



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

ANALÝZA PŘÍČIN A NÁVRHY ŘEŠENÍ ZPOŽDĚNÍ TRAMVAJOVÉ DOPRAVY Z DOPRAVNĚ-STAVEBNÍHO HLEDISKA

ANALYSIS OF THE CAUSES AND SOLUTIONS PROPOSED TO TRAM TRANSPORT DELAYS FROM THE
TRANSPORT AND CONSTRUCTION POINT OF VIEW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Kopecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Valehrach, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav železničních konstrukcí a staveb
Student: **Bc. Vojtěch Kopecký**
Vedoucí práce: **Ing. Jan Valehrach, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: N0732A260019 Městské inženýrství

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza příčin a návrhy řešení zpoždění tramvajové dopravy z dopravně-stavebního hlediska

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte analýzu tramvajové sítě města Brna zaměřenou na zpomalující prvky (křižovatky, oblouky apod.).

Dále navrhnete na základě analýzy opatření pro eliminaci nebo zmírnění dopadů zpomalujících prvků na tramvajový provoz.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem práce je nalezení propadů rychlostí a zdržení tramvajových vozidel na linkách tramvajové sítě města Brna.

Následně na základě analýzy např. pro vzorovou linku či charakteristické lokality budou navržena opatření pro odstranění nebo zmírnění propadů rychlostí tramvajových vozidel a snížení jejich zdržení.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Data o pohybech vozidel

Územní plán města Brna

Volně dostupné mapové podklady

ČSN 73 6405 Projektování tramvajových tratí

ČSN 28 0312 Geometrické uspořádání koleje tramvajových tratí

ČSN 28 0318 Průjezdne průřezy tramvajových tratí a obrysy pro vozidla provozovaná na tramvajových dráhách

a další platné právní předpisy a normy

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 29. 3. 2023

L. S.

doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Jan Valehrach, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Práce Analýza příčin a návrhy řešení zpoždění tramvajové dopravy z dopravně-stavebního hlediska se zaměřuje na problematiku zpoždění a propadů rychlostí v tramvajové dopravě, zejména příčinám jejich vzniku a způsobům jejich eliminace. Práce zkoumá aktuální stav brněnského tramvajového systému, a to se zaměřením na zpomalující prvky v systému a místa s častým vznikem zpoždění včetně toho, čím jsou tato zpoždění způsobena. Práce se dále věnuje možnostem zrychlení tramvajové dopravy jak z pohledu dopravního, tak i z pohledu kolejového uspořádání. V závěrečné části práce jsou detailněji zanalyzovány vybrané úseky brněnského tramvajového systému a na podkladu těchto analýz jsou navržena opatření, která vedou ke zrychlení tramvajové dopravy a eliminaci zpoždění, která se v ní vyskytují.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tramvaj, tramvajová doprava, městská hromadná doprava, rychlost, zpoždění, jízdní doba, intezita, zpomalující prvky, traťová rychlost, výhybka, zastávka, zrychlování tramvajové dopravy

ABSTRACT

The thesis Analysis of the causes and solutions proposed to tram transport delays from the transport and construction point of view focuses on the issue of delays and speed drops in tram transport, especially on the causes of their occurrence and ways of their elimination. The thesis examines the current state of the Brno tram system, with a focus on the slowing elements in the system and the locations with frequent delays, including what causes these delays. The thesis also examines the possibilities of speeding up tram transport both from the point of view of transport and from the point of view of track layout. In the final part of the thesis, selected sections of the Brno tram system are analysed in more detail and on the basis of these analyses, measures are proposed that lead to the acceleration of tram transport and the elimination of delays that occur in it.

KEYWORDS

tram, tram transport, public transport, speed, delay, journey time, intensity, slowing down elements, line speed, switch, stop, acceleration of tram transport

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOPECKÝ, Vojtěch. *Analýza příčin a návrhy řešení zpoždění tramvajové dopravy z dopravně-stavebního hlediska*. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí Ing. Jan Valehrach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Analýza příčin a návrhy řešení zpoždění tramvajové dopravy z dopravně-stavebního hlediska* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2024

Bc. Vojtěch Kopecký
autor

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Janu Valehrachovi, PhD. za cenné rady, ochotu, toleranci a vstřícnost při zpracování a konzultacích mé diplomové práce.

Obsah

1	TEORIE RYCHLÉ TRAMVAJOVÉ DOPRAVY	2
1.1	Obecné požadavky na MHD	2
1.1.1	Dostupnost.....	2
1.1.2	Spolehlivost.....	2
1.1.3	Kapacita.....	3
1.1.4	Bezpečnost	3
1.1.5	Udržitelnost.....	4
1.1.6	Výhodnost oproti IAD	4
1.2	Význam tramvajové dopravy v rámci MHD.....	5
1.2.1	Význam tramvajové dopravy v brněnské MHD	5
1.3	Rychlosti a doby v tramvajové dopravě	7
1.3.1	Maximální konstrukční rychlost vozu nebo soupravy	7
1.3.2	Maximální povolená provozní rychlost	7
1.3.3	Jízdní doba mezi zastávkami	7
1.4	Zpoždění.....	8
1.4.1	Příčiny zpoždění v tramvajové dopravě	8
1.4.2	Náskok.....	11
2	ZPŮSOBY ELIMINACE ZPOŽDĚNÍ	12
2.1	Optimalizace jízdních řádů	12
2.1.1	Systém plus-minus	12
2.2	Optimalizace reálné cestovní doby	13
2.2.1	Navýšení traťové rychlostí.....	13
2.2.2	Odstranění zbytných propadů rychlostí.....	13
3	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU BRNĚNSKÉHO TRAMVAJOVÉHO SYSTÉMU	14
3.1	Rychlost tramvajové dopravy.....	14
3.1.1	Rychlost tramvajové dopravy v Brně.....	16
3.2	Umístění tramvajové trati.....	16
3.2.1	Tramvajová trať na samostatném tělese.....	17
3.2.2	Tramvajová trať na sdruženém tělese.....	17
3.2.3	Tramvajová trať jako součást pozemní komunikace	17
3.3	Intenzita tramvajové dopravy	18
3.4	Zpomalující prvky v systému	21
3.4.1	Úseková omezení.....	21
3.4.2	Bodová omezení	23
3.4.3	Zastávky	25
3.5	Místa s vysokou frekvencí vzniku zpoždění	27
3.5.1	Úsek Nové Sady – Hybešova/Soukenická.....	27
3.5.2	Úsek Mendlovo náměstí – Václavská/Poříčí	27
3.5.3	Úsek Česká – Grohova/Moravské náměstí/Šilingrovo náměstí	28
3.5.4	Úsek Hlavní nádraží – Vlhká/Úzká	29
4	ZRYCHLUJÍCÍ OPATŘENÍ.....	31
4.1	Benefity zrychlování dopravy	31

4.2	Opatření na úrovni tramvajové dráhy	31
4.2.1	Geometrie tratí.....	31
4.2.2	Systémy a konstrukce rychlého odbočení.....	34
4.2.3	Splítkové výhybky.....	35
4.2.4	Zbytná kolejová křížení	36
4.2.5	Úseky s potenciálem navýšení maximální traťové rychlosti	37
4.3	Opatření na úrovni provozu a řízení	38
4.3.1	Řízení sledu vlaků.....	38
4.3.2	Preferenční systémy světelných křižovatek	39
5	ANALÝZA ÚSEKŮ.....	41
5.1	Úsek A - Hlavní nádraží – Úzká – Komárov	41
5.1.1	Propady rychlosti na trase	43
5.1.2	Jízdní řád úseku.....	43
5.1.3	Stabilita dodržování JŘ.....	46
5.2	Úsek B - Vozovna Komín-Konečného náměstí-Česká	49
5.2.1	Stabilita jízdního řádu.....	52
5.3	Úsek C1 - Ečerova-Vozovna Komín.....	56
5.3.1	Stabilita jízdních řádů.....	57
5.4	Úsek C2 – Hlavní nádraží – Vozovna Komín	61
6	NÁVRH ÚPRAVY ÚSEKŮ.....	66
6.1	Časové bilance navržených úprav.....	66
6.1.1	Vstupní předpoklady výpočtů	66
6.1.2	Vzorce výpočtů	67
6.2	Opatření v úseku A - Hlavní nádraží – Komárov	69
6.2.1	Řízení sledu vlaků.....	70
6.3	Opatření v úseku B – Vozovna Komín–Česká.....	72
6.3.1	Rozvětvení Vozovna Komín.....	72
6.3.2	Řešení problémového úseku Veveří	74
6.4	Opatření v úseku C1 – Ečerova-Vozovna Komín	75
6.4.1	Rekonstrukce tramvajového tělesa při ulici Obvodové	75
6.4.2	Navýšení maximálních traťových rychlostí mezi zastávkami Přístaviště – Ečerova.....	76
6.4.3	Mimoúrovňové křížení Kamenolom	77
6.5	Opatření v Úseku C2 – Hlavní nádraží - Vozovna Komín	80
6.5.1	Rozvětvení Vozovna Komín.....	80
6.5.2	Redispozice zastávky Výstaviště – hlavní vstup	81
6.5.3	Mendlovo náměstí.....	83
6.6	Celková časová bilance úseku Bystrc, Ečerova – Vozovna Komín – Hlavní nádraží.....	85
7	ZÁVĚR.....	86
8	POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA.....	87
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	90
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	91

