výpočetní náročnost operací s geometrickými vlastnostmi dat a stále ještě nízká úroveň informovanosti objednavatelů a provozovatelů MHD o výhodách geoinformatického přístupu k datům, respektive o přidané hodnotě prostorové složky dat.

Ačkoliv v předkládané práci není výpočetní náročnost, s výjimkou prostorové kontroly dat, diskutována, zřetel na ni musel být brán při návrhu všech představených analýz. Při práci s geometrií naměřených záznamů polohy vozidel je i při práci s daty pouze za jeden měsíc z menší sítě MHD operováno se stovkami tisíc záznamů. Pokud by postupy navržené touto prací měly být aplikovány na data z násobně větších systémů MHD, nebo na násobně delší časové řady dat, bylo by žádoucí investovat další čas do optimalizace výpočetní náročnosti praktických realizací jednotlivých analýz.

Jak je v teoretické části práce uvedeno, dosavadní akademický výzkum se zabývá především analýzami souvislosti zpoždění a dopravních kongescí, analýzou dodržování taktu spojů či řetězením zpoždění. Všechny studie se týkají velkých měst s násobně většími systémy MHD. V Mostě a Litvínově se, na rozdíl od měst probíraných v dostupných vědeckých publikacích, nevytvářejí významné dopravní kongesce. Rozestupy mezi spoji jedoucími v taktu, pokud existuje, jsou nesrovnatelně delší, pohybují se běžně v desítkách minut – oproti tomu v metropolitních systémech MHD jde o jednotky minut. Jízdní doba spojů také není dostatečně dlouhá a zpoždění nebývá tak velké, aby bylo možné smysluplně studovat jeho řetězení.

Z uvedených důvodů byly navrženy metody analýz přizpůsobené dostupným datům a velikosti zkoumaného systému MHD. Porovnání s již provedenými výzkumy, které bývá součástí diskusí, je tedy složité. Pro Most a Litvínov, dle dostupných informací, zatím nebyla podobná studie provedena. V jiných českých městech, především větších, jsou podobné analýzy realizovány, publikovány jsou ale jen útržkovitě, často neoficiálními kanály (např. přes sociální sítě zaměstnanců). Nabízí se snad jen porovnání analýzy zpoždění na jednotlivých zastávkách s informací o očekávaném zpoždění zobrazovanou vyhledávačem spojení IDOS. Ten vypočítává předpokládané zpoždění na základě zpoždění za posledních přibližně 14 dní (záleží na počtu odpovídajících spojů). Tento systém se zaměřuje na spoj v konkrétní čas, který jel v různé dny, zatímco v práci navrhovaná analýza počítá průměrné zpoždění ze všech spojů dané linky. Přístup IDOSu je

výhodnější pro získání informace o konkrétním spoji, naopak přístup zvolený v předkládané analýze se zaměřuje na zastávku (nikoliv spoj) v delším časovém období a je vhodnější především na porovnání jednotlivých zastávek mezi sebou. IDOS bohužel tuto funkcionality neposkytuje pro MHD v Mostě a Litvínově, a tak výsledky navržené metody nelze s údaji z IDOSu porovnat.

Teoretický postup všech navržených analýz je ale využitelný na jakoukoliv síť MHD, stejně jako i na data z mezipřesné veřejné hromadné dopravy. Pro praktickou realizaci analýz nad daty z jiných sítí MHD je limitem struktura dat, která vznikají výstupem z dispečerského systému. Jiné dispečerské systémy generují data s jinou strukturou. Atributy využité ve všech předložených analýzách nicméně využívají výhradně základní ukazatele z provozu (jako jsou poloha a čas záznamu, číslo linky, konečná zastávka, poslední projednávaná zastávka či aktuální zpoždění), které by neměly chybět ve výstupu ze žádného dispečerského systému. Přesto by bylo nutné sjednotit názvy atributů a uspořádat je v datových tabulkách do odpovídajícího pořadí. Při práci s geodatami je totiž často využíváno kurzorů, které procházejí jednotlivé záznamy v tabulce, přičemž na konkrétní atribut může být odkazováno nejen prostřednictvím jeho názvu, ale také indexem, který určuje jeho pořadí v tabulce. Pro celý tento proces by mohl být vyvinut importní modul, který by jiná vstupní data upravil do předem definované struktury.

Specifikem dat z Mostu a Litvínova je využití hodnot rychlostí 121, 122 a 123 pro odlišení konkrétních druhů záznamů. Lze předpokládat, že pobyt vozidla v zastávce, čekání vozidla před jízdou či jeho jízda na první zastávku budou ve výstupech z jiných dispečerských systémů řešena elegantněji, například specifickým atributem. V takovém případě by filtrace dat za účelem odebrání těchto záznamů byla provedena jiným způsobem než v přiložených skriptech.