1 TEORIE RYCHLÉ TRAMVAJOVÉ DOPRAVY

Moderní metropole čelí tlaku na efektivní městskou dopravu. Rychlá tramvajová doprava pak může být klíčovým prvkem mobility ve městě, která může pomoci ke zvýšení plynulosti dopravy a omezení kongescí. Toho lze však dosáhnout jen za předpokladu, kdy tramvajová doprava bude konkurenceschopná ostatním dopravním módům ve městě, přičemž jednu z klíčových rolí ve srovnání způsobů cestování hraje jejich rychlost.

1.1 OBECNÉ POŽADAVKY NA MHD

Městská hromadná doprava představuje nepostradatelnou součást každé velké aglomerace a zajišťuje efektivní pohyb obyvatelstva v ní. Její význam však netkví jen v dopravní obsluze městských částí, ale rovněž v omezení negativního vlivu města na životní prostředí a v zajištění ekonomické a sociální udržitelnosti města jako celku. Z těchto důvodů je nutné, aby městská hromadná doprava splňovala jisté standardy [1, s. 144-145].

1.1.1 Dostupnost

Jedním z těchto standardů je dostupnost městské hromadné dopravy. Systém s vysokým standardem dostupnosti pak zajišťuje rychlou a plynulou městskou mobilitu, a to širokému spektru potencionálních uživatelů bez ohledu na jejich věk nebo fyzickou či ekonomickou kondici.

Vytvoření dobře fungujícího systému městské hromadné dopravy vyžaduje pečlivé uspořádání a rozmístění přestupních uzlů a linek. Ty by měly reflektovat významné destinace ve městě, a to jak pro cesty za prací nebo vzděláváním, tak i pro cesty za volnočasovými aktivitami. Optimálním rozmístěním zastávek a přestupních uzlů a organizací linek by tak mělo dojít ke snížení vzdáleností, které musí obyvatelé města překonávat, což vede ke zvýšení atraktivity tohoto způsobu městské mobility [1, s. 145].

1.1.2 Spolehlivost

Na spolehlivost MHD můžeme nahlížet z několika úhlů, přičemž každý z nich přináší své vlastní hledisko.

Jedním z klíčových faktorů je pravidelnost dopravy, tedy situace, kdy jsou dopravní prostředky organizovány na základě jízdních řádů, které jsou pečlivě naplánovány a je tak zajištěna optimální frekvence spojů, díky které jsou pak uživatelé schopni plánovat své cesty. Zároveň během provozu vznikají jen marginální zpoždění, která výrazně neovlivňují schopnost plánování cest uživatelů.

Na spolehlivost lze nahlížet ale i z úhlu provozuschopnosti systému samotného. Ten je podmíněn dostatečně kvalitní a pravidelně udržovanou infrastrukturou včetně vozidel, což vede k minimalizaci technických problémů a poruch, které by jinak mohly přispívat k nepravidelnostem v provozu.

1.1.3 Kapacita

Dalším z důležitých standardů kvalitní hromadné dopravy ve městech je zajištění dostatečné přepravní kapacity systému tak, aby byla zaručena efektivita a komfort přepravy pro uživatele.

Dostatečně kapacitní dopravu je nutné realizovat na několika úrovních. Krom samotné kapacity dopravních prostředků je potřeba vytvořit kapacitní infrastrukturu jak linek, tak i zastávek a přestupních uzlů. Zároveň je potřeba pružně reagovat na pravidelně, ale i mimořádně exponované situace či období, během kterých je poptávka po přepravě nárazově výrazně vyšší než obvykle a běžná nabídka přepravy by pak neuspokojila poptávku po ní, minimálně na úkor komfortu cestujících [1, s. 148-149].

1.1.4 Bezpečnost

Bezpečnost přepravy a důvěra uživatelů v ni je bezesporu jedním z nejdůležitějších předpokladů funkčního systému hromadné městské dopravy. Samotná bezpečnost pak v sobě skýtá několik hledisek, ze kterých můžeme na bezpečnost nahlížet. Jedná se o bezpečnost na úrovni dopravní, ale rovněž bezpečnost na úrovni lidského chování.

Dopravní bezpečnost pak dále můžeme rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní bezpečnost v sobě zahrnuje veškeré systémy a postupy, které vedou k předcházení vzniku nebezpečných dopravních situací při provozu, jako jsou například dopravní nehody nebo v případě tramvajové dopravy pak mimořádné

drážní události typu vykolejení a podobné. Pasivní bezpečnost pak snižuje škody na lidských životech a majetku v případech, kdy už ke kolizní situaci dojde.

Na úrovni bezpečnosti z pohledu lidského chování jsou pak největšími hrozbami pro městskou hromadnou dopravu kriminalita a terorismus.

1.1.5 Udržitelnost

Udržitelnost je v současné době často skloňované slovo, a to i v případě městské hromadné dopravy. Zahrnuje v sobě několik disciplín, zejména pak vzájemnou spolupráci věd ekologických a ekonomických. Při budování a rozvoji je potřeba klást důraz na efektivní postupy, které budou mít minimální vliv na životní prostředí a životy občanů města [2].

1.1.6 Výhodnost oproti IAD

Aby bylo dosaženo požadovaného využívání MHD na úkor IAD, je nutné zajistit, aby využívání MHD bylo finančně, časově a komfortně výhodnější, nebo minimálně srovnatelné s individuální automobilovou dopravou.

Finanční výhodnost se dnes již neobejde bez pomoci veřejného sektoru, který na provoz veřejné i městské dopravy poskytuje dotace, díky kterým je možné nastavovat ceny takovým způsobem, že jsou nižší nebo srovnatelné s náklady vynaloženými na individuální způsob cestování.

Časové výhodnosti lze dosáhnout segregací, popřípadě prioritizací vozidel městské hromadné dopravy od individuální automobilové dopravy. Často se tedy přistupuje k vybudování vyhrazených pásů, oddělování veřejné dopravy od té individuální nebo k nastavování preferenčních mechanismů v rámci světelných křižovatek ve městě.

S výhodností, co se komfortu cesty týče, je to již poněkud složitější. Jen obtížně mohou vozidla MHD konkurovat palubnímu pohodlí osobních automobilů. Nicméně lze dopravními omezeními a regulacemi dosáhnout situace, kdy vozidlo MHD zastaví v těsné blízkosti cíle cesty a není nutné volit dalekou docházku. Zároveň jízda prostředkem hromadné dopravy nevyžaduje aktivní účast cestovatele na řízení dopravního prostředku a může tak být příležitostí pro

odpočinek a drobné volnočasové aktivity typu čtení knihy nebo komunikace na sociálních sítích.

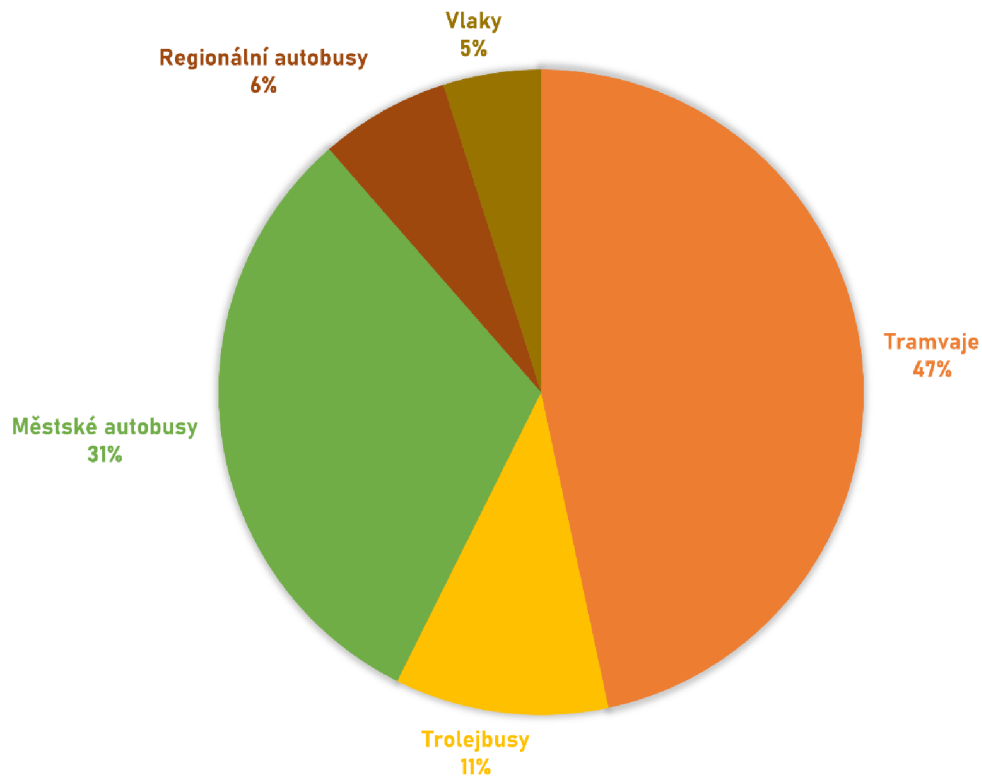
1.2 VÝZNAM TRAMVAJOVÉ DOPRAVY V RÁMCI MHD

Tramvajová doprava může v systému městské hromadné dopravy plnit veskrze dva typy funkcí. U měst od 50 do 650 tisíc obyvatel plní tramvaje většinou roli páteřního dopravního módu, u měst větších pak častěji plní roli podpůrnou systémům vyšší úrovně, jako jsou zejména metro a jiné metropolitní dráhy nebo příměstské železnice [1, s. 147].

Obrovskou výhodou tramvajové dopravy je její schopnost kombinovat pomalejší uliční dopravu s rychlejší segregovanou dopravou na vlastních tělesech. Z tohoto důvodu je vhodným prostředkem pro systémy MHD měst evropského stylu, tedy měst s historickým jádrem s hustou strukturou zástavby, která však se vzdáleností od centra klesá a mění se spíše v solitérní zástavbu. Tramvajová doprava tak může fungovat jako pouliční dráha v těchto centrech, a mimo centra může přecházet na samostatná tělesa a sloužit jako městská rychlodráha při zachování rozumných vzdáleností zastávek.

1.2.1 Význam tramvajové dopravy v brněnské MHD

Ve statutárním městě Brně plní tramvajová doprava roli páteřního dopravního módu, který je podporován trolejbusovými a autobusovými linkami. V roce 2023 bylo v provozu 11 pravidelných denních linek, z nichž každá projíždí alespoň jedním ze dvou centrálních přestupních uzlů, jimiž jsou zastávky Hlavní nádraží a Česká. V roce 2022 dosáhla tramvajová doprava v Brně přepravního výkonu 1 223 241 669 osobových kilometrů, což činí 46,6 % přepravního výkonu všech veřejných dopravních módů ve městě Brně integrovaných v IDSJMK [3].



Obrázek 1: Podíl přepravního výkonu dopravních módů v Brně [3]

Generel veřejné dopravy města Brna pak nadále počítá s kolejovou městskou dopravou jako základním pilířem veřejné dopravy ve městě. K současně fungujícímu systému malého okruhu okolo historického centra, z něž vystupuje desítka radiálních tratí, pak generel počítá s rozvojem systému zejména v jižním směru, a to za účelem pokrytí nové poptávky zapříčiněné přesunem hlavního nádraží a rozvojem oblastí na jihu města [4].

1.3 RYCHLOSTI A DOBY V TRAMVAJOVÉ DOPRAVĚ

Při popisu dějů, které se v tramvajovém systému vyskytují je potřeba vyjasnit si pojmy, které do celého systému vstupují.

1.3.1 Maximální konstrukční rychlost vozu nebo soupravy

Maximální konstrukční rychlost vozu nebo soupravy je taková rychlost, které je vůz nebo souprava schopna dosáhnout za optimálních podmínek. Je odvozena od technických specifikací a konstrukčních omezení daného vozu.

1.3.2 Maximální povolená provozní rychlost

Maximální povolená provozní rychlost je nejvyšší rychlost, kterou může vůz nebo souprava vozů dosáhnout v konkrétních provozních podmínkách. V tramvajové dopravě může být určena dvěma základními způsoby.

Pokud je tramvajová trať součástí silničního provozu, pak se řídí nejvyšší dovolenou rychlostí v daném místě na základě dopravního značení dle zákona 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích.

V případě, kdy se tramvaj pohybuje na samostatném tělese, je nejvyšší provozní rychlost určena traťovou rychlostí v daném místě, která je určena návěstmi, jež jsou součástí směrnice DPMB D21 Návěstní soustava [5].

Kromě výše zmíněných jsou pak v systému konstrukční prvky a systémy typu výhybek nebo křížení s jinými drahami, na kterých je maximální rychlost rovněž omezena.

1.3.3 Jízdní doba mezi zastávkami

Jízdní doba mezi zastávkami je časový úsek, který je na počátku ohraničen okamžikem výjezdu tramvaje ze zastávky výchozí a ukončen okamžikem výjezdu tramvaje ze zastávky následující. Tato doba se tak skládá z času potřebného na překonání vzdálenosti mezi těmito zastávkami a z doby, jež je potřebná k obsluze zastávky, v tomto případě druhé v pořadí.

1.4 ZPOŽDĚNÍ

Zpoždění je obecně doba, která vyjadřuje rozdíl mezi časem odjezdu, průjezdu nebo příjezdu dle jízdního řádu a skutečným časem odjezdu, průjezdu či příjezdu. V systému MHD, který je silně ovlivňován nahodilými externími vlivy, jsou pak jistá marginální zpoždění denní záležitostí.

1.4.1 Příčiny zpoždění v tramvajové dopravě

Tramvajová doprava jako systém, který dokáže kombinovat trasy skrze různé druhy zástavby, je silně ovlivněna externími vlivy, které mohou zapříčinit vznik zpoždění. Tyto externí vlivy můžeme rozdělit do několika kategorií.

1.4.1.1 Systémové příčiny

Tramvajová doprava je v centrech měst součástí běžného provozu, tím pádem jsou součástí trasy i světelně řízené křižovatky pozemních komunikací. V některých případech lze na těchto křižovatkách nastavit systém preferencí MHD, tedy systém, který zajistí plynulý průjezd křižovatkou vozidlům městské hromadné dopravy. Vzhledem k husté síti však nelze zajistit absolutní preferenci MHD na úkor IAD. Z tohoto důvodu průjezd některých křižovatek závisí čistě na náhodě.

Další ze systémových příčin může být i faktor vysoké intenzity provozu na samotných tratích, a tedy nutnost obezřetné jízdy při souběhu několika spojů nebo linek.

1.4.1.2 Dopravní příčiny

Pravděpodobně tou nejčastější příčinou zpoždění v tramvajové dopravě je fakt, že v určitých částech trasy jsou tramvaje nuceny sdílet svou dráhu s individuální automobilovou dopravou a stávají se tak součástí provozu na pozemních komunikacích. Tato integrace s sebou může přinést řadu potenciálních problémů, které jsou pro provoz na pozemních komunikacích obecně charakteristické. Mezi takové potencionální problémy patří například dopravní zácpy a jiná přetížení pozemních komunikací, dopravní nehody, rekonstrukce a opravy silnic a další nepředvídatelné situace.