Analýza spolehlivosti přestupních vazeb v přestupních uzlech by vyžadovala vyšší množství manuálních úprav v případě její adaptace pro jinou síť MHD, respektive jiné přestupní uzly. Analýza nepracuje pouze s daty záznamů polohy vozidel, sítě linek a zastávek, ale je využito mnoho místně specifických dat, jako jsou intervaly světelné křižovatky nebo příslušnost konkrétních linek a směrů k odjezdovým sloupkům. Také je nutné sestavit kombinace sjízdějících se linek a jejich směrů.

Takové kombinace by bylo možné automatizovaně sestavovat, a tím zjednodušit replikaci analýz nad daty z jiných měst, s využitím strojově čitelných dat jízdních řádů. Taková data by usnadnila i realizaci ostatních představených analýz. Využitelná by byla data formátu JDF (která jsou v Česku standardem a existují i pro MHD Most a Litvínov, protože takový formát využívají vyhledávače spojení), ještě vhodnější by byla data formátu GTFS. Formát GTFS totiž umožňuje práci s prostorovou složkou jízdních řádů a pro analýzu spolehlivosti přestupů je informace o poloze jednotlivých odjezdových sloupků klíčová.

Využití dat jízdních řádů spolu s lépe vytvořenou geometrií linek a zastávek by usnadnilo a zpřesnilo několik z navržených analýz. Vhodná geometrie linek by spočívala ve vytvoření orientovaných linií, které by existovaly pro každý směr každé linky. V případě existence alternativních konečných zastávek by byla každá varianta trasy linky v celé své délce reprezentována další orientovanou linií. Okružní a polookružní linky by byly reprezentovány pouze jednou linií (pokud nemají nestandardní varianty své trasy). Odjezdové sloupky by poté byly snadno přiřaditelné ke směru linky pouze na základě topologie geometrických dat, kdy se odjezdové sloupky příslušející k danému směru nacházejí vždy vpravo od orientované linie linky.

Předkládaná práce se věnuje obecným analýzám využitelným na jakoukoliv síť MHD. Jednotlivé systémy ale mají svá specifika, kterým by se mohly věnovat další, podrobnější a místně zaměřené analýzy. V případě Mostu a Litvínova by tématem mohl být například vliv nedávné rekonstrukce tramvajové trati spojující obě města na rychlosť tramvajového spojení nebo porovnání rychlosti spojení obou měst prostřednictvím autobusů náhradní dopravy a tramvají.

5 ZÁVĚR

V teoretické části práce byly představeny aktuální přístupy k analýze dat o poloze vozidel veřejné dopravy a diskutovány metody relevantní pro zpracování a interpretaci těchto dat. V praktické části práce je na data o poloze vozidel pohlíženo z několika úhlů. Nejprve je zkонтrolována logická správnost atributů zpracovávaných dat, stejně jako jejich prostorová přesnost. Při prostorové kontrole jsou identifikovány nesoulady mezi plánovanou trasou linky a trasou, po které se vozidla v reálném provozu pohybovala. S daty očištěnými od chyb nalezených při atributové a prostorové kontrole je následně pracováno v časoprostorových analýzách zpoždění. V nich byla pozornost zaměřena postupně na časoprostorové rozložení zpoždění v kontextu celé sítě, na jeho lokalizaci na trase jednotlivých linek a také, v samostatné analýze, na jeho výskyt na příjezdu spojů na jednotlivé zastávky. Zpracovány jsou také některé ryze časové statistiky bez prostorové složky.

Závěrečná analýza zkoumá spolehlivost přestupních vazeb na přestupních uzlech, do kterých se sjíždějí autobusy a tramvaje z různých směrů. Vozidla v přestupním uzlu setrvají, je umožněn přestup cestujících, a poté se opět rozjíždějí. Spolehlivost je vyjádřena jako podíl teoreticky stihnutých přestupů ku všem přestupům zvládnutelným dle jízdního řádu. Je kalkulováno s časem příjezdu vozidla, délku přestupu mezi spoji a čekáním vozidla i přestupujícího cestujícího na světlé křižovatce.

Všechny implementace navržených analýz, přizpůsobené datům z městské hromadné dopravy v Mostě a Litvínově, jsou funkční a vrací validní výsledky, které jsou v práci prezentovány a interpretovány.