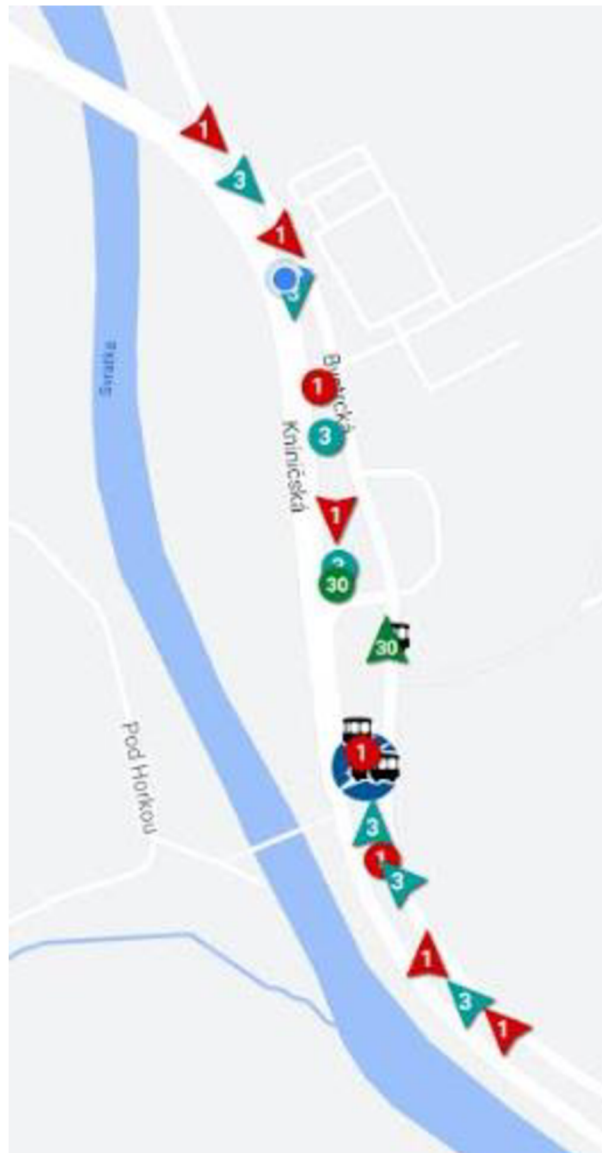
1.4.1.3 Povětrnostní příčiny

Povětrnostní podmínky pro kolejovou dopravu nejsou takovou hrozbou jako pro dopravu silniční, avšak i přesto existují vlivy počasí, které dokážou zapříčinit zpoždění tramvajové dopravy, a to zejména nutností přizpůsobit jízdu stavu kolejí, popřípadě vozovky. Mezi takové vlivy počasí patří zejména:

- Silný déšť, při kterém se na kolejích, a to zejména na těch vedených v silničním tělese, může hromadit dešťová voda, která snižuje adhezi mezi kolejnicí a kolem a negativně tak ovlivňuje kinematické charakteristiky vozidel a souprav. Krom toho silné dešťové srážky mohou vést ke snížení viditelnosti a nutnosti přizpůsobit jízdu tomuto stavu.
- Sněhové bouře, při kterých může dojít ke vzniku sněhových závějí, které rovněž ovlivňují parametry tření mezi kolejnicemi a koly, ale může rovněž způsobit komplikace s adekvátním fungováním součástí výhybek. Zároveň je sněhová pokrývka komplikací pro cestující při nástupu a výstupu z vozu.
- Mlha, která silně ovlivňuje rozhledové podmínky řidičů vozidel, kteří jsou nuceni uzpůsobit rychlost bezpečné přepravě.
- Extrémně nízké teploty, které jsou doprovázeny několika nebezpečnými jevy, zejména v případě namrzlých kolejnic dochází k výraznému snížení adheze jak mezi tratí a koly, tak i mezi podrážkami cestujících a povrchy zastávek. Dalším nepříjemným jevem výrazně nízkých teplot je namrzání trolejového vedení, a to zejména v nočních hodinách s minimálním provozem na tratích, takováto nepatřičná obálka troleje zabraňuje styku trakčního vedení se stykovou plochou pantografu.
- Extrémně vysoké teploty. Ty s sebou přinášejí riziko tepelného roztažení, a to jak u kolejí, tak i u trakčního vedení, čímž může dojít k narušení geometrie těchto prvků a vzniku nevyžádaných problémů.

1.4.1.4 Problémy s vozidly a infrastrukturou

Zpoždění ale může vzniknout i z důvodu technických problémů jak na vozidlech, tak na infrastruktuře, které pak zpravidla způsobují zpoždění vyšší minutáže, při větších problémech může dojít i k úplnému zastavení provozu v daném úseku trasy nebo odklonu na trasu jinou a v těchto případech, je-li to možné, je nasazena náhradní autobusová doprava.



Obrázek 2: Přerušení provozu tramvajů a trolejbusů mezi zastávkami Kamenolom a Zoologická zahrada z důvodu poškozeného trolejového vedení v místě jeho křížení [6]

1.4.1.5 Konfigurace vozů a zastávek

Zpoždění může vzniknout i nepřiměřeně dlouhým zastávkovým procesem, který může být způsoben také samotnou konfigurací jednotlivých vozů a zastávek. U vozidel hraje důležitou roli jejich úroveň nízkopodlažnosti a šířka nástupních otvorů, zatímco u zastávek je rozhodující zejména výška nástupní hrany. Tyto faktory mohou zpomalit nástup a výstup cestujících a prodloužit tak celkový čas potřebný pro obsluhu zastávky.

1.4.1.6 Zajištění přestupních vazeb

MHD je komplexní systém zahrnující několik dopravních módů v rámci dopravního podniku, ale rovněž je úzce spjat s regionálními dopravními systémy veřejné dopravy. U některých spojů je pak v některých místech garantována návaznost na spoje MHD i veřejné dopravy, a je-li takovýto přípojný spoj zpožděn, je zpoždění přeneseno dále.

Typickým příkladem přestupních vazeb, co se tramvají týče, je takzvané malé spojení v rámci uzlu Hlavní nádraží, kde se v jisté stanovené časy setkávají tramvaje linek 1, 4 a 8, které zde, za předpokladu tolerovaných zpoždění, čekají i po čase odjezdu dle JŘ.

1.4.1.7 Zpoždění způsobená iracionálním chováním cestujících

Nezřídkakdy je příčinou zpoždění chování samotných cestujících. Typickou příčinou je čekání na dobíhající pasažéry, nahromadění cestujících u jedné dveří nebo nástup osob s omezenou schopností pohybu, jako jsou například maminky s kočárky, do tramvají, které nejsou nízkopodlažní.

1.4.2 Náskok

Náskok, nebo též nadjetí, je situace, kdy vozidlo opustí výchozí místo před časem svého odjezdu. Dle pokynů DPMB je však tento způsob jízdy zakázán, respektive povolen pouze na výjimku dispečera. [7, s. 10]

2 ZPŮSOBY ELIMINACE ZPOŽDĚNÍ

Zpoždění jako takové je ve své podstatě nesoulad mezi dvěma klíčovými vstupy, a to uměle naplánovanou cestovní dobou neboli jízdním řádem a reálnou cestovní dobou. Ideálního systému tak můžeme dosáhnout optimalizacemi na obou stranách této rovnice.

2.1 OPTIMALIZACE JÍZDNÍCH ŘÁDŮ

Tvorba jízdních řádů je velmi komplikovaný proces, který zahrnuje práci s celou řadou vstupních faktorů. Zastávky jsou v itineráři rozděleny do intervalů v násobcích minut, které zohledňují předpokládanou cestovní dobu mezi nimi, ale také předpokládanou dobu na obsluhu dané zastávky.

2.1.1 Systém plus-minus

V rámci jízdních řádů je v drtivé většině případů základní jednotkou času jedna minuta. V rámci dálkové a regionální dopravy je minuta naprosto dostatečným časovým úsekem. V rámci krátkých vzdáleností MHD je však jedna minuta poměrně široký časový úsek, který ne vždycky dokáže odpovídat skutečnému stavu na trasách. V rámci plánování MHD je tedy nutné plánovat velmi efektivně doby mezi zastávkami, aby nedocházelo ke zbytečným zpožděním, nebo naopak k dlouhým čekáním na čas odjezdu v zastávkách.

Zkusme si pro ilustraci popsat jeden případ z Brna. Máme úsek Kubíčkova – Přístaviště – Zoologická zahrada. Průměrná cestovní doba mezi zastávkami Kubíčkova a Přístaviště činí zhruba 1 minutu a 40 sekund, mezi zastávkami Přístaviště a Zoologická zahrada pak 1 minutu a 20 sekund. Před 1.5.2023 byly dle jízdního řádu úseku Kubíčkova – Přístaviště přiděleny 2 minuty jízdní doby, úseku Přístaviště – Zoo minuta jedna. Po otevření tunelu při ulici Žabovřeské a návratu linky 1 na svou původní trasu pak došlo i ke zdánlivě drobné, leč z pohledu plynulosti dopravy významné změně v jízdním řádu, kdy se časové dotace obou úseků zaměnily, z Kubíčkovy na Přístaviště byla vyhrazena 1 minuta, z Přístaviště na Zoologickou zahradu minuty dvě.

V původním rozložení jízdních dob tak tramvaj přijela do zastávky Přístaviště v předstihu a čekala zhruba 20 vteřin do času odjezdu, poté však ze Zoologické

zahrady chtě nechtě odjížděla se zpožděním minimálně dvaceti sekund. V novém rozložení linky odjíždějí s půlminutovým zpožděním již ze zastávky Přístaviště, nicméně v zastávce Zoologická zahrada se časově srovnají a odjíždějí v čase.

Z tohoto důvodu je tedy vhodné plánovat jízdní doby systémem plus-minus, kdy kumulujeme drobná zpoždění během trasy, která se pak v určitém bodě srovnají a vyhneme se tak čekání na čas odjezdu. Výjimkou jsou pak významné zastávky a přestupní uzly zejména v centru města, kde je vhodné vyhradit jisté vyrovnávací doby za účelem pokrytí zpoždění neočekávaně vzniklých na trase, popřípadě zajistit dostatečnou dobu pro obsluhu zastávky.

2.2 OPTIMALIZACE REÁLNÉ CESTOVNÍ DOBY

Optimalizovat můžeme ale i procesy v reálném provozu, čímž zajistíme vyšší spolehlivost dodržování jízdních řádů. Takovou optimalizaci můžeme provést veskrze dvěma způsoby, a to navýšením rychlosti v daném úseku nebo eliminací propadů rychlostí v něm.

2.2.1 Navýšení traťové rychlosti

Navýšení rychlostí v systému se z pohledu platných legislativních předpisů může týkat pouze úseků vedených na samostatných tělesech. Principiálně se jedná o velmi jednoduchou změnu, kdy se navýší stanovená maximální rychlost na daném úseku, a díky vyšší rychlosti je pak kratší jízdní doba. Úprava maximální traťové rychlosti se však vyplatí pouze na delších úsecích, kde je reálné dosažení vyšší rychlosti na delší vzdálenosti.

2.2.2 Odstranění zbytných propadů rychlostí

Kromě traťových omezení rychlostí existují i omezení na specifických prvcích v systému, typicky se jedná o výhybky nebo křížení s jinými drahami, kde v případě možnosti jejich odstranění nebo úprav dojde k časové úspoře.

Kapitolou samou o sobě jsou pak světelně řízené křižovatky, které jsou zdrojem častých čekání na nich. K eliminaci těchto zdržení se nejlépe hodí preferenční systémy v rámci řízení křižovatek, jejichž aplikace však vyžaduje komplexní pohled na křižovatku a její okolí, neboť absolutní preference MHD by v jistých případech teoreticky mohla potencovat dopravní kolaps IAD.

3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU BRNĚNSKÉHO TRAMVAJOVÉHO SYSTÉMU

3.1 RYCHLOST TRAMVAJOVÉ DOPRAVY

Průměrná cestovní rychlost tramvají na jednotlivých linkách je ovlivněna působením řady faktorů, zejména se jedná o infrastrukturu, kolejové uspořádání, hustotu zastávkové sítě a vozový park.

Tabulka 1: Průměrné cestovní rychlosti tramvají v ČR [8]

Rok	2021	2022	2023
Most a Litvínov	26,67	26,54	22,50
Ostrava	23,31	23,34	23,49
Liberec a Jablonec	21,04	20,97	20,97
Plzeň	20,02	20,02	20,30
Brno a Modřice	19,72	19,83	20,00
Praha	19,35	19,24	19,31
Olomouc	17,30	17,80	17,33

Tabulka č. 1 zohledňuje průměrné cestovní rychlosti v jednotlivých tramvajových systémech v České republice, a to zprůměrováním cestovních rychlostí na jednotlivých linkách, které byly vypočítány prostým podílem délky linky a cestovní doby dle jízdního řádu prvního spoje zařazeného po sedmé hodině ranní, tedy bez započtení případných zpoždění a významnosti linek. [8]

Z tabulky č. 1 je pak jasně patrné, že nejvyšších cestovních rychlostí je dosaženo v mostecko-litvínovském a ostravském systému, kde se průměrné rychlosti pohybují nad hranicí 23 km/h. Brněnský systém je pak dle rychlostí srovnatelný se systémy v Liberci a Jablonci nad Nisou, Plzni a Praze. Nejpomalejší tramvajovou dopravu pak vykazuje systém v Olomouci.

Pokud se dále podíváme na složení jednotlivých tramvajových systémů z pohledu typu jejich vedení zjistíme, že existuje jistá souvislost mezi typem vedení trati

a průměrnou rychlostí, již je v systému dosaženo. Pod typ A v tabulce č. 2 jsou zařazeny úseky tratí, které jsou vedeny na samostatném nebo sdruženém tělese, přičemž není umožněn pojezd individuální automobilové dopravy po nich, pod typem B jsou započítány úseky, které jsou součástí pozemních komunikací, ale tramvajová doprava je vedena oddělenými pásy, typ C pak zahrnuje ty části tramvajové dráhy, kde jsou trajektorie tramvají a automobilů vedeny společnou stopou.

Tabulka 2: Procentuální zastoupení vedení tramvajových tratí

Typ vedení	Brno-Modřice	Ostrava	Olomouc	Most-Litvínov	Liberec-Jablonec	Plzeň	Praha
Typ A	51 %	67 %	32 %	90 %	56 %	44 %	44 %
Typ B	36 %	32 %	58 %	7 %	7 %	47 %	32 %
Typ C	13 %	1 %	10 %	3 %	38 %	8 %	24 %

Při porovnání průměrných rychlostí a procentuálního zastoupení typů uspořádání tramvajových tratí, tedy zejména procentuálního zastoupení úseků na samostatných tělesech je patrná přímá souvislost mezi těmito parametry. Tedy vyšší zastoupení úseků na samostatných tělesech přináší potenciál vyšší průměrné rychlosti celého systému. Ostravský a mostecko-litvínovský systém, které mají nejvyšší zastoupení tratí typu A pak rovněž dosahují nejvyšší průměrné rychlosti, naopak systém olomoucký s nejnižším podílem těchto tratí vykazuje průměrnou rychlost nejnižší.

3.1.1 Rychlost tramvajové dopravy v Brně

Tabulka 3: Průměrné cestovní rychlosti linek v červnu 2023 [9]

Linka	Výchozí směr	Rychlost (km/h)
1	Řečkovice – Ečerova	21,81
2	Stará osada – Modřice, smyčka	19,68
3	Stará osada – Rakovecká	19,32
4	Tomkovo náměstí (X) – Náměstí Míru	15,83
5	Štefánikova čtvrť – Ústřední hřbitov, smyčka	16,52
6	Královo Pole, nádraží – Starý Lískovec, smyčka	19,43
7	Starý Lískovec, smyčka – Zemědělská	9,35
8	Mífkova – Nemocnice Bohunice	23,58
9	Čertova Rokle – Juliánov	16,05
10	Stránská skála – Vozovna Komín	19,50
12	Komárov – Technologický park	17,19

Nejrychlejšími linkami v Brně jsou linky 8 a 1, a to především z důvodu, že na významném úseku své délky jsou vedeny na samostatném tělese. Naopak linky s nejnižší cestovní rychlostí jsou linky 4 a 9, které se pohybují zejména na úsecích společných s IAD, ale také jako jediné dvě linky projíždí úsek Česká – Náměstí Svobody – Zelný trh – Hlavní nádraží, kterýžto je pěší zónou a rychlost je zde omezena na 20 km/h.