Předkládaná práce úspěšně demonstруje, že pokročilé analýzy dat o poloze vozidel mohou přispět k lepšímu pochopení časoprostorové dynamiky městské hromadné dopravy a identifikovat prostor k jejímu zlepšení. Přínos práce spatřuje především v její praktické části. Čtenářům je v ní představeno, jaké informace lze z dat o poloze vozidel MHD popsanými metodami získat. Vytvořené analýzy, respektive skripty, které je implementují, mohou být opakovaně spouštěny nad novými daty a jejich výsledky mohou být využity při hodnocení současného stavu MHD, při úpravách jízdních řádů nebo při plánování dalšího rozvoje městské hromadné dopravy v Mostě a Litvínově. Po případném přizpůsobení skriptů je možné stejné analýzy provést i pro jiná města, která disponují vhodnými daty.

O výsledky této práce projevil zájem odbor GIS Magistrátu města Most, kterému budou v plném rozsahu k dispozici. Stejně tak budou předány i Dopravnímu podniku měst Mostu a Litvínova, a. s.

6 POUŽITÉ ZDROJE

6.1 Odborná literatura

ANSAULT, M., SOILLE P. (1990): Mathematical Morphology: A Tool for Automated GIS Data from Scanned Thematic Maps. *Photogrammetric Engeneering and Remote Sensing*, 56, 9, 1263-1271.

BALEK, J., KÝHOS, M. (2021): Globální polohové systémy. In: HARTVICH, F. a kol.: Analýza současného poznání obecných faktorů vzniku a vývoje svahových nestabilit. Projekt Rock Environment and Mineral Resources, Praha.

CEDER, A. (2002): Urban Transit Scheduling: Framework, Review and Examples. *Journal of Urban Planning and Development*, 4, 128, 225-244.

HARSHA, M., MULANGI, R., KULKARNI, V. (2022): Visualization and Assessment of the Efekt of Roadworks on Trafic Congestion Using AVL Data of Public Transit. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 28, 6.

HLISNIKOVSKÝ, P. (2018): Čas a prostor ve studiu městské hromadné dopravy. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity na ústavu Geografie, vedoucí bakalářské práce Daniel Seidenglanz. Brno.

HUISMAN, O., DE BY, R. A. (2009): Principles of Geographic Information Systems. ITC, Enschede.

LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M. F., MAGUIRE, D. J., RHIND, D. W. (2015): Geographic Information Systems and Science. John Wiley & Sons.

MATUŠKA, J., MRZENA R. (2006): Přestupní uzly a spotřeba cestovního času. Perner's Contacts. Pardubice.

PARK, Y., MOUNT, J., LIU, L., XIAO, N., MILLER, H. (2020): Assessing public transit performance using real-time data: spatiotemporal patterns of bus operation delays in Columbus, Ohio, USA. *International Journal of Geographical Information Science*, 2, 34, 367-392.

PERINA, M. (2019): Problematika bezpečnostních přestávek řidičů při optimalizaci oběhu vozidel, Diplomová práce na Fakultě dopravní ČVUT, vedoucí diplomové práce Dušan Teichmann a Vít Janoš. Praha.

PETROPOULOS, G., SRIVASTAVA, P. (2021): GPS and GNSS Technology in Geosciences, Elsevier, Amsterdam.

RAGHOTHAMA, J., SHREENATH, V. M., MEIJER, S. (2016): Analytics on public transport delays with spatial big data. In: Proceedings of the 5th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Analytics for Big Geospatial Data. 28-33.

RAJMAN, J. (2009): Analýza reálné dostupnosti Prahy silniční dopravou v průběhu dne a týdne pomocí GIS. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy, katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, vedoucí bakalářské práce Tomáš Hudeček. Praha.

SODOMKOVÁ, A. (2017): Analýza časových ztrát pro OOSPO v přestupním uzlu Florenc. Diplomová práce na Fakultě dopravní ČVUT, vedoucí diplomové práce Lucie Krčálová, Jan Krčál a Michal Jeřábek. Praha.

SOZA-PARRA, J., RAVEAU, S., MUÑOZ, J.C. (2021): Public transport reliability across preferences, modes, and space. *Transportation*, 49, 621-640.

SPURNÝ, M. (2016): Most do budoucnosti: laboratoř socialistické modernity na severu Čech. Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, Praha.

ŠIROKÝ, J. a kol. (2020): Technologie dopravy. Univerzita Pardubice, Pardubice.

WELCH, T., WIDITA, A. (2019): Big data in public transportation: a review of sources and methods. *Transport Reviews*, 13, 39, 1-24.

WENDLER W. (2003): Grundlagen der Verkehrswirtschaft. RWTH Aachen.