3.2 UMÍSTĚNÍ TRAMVAJOVÉ TRATI

Tramvajová doprava má jednu obrovskou výhodu oproti jiným druhům dopravy, a sice dokáže kombinovat trasy v ulicích měst a na samostatných oddělených tělesech. Každá z těchto variant má své specifika a výhody i nevýhody. Dle normy ČSN 73 6405 Projektování tramvajových tratí [10] se umístění tratí dělí do následujících kategorií.

3.2.1 Tramvajová trať na samostatném tělese

Tramvajové tratě na samostatném tělese mají svršek a spodek tramvajové trati, popřípadě mostní konstrukce [10]. Tento způsob umístění umožňuje maximální využití potenciálu rychlé tramvajové dopravy.

3.2.2 Tramvajová trať na sdruženém tělese

Tramvajové tratě na sdružených tělesech mají trasu souběžnou s jinou komunikací, konstrukčně jsou ale stejné jako tramvajové tratě na samostatném tělese. V případě stísněných poměrů však mohou s přilehlou komunikací sdílet část infrastruktury, jako je například odvodnění. [10]

3.2.3 Tramvajová trať jako součást pozemní komunikace

Spodek tramvajové trati tohoto druhu je nahrazen tělesem pozemní komunikace. Tramvajové trati se přednostně navrhují ve středu pozemní komunikace, v případech nedostatečných šířkových poměrů pak mohou být tyto tratě uzpůsobeny pojiždění IAD [10].

3.2.3.1 Tramvajové tratě situované na zvýšeném pásu

Jedná se o preferované řešení z pohledu plynulosti tramvajové dopravy v rámci města. Jsou fyzicky odděleny od nekolejové dopravy, a to obrubami o výšce minimálně 120 mm [10].

3.2.3.2 Tramvajové tratě situované v úrovni vozovky

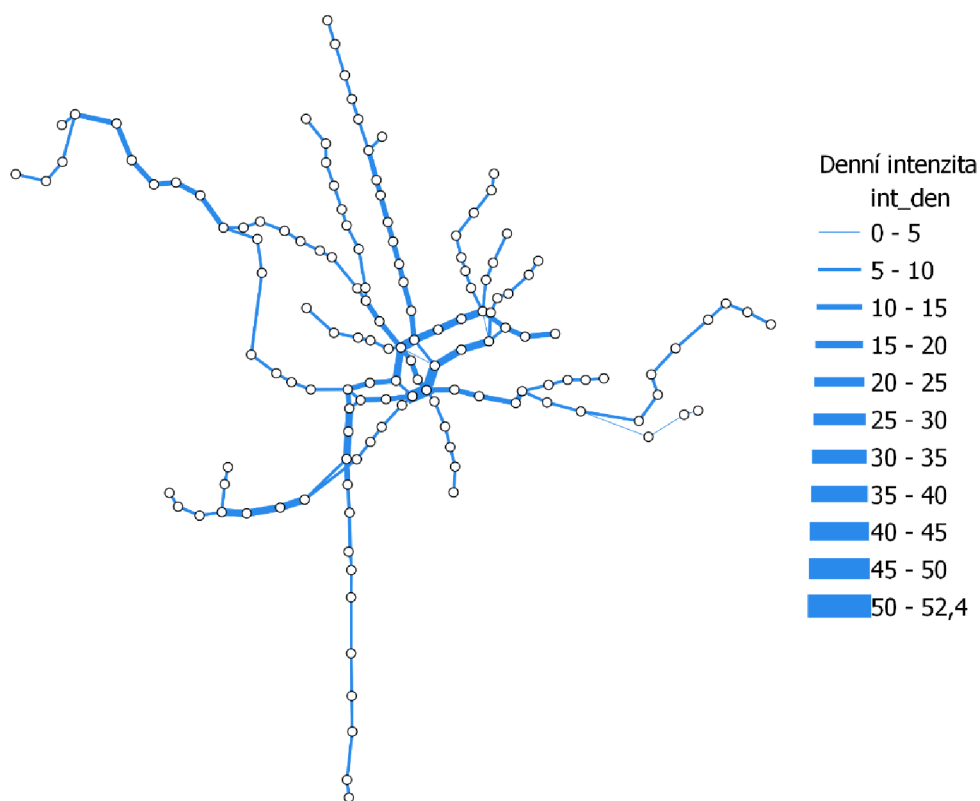
Tyto tratě se umísťují přednostně do středu pozemní komunikace, a dovolí-li to místní podmínky, jsou tyto tratě odděleny vodorovným dopravním značením [10].

3.2.3.3 Tramvajová trať situovaná v komunikaci bez výškového členění

Je-li tramvajová trať umístěna v pěší zóně nebo v zóně zklidněné, kde nejsou zvýšené chodníky, musí být tato trať včetně celého průjezdného profilu oddělena hmatovými prvky tak, aby byla zajištěna bezpečnost osob s omezenou schopností orientace v těchto úsecích [10].

3.3 INTENZITA TRAMVAJOVÉ DOPRAVY

Tramvajová doprava v Brně je v určitých úsecích součástí komunikací, které sdílí s individuální automobilovou dopravou, z čehož plynou jistá omezení v plynulosti provozu. Nicméně však může docházet i k situacím, kdy jsou překážkami spojů jiné tramvajové vozy, neboť intenzita tramvají je v některých oblastech velmi vysoká.

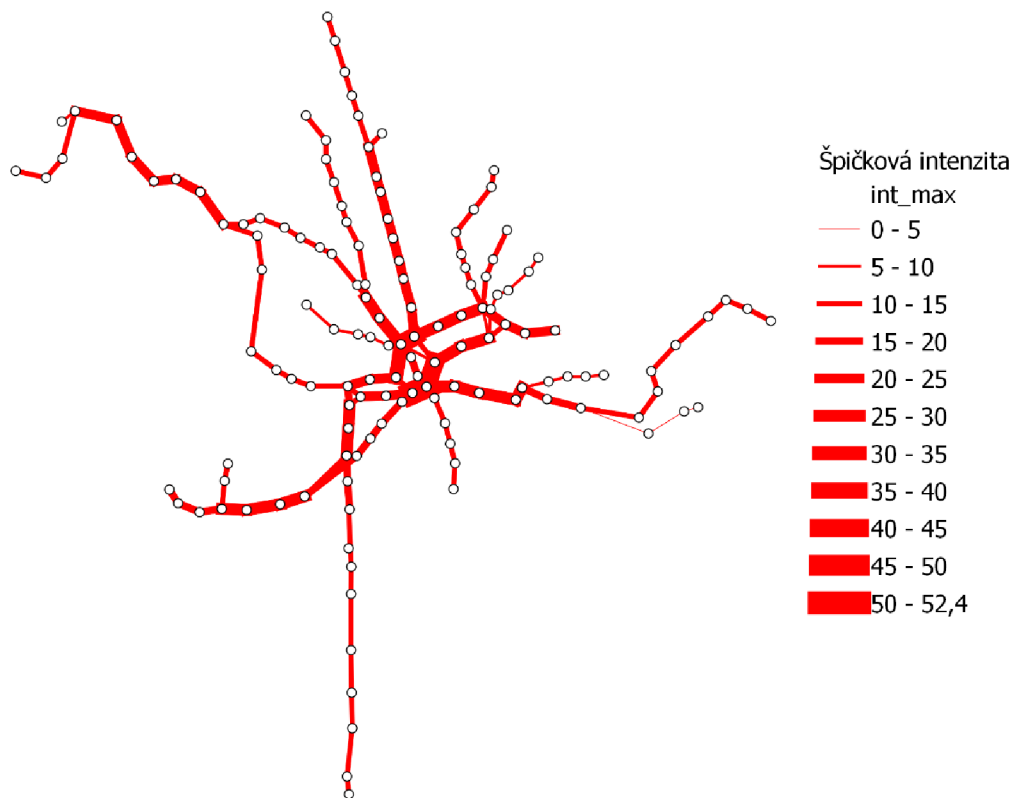


Obrázek 3: Celodenní hodinová mezizastávková intenzita tramvajové dopravy [11]