WESSEL, N., WIDENER, M. (2016): Discovering the space–time dimensions of schedule padding and delay from GTFS and real-time transit data. *Journal of Geographical Systems*, 1, 19, 93-107.

ZHANG, H., CUI, H., SHI, B. (2019): A Data-Driven Analysis for Operational Vehicle Performance of Public Transport Network. *IEEE Access*, 7.

6.2 Internetové a další zdroje

ČESKÁ REPUBLIKA (2009): Vyhláška č. 398/2009 Sb., o obecných technických požadavcích zabezpečujících bezbariérové užívání staveb.

ČSN 73 6110 (2006): Projektování místních komunikací. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.

ČSN 73 6425-2 (2009): Autobusové, trolejbusové a tramvajové zastávky, přestupní uzly a stanoviště – Část 2: Přestupní uzly a stanoviště. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.

DOPRAVNÍ PODNIK HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY (2023): Tramvaje a metro v Praze,
https://www.dpp.cz/cs/data/Dopravn%C3%AD%20sch%C3%A9ma%20zastavky%20stav/rijen_2023/Praha_tramvaje_metro_denni_zastavky_23.10.23.pdf (3. 3. 2024).

DOPRAVNÍ PODNIK MĚST MOSTU A LITVÍNOVA (2020): Zrušení zastávky Souš, Vrbenský II.,
<https://www.dpmost.cz/zvd217> (14. 3. 2024).

ESRI (2024): How Buffer (Analysis) works, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.1/tool-reference/analysis/how-buffer-analysis-works.htm> (8. 4. 2024).

ESRI (2024): Shapefiles in ArcGIS Pro, ArcGIS Pro Documentation. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/shapefiles/working-with-shapefiles-in-arcgis-pro.htm> (8. 4. 2024).

ESRI (2024): Tool reference: Comparison of classic overlay tools to pairwise overlay tools,
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/analysis/comparison-of-classic-overlay-tools-to-pairwise-overlay-tools.html> (10. 2. 2024).

ESRI COMMUNITY (2017): Only display points if today is Monday through Friday,
<https://community.esri.com/t5/mapping-questions/only-display-points-if-today-is-monday-through/td-p/65511> (8. 3. 2024).

GOLEMIO PRAGUE CITY DATA (2024): Doprava v datech, <https://golemio.cz/data/doprava#section-1> (13. 3. 2024).

GRILL, S. (2008): Geoprocessing. In: ŠTYCH, P. a kol: Vybrané funkce geoinformačních systémů. CITT Praha Akademie kosmických technologií, Oblast Galileo, GMES, Praha.

HLAVÁČ, V.: Matematická morfologie, https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/a6m33zmo/71-3matmorpholbincz.pdf (29. 2. 2024).

KRTIČKA, F. (2013): Připomínky a dotaz k novému systému MHD [elektronická pošta]. Osobní elektronická komunikace s Jakubem Lysákem.

MINISTERSTVO DOPRAVY (2018): Technické podmínky: Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích, https://pjpk.rsd.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_189_2018_final.pdf (12. 3. 2024).

MOSTECKÉ LISTY (2023): Na silnici I/13 v Mostě bude zahájena rekonstrukce okružní křižovatky, www.listy.mesto-most.cz/na-silnici-i-13-v-moste-bude-zahajena-rekonstrukce-okruzni-krizovatky/d-18587 (3. 3. 2024).

MŠMT (2021): Přehled provozu škol v období pandemie COVID19: jaro 2020–2021, <https://www.klickevzdelani.cz/Management-skol/Reditelna/Provozní-zalezitosti/category/vseobecne-informace/msmt-prehled-provozu-skol-v-obdobi-pandemie-covid19-jaro-2020-2021> (9.3.2024).

MVČR (2021): Vláda na tři týdny zakázala pohyb mezi okresy. Omezení má zabránit šíření agresivních mutací koronaviru, <https://www.mvcr.cz/clanek/vlada-na-tri-tydny-zakazala-pohyb-mezi-okresy-omezeni-ma-zabranit-sireni-agresivnich-mutaci-koronavirus.aspx> (9.3.2024).

NOVINKY.CZ (2020): Příští týden se vrátí do škol devátáci i maturanti, <https://www.novinky.cz/clanek/domaci-v-pondeli-se-vrati-do-skol-devataci-i-maturanti-40342502> (9. 3. 2024).

ODBOR DOPRAVY MĚSTA ČESKÁ LÍPA (2023): Schéma linek MHD Česká Lípa, https://www.mucl.cz/assets/File.ashx?id_org=2138&id_dokumenty=47081 (3. 3. 2024).