Pokud budeme posuzovat intenzitu linkové tramvajové dopravy v profilech mezi zastávkami, můžeme jasně identifikovat místa, ve kterých dochází k vysoké koncentraci vozů a souprav, které si mohou navzájem být překážkou. Nejvyšší průměrnou hodinovou intenzitu za běžný pracovní den v profilu v jednom směru pozorujeme v úsecích mezi zastávkami:

- Malinovského náměstí – Hlavní nádraží – 24,00 voz/hod (resp. 24,17 voz/hod v opačném směru)
- Česká – Moravské náměstí – 24,21 voz/hod (resp. 24,21 voz/hod)
- Hlavní nádraží – Nové sady – 28,71 voz/hod (resp. 28,67 voz/hod)

V takto frekventovaných mezizastávkových úsecích pak může dojít k optimalizaci kolejového vedení, jako například úsek Hlavní nádraží – Nové sady, na němž je tramvajová doprava rozdělena na čtyři koleje. Rovněž v úseku Hlavní nádraží – Malinovského náměstí existuje jistý ulehčující prvek, a to bloková smyčka okolo paláce Morava, na níž jsou trasovány linky směřující z Hlavního nádraží směrem k zastávce Körnerova. Naopak s výjimkou organizace nástupišť žádná takováto optimalizace nenastává v úseku Česká – Moravské náměstí, který je tak mezizastávkovým úsekem s největší reálnou intenzitou tramvajové dopravy, z čehož plynou komplikace s případným blokováním průjezdu tramvajových vozů navzájem. Tato situace je částečně kompenzována nastavením světelné křižovatky Moravské náměstí, která jde vstříc efektivnímu řízení sledu vlaků tak, aby nedocházelo k blokování průjezdu linek samotným rozmístěním nástupišť v uzlu.



Obrázek 4: Špičková hodinová intenzita tramvajové dopravy [11]

Situace s vysokou intenzitou je pak umocněna i faktorem špičkového provozu. Pakliže si z denní nabídky spojů vyfiltrujeme jen ty, které jsou uskutečněny mezi 6:30 až 8:30 a 14:30 až 17:30 dostáváme se na intenzity ještě vyšší, a to konkrétně v úsecích:

- Česká – Šilingrovo náměstí – 34,4 voz/hod (resp. 35 voz/hod ve směru opačném)
- Česká – Moravské náměstí – 40,6 voz/hod (resp. 40,4 voz/hod)
- Malinovského náměstí – Hlavní nádraží – 43,4 voz/hod (resp. 43,2 voz/hod)
- Hlavní nádraží – Nové sady – 52,4 voz/hod (resp. 51,6 voz/hod)

Laicky řečeno pak například v úseku Česká – Šilingrovo náměstí projede profilem v jednom směru během špičkových hodin tramvajový vůz každé dvě minuty, v úseku Hlavní nádraží – Nové sady pak téměř jeden vůz za jednu minutu.

Kapacita na hranici únosnosti v těchto úsecích pak znemožňuje trasování dalších linek těmito úseky a je tak nasnadě budování nového kolejového vedení a následného trasování linek mimo zmíněné oblasti. Na tento fakt je pohlíženo

i v připravovaném územním plánu města Brna, kde jsou navrženy nové tangenciální trasy, které míjí širší centrum města Brna. [12]

3.4 ZPOMALUJICÍ PRVKY V SYSTÉMU

Z fyzikálních a bezpečnostních důvodů existují v systému tramvajové dopravy místa a úseky, v nichž je maximální rychlost souprav v provozu omezena. Z pohledu jejich délky můžeme tato omezení rozdělit do dvou kategorií, a sice omezení úseková a omezení bodová.

3.4.1 Úseková omezení

Úseková omezení mají vzhledem k celkovému rozsahu systému nezanedbatelnou délku a mohou být určena dvěma způsoby dle toho, jestli se souprava nachází na samostatném tělese, nebo je součástí silničního provozu. V úsecích zcela segregovaných od IAD jsou rychlostní omezení dána traťovými rychlostmi, jež jsou stanovena návěstmi, které jsou součástí návěstní soustavy DPMB [5]. Naopak v místech, kdy je tramvajová doprava součástí pozemních komunikací společně s individuální automobilovou dopravou, jsou pak rychlosti stanoveny dle zákona č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů.

3.4.1.1 Bezpečnostní rychlostní omezení

Tato omezení bývají zpravidla upravena traťovou rychlostí, což je návěst udávající maximální povolenou rychlost v úseku. Účelem těchto omezení je bezpečný průjezd těchto úseků. Může se jednat například o úseky s nedostatečnými rozhledovými podmínkami, ale i o úseky s nevyhovujícím stavem tratí.

3.4.1.2 Oblouky

Více specifickými rychlostními omezeními jsou omezení platná po délkách oblouků, zejména těch s malým poloměrem. Ty se nacházejí zejména v husté zástavbě v centru města a v křižovatkách.

Cílem těchto rychlostních omezení je zabezpečit bezpečný průjezd tramvajových vozů a souprav obloukem a minimalizovat riziko vykolejení vozů. Průjezd vysokou rychlostí ostrým obloukem totiž vede k vytvoření výrazně nesouměrnému tlaku

vyvinutému na kolejnice, který vede k nestabilitě a riziku vykolejení soupravy či vozu.

Takováto omezení jsou označena návěstí s rychlostí, která je vhodná pro bezpečné projetí oblouku. Nicméně je rovněž nutné přizpůsobit rychlost aktuálnímu stavu kolejového svršku, stejně jako je důležité udržet předepsanou rychlost celou délkou soupravy.

3.4.1.3 Zónová omezení

Jak již bylo zmíněno, tramvajová doprava je často součástí silničního provozu, a v těchto úsecích se tak musí řídit zákonem č. 361/2000 Sb. O provozu na pozemních komunikacích a změnách některých zákonů. Omezení vyplývající z dopravního značení pozemních komunikací je tak při pohybu soupravy na nich závazné i pro tramvajové vozy a soupravy.

Z těchto důvodů je pak rychlost tramvají při jízdě po pozemní komunikaci omezena zejména maximální rychlostí v obci, jež je zákonem stanovena na 50 km/h. Dále ale může být rychlost upravena místní úpravou, která reaguje na specifické podmínky v daném úseku.

Typickými příklady omezení v Brně jsou:

- pěší zóna v úseku Česká – Náměstí Svobody – Zelný trh – Hlavní nádraží s maximální rychlostí 20 km/h.
- Zóna 30 v okolí historického centra.
- Úsek mezi zastávkami Jugoslávská a Zdráhalova, kde je místním značením upravena maximální rychlost na 30 km/h z důvodu školního zařízení.

3.4.1.4 Podmíněná zónová omezení

Kromě výše zmíněných trvalých omezení se v brněnském tramvajovém systému vyskytují i omezení, která jsou stanovena speciální návěstí a jejich platnost je určena ohraničeným časovým úsekem nebo vyhlášením výjimečného stavu.

Prvním z těchto omezení je omezení rychlosti na 40 km/h v nočních hodinách tak, aby byla omezena hlučnost tramvajové dopravy během nočního klidu, a to v místech, kde tramvajová trať vede v blízkosti obytné zástavby.

Dalším takovým omezením je návěst teplotního omezení se zobrazeným písmenem T, která omezuje maximální rychlost na takto označeném úseku na 40 km/h a to v případě, kdy je tento stav vyhlášen dispečinkem. Nejčastěji je tento stav vyhlášen při vysokých teplotách vzduchu, kdy může z důvodu tepelné roztažnosti kovu dojít ke změnám v geometrii koleje i trolejového vedení.



Obrázek 5: Návěst s podmíněným zónovým omezením za zastávkou Podlesí [13]

3.4.2 Bodová omezení

Bodová omezení jsou taková omezení, jejichž celková délka se pohybuje v řádech nižších jednotek metrů a z pohledu celkové délky systému je jejich délka nevýznamná. Nicméně maximální rychlost pro ně určená musí být dodržena celou délkou soupravy.

3.4.2.1 Výhybky

Výhybky jsou jednou ze základních funkčních součástí efektivního systému tramvajové dopravy. V brněnském systému můžeme identifikovat veskrze 3 druhy výhybek.

Tou první je výhybka elektrická. Tohoto typu se využívá zejména u rozjezdových výhybek. Její jazyky jsou ovládány elektromotory, které se spínají na základě signálu z vozu a přestavují jazyky do potřebné polohy, kterou je ale nutné řidičem vozu před průjezdem ověřit.