PID (2019): Kolik lidí jezdí hromadnou dopravou v jednotlivých dnech či měsících roku? <https://pid.cz/kolik-lidi-jezdi-hromadnou-dopravou-jednotlivych-dnech-ci-mesicich-roku/> (24. 4. 2024).

PRAHA, METROPOLE VŠECH (2024): Cestování autem, <https://metropolevsech.eu/cs/praha/doprava-v-praze/cestovani-autem/> (13. 3. 2024).

ŠEFR, V. (2024): Bakalářská práce – dotazy k datům o poloze vozidel [elektronická pošta]. Osobní elektronická komunikace s autorem práce.

ŠTRONER, M. (2022): Globální navigační satelitní systémy (GNSS). ČVUT, Fakulta stavební, Praha. https://k154.fsv.cvut.cz/wp-content/uploads/2022/01/GNSS_obs.pdf (10. 4. 2024).

VLÁDA ČESKÉ REPUBLIKY (12. 10. 2020): Usnesení vlády České republiky ze dne 12. října 2020 č. 1022 o přijetí krizového opatření, <https://vlada.gov.cz/assets/media-centrum/aktualne/2--provoz-skol-1022.pdf> (9. 3. 2024).

WHITE, S., SATRAN, M. (2019): The Component Object Model. Microsoft Learn, <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/com/the-component-object-model> (8. 4. 2024).

6.3 Zdroje obrázků

Obrázky 1, 2: Sociální síť X, Zbyněk Jiráček (@jiracekz), <https://twitter.com/jiracekz>

Obrázky 3, 4, 6: Esri, ArcGIS Pro dokumentace, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/introduction-anatomy/anatomy-of-a-tool-reference-page.htm>

Obrázek 5: Saylor Academy: Single Layer Analysis, https://saylordotorg.github.io/text_essentials-of-geographic-information-systems/s11-01-single-layer-analysis.html

Obrázky 19, 20: Dopravní podnik měst Mostu a Litvínova: Centrální přestupní uzly, <https://www.dpmost.cz/optimalizacemd-cpu>

7 PŘÍLOHY

Pro lepší orientaci jsou přílohy této práce uloženy v souboru ***prilohy_bp_zatka.zip***, který obsahuje níže uvedené adresáře.

Struktura adresáře je následující:

\0_vstupni_data

```
\MostMHD_10_23.gdb
    \linky
        \linky_nekrizici_se
        \linky_orig
    \zastavky
        \zastavky_litvinov
        \zastavky_orig
        \zastavky_prior
    \zaznamy_polohy
        \zaznamy_polohy_ocisteno
        \zaznamy_polohy_od_2020
        \zaznamy_polohy_orig
    \zona_za_semaforem
    \zony_zastavek
        \zony_zastavek_litvinov
```

\1_atributova_kontrola

```
\atributova_kontrola.py
```

\2_prostorova_kontrola

```
\skripty
    \prostorova_kontrola.py
    \prostorova_kontrola_fishnet.py
\vy sledky
    \output_koridor_mimo.txt
    \output_linka_mimo.txt
    \vy sledky_shapefiles
        \kor_mimo
            \kor_{cislo_linky}_mimo.shp
```

```
\koridor_mimo_FINAL  
  \kor_{cislo_linky}_mimo_FINAL.shp  
\useky_mimo  
  \useky_mimo_{cislo_linky}.shp
```

\3_analyza_rozlozeni_zpozdeni

\skripty

```
\lyrx vzorové soubory  
  \rozsekana_linka_vzor.lyrx  
  \vybrane_zastavky_vzor.lyrx  
  \extent_layer_vzor.lyrx  
  \tvorba_layoutu.docx  
\zpozdeni_linky_most_PROGRAM  
  \zpozdeni_linky_mapa.py  
  \další adresáře nezbytné pro běh programu  
  \celositove_mapy.py  
  \statistiky_cas_dny_v_tydnu_hodiny.py  
  \statistiky_cas_linky_zpozdeni.py
```

\vysledky

```
\mapy_zpozdeni_v_cele_siti  
  \layout_{číslo_linky}_smer_{konecna_zastavka}.pdf  
  \mapa_cela_sit.png  
\mapy_zpozdeni_pro_jednotlive_linky  
  \mapa_cela_sit_{pocatecni_hodina}_{koncova_hodina}.pdf
```

\4_analyza_zpozdeni_zastavky

```
\zpozdeni_zastavky.csv  
\zastavky_zpozdeni.py
```

\5_analyza_prestupnich_vazeb

\skripty

```
\prestupy_litvinov.py  
  \prestupy_most.py
```

\vysledky

```
\prestupy_databaze_litvinov.csv  
  \prestupy_databaze_most.csv
```