Drtivá většina sjezdových výhybek je pak řešena formou mechanických výhybek. Při sjíždění totiž není potřebné jazyky přestavovat do správné polohy, neboť k přestavení výhybky lze využít samotného průjezdu vozidla, slangově výhybku

řezat. Výjimkou je pak ale mechanická výhybka zajištěná proti přestavění, v Brně se taková výhybka nachází v blízkosti zastávky Kotlanova a je zabezpečena zámkem proti přestavění [7, s. 19].

Specifickou kategorií jsou pak výhybky rychlostní, u nich je přestavění průjezdem zakázáno, neboť jsou zde jazyky výhybky stavěny elektromotorem a jejich případné přestavění průjezdem by mohlo způsobit poškození stavěcího mechanismu. U tohoto typu výhybek je tedy zapotřebí dbát zvýšené opatrnosti při kontrole návěstidla potvrzujícího správné nastavení jazyků výhybky.

Samotné výměny standardních výhybek lze projet čtyřmi způsoby, z nichž každý z nich má vlastní omezení rychlosti. Rychlost soupravy nesmí být vyšší než: [14, s. 15]

- 10 km/h, při jízdě tramvají proti hrotu jazyku výhybky postavené do odbočky
- 15 km/h, při jízdě tramvají proti hrotu jazyku výhybky postavené do přímého směru
- 15 km/h, při jízdě tramvají po hrotu jazyku výhybky z odbočky
- 30 km/h, při jízdě tramvají po hrotu jazyku výhybky z přímého směru

Speciální kategorií jsou pak výhybky splítkové, na celé jejich délce je maximální průjezdní rychlost vozidla stanovena na 15 km/h.

3.4.2.2 Kolejová křížení

Kolejová křížení, do kterých se řadí i srdcovky výhybek, lze projíždět dvěma způsoby, kde rychlost soupravy nesmí být vyšší než: [15, s. 15]

- 15 km/h, při jízdě tramvají přes srdcovku výhybek a křížení v oblouku
- 30 km/h, při jízdě tramvají přes srdcovku výhybek a křížení v přímce

3.4.2.3 Úsekové děliče a křížení s jinými drahami

Pro efektivní a spolehlivou energetickou distribuci je síť trakčního vedení rozdělena do úseků, kteréžto jsou rozděleny jednoduchými mezerami v trakčním vedení. Řidiči tramvají pak musí tyto krátké úseky projíždět takzvaným výběhem, tedy bez zadané akcelerace vozu.

Úsekové děliče se ale využívají i při křížení s jinými drahami, v Brně tedy zejména při křížení s trolejbusovým trakčním vedením. V tomto případě je kromě

povinného průjezdu výběhem ještě stanovena maximální rychlost průjezdu, a to konkrétně na 30 km/h tak, aby bylo zabráněno případnému poškození křížení trakčního vedení.

3.4.3 Zastávky

Z pohledu celkové jízdní doby linek tramvajové dopravy je kromě času, kdy je tramvaj v pohybu, nezanedbatelný i čas, který tramvaje stráví obsluhou zastávek. Tento čas nelze přesně určit, neboť je determinován aktuální situací v zastávce v daném okamžiku.

I přesto lze ale najít jisté souvislosti, a to zejména v oblasti výšky nástupních hran jednotlivých zastávek. Dopravní podnik města Brna dělí podle jejich úrovně bezbariérovosti zastávky na čtyři kategorie: [16]

- Bezbariérová nástupiště (typ BB), což jsou nástupiště s nájezdovými rampami, kde výška nástupní hrany parametricky odpovídá normě a vysunutá plošina z tramvaje má předepsaný sklon. Taková nástupiště jsou pak příjemnější i pro nástup cestujících bez omezené schopnosti pohybu [16].
- Nízká nástupiště (typ NN), což jsou nástupiště s nájezdovými rampami, ale s nízkou nástupní hranou. Pro výstup a nástup je na vlastní nebezpečí možné využít plošinu vozu, nicméně její sklon je strmější než normou stanovený sklon a k jeho bezpečnému překonání je doporučeno cestování s průvodcem [16].
- Vysoká nástupiště (typ VN), což jsou nástupiště s nájezdovými rampami, ale s vysokou nástupní hranou, přičemž však není možné vysunutí plošiny. Nástup a výstup je možný bez jejího užití, avšak je zapotřebí na vlastní nebezpečí překonat mezeru mezi hranou nástupiště a vozem [16].
- Zastávky bez nástupních ostrůvků (typ VO), tedy zastávky s výstupem do vozovky, což jsou zastávky, na nichž není možný nástup a výstup za pomoci plošiny, rovněž se jedná o zastávky z pohledu provozu nejméně bezpečné, neboť zde dochází ke vstupu cestujících na pozemní komunikaci, na nichž mimo obsluhu zastávky probíhá normální provoz [17].

Tabulka 4: Zastoupení jednotlivých druhů nástupišť

Typ nástupiště	Počet k 1.5.2023 [16] [17]	Procentuální zastoupení
Bezbariérová nástupiště	185	63 %
Nízká nástupiště	61	21 %
Vysoká nástupiště	6	2 %
Zastávky bez nástupních ostrůvků	41	14 %

Z tabulky č. 4 je zřetelné, že většina zastávek v systému je bezbariérově řešena, zastávky bez nástupních ostrůvků se pak vyskytují zejména v některých konkrétních úsecích: [17]

- Filkukova-Kořískova
- Hybešova-Václavská
- Trávníčkova-Obřanský most (s výjimkou zastávek Tomkovo náměstí a Proškovo náměstí)
- Obilní trh-Úvoz
- Červinkova-Nerudova (s výjimkou zastávky Klusáčkova)

A pak také výjimečně soliterně: [17]

- Rybkova ve směru do centra
- Králova
- Rosického náměstí ve směru Vozovna Komín
- Jugoslávská pod Lesnickou

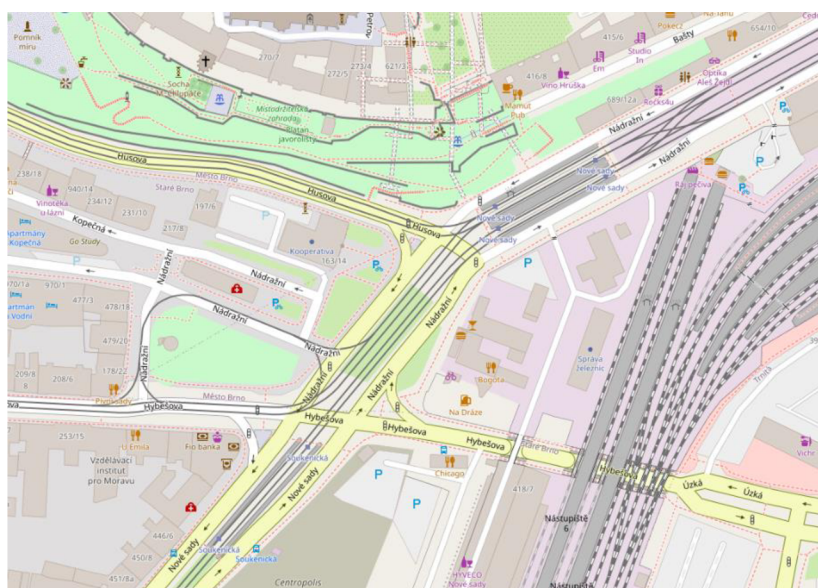
Samotná bezbariérovost zastávek však nemusí znamenat možnost bezbariérového nástupu do každého spoje, neboť část, v dnešní době již menšinová, spojů je zajišťována vozy, které nejsou nízkopodlažní, tedy zejména soupravami tramvajů typů T3 a T6A5.

3.5 MÍSTA S VYSOKOU FREKVENČÍ VZNIKU ZPOŽDĚNÍ

V brněnském systému se nachází úseky, ve kterých dochází k pravidelně se opakujícímu vzniku zpoždění. Tyto úseky byly identifikovány na základě statistiky v aplikaci Pohyb vozidel MHD vytvořené Kanceláří architekta města Brna [9].

3.5.1 Úsek Nové Sady – Hybešova/Soukenická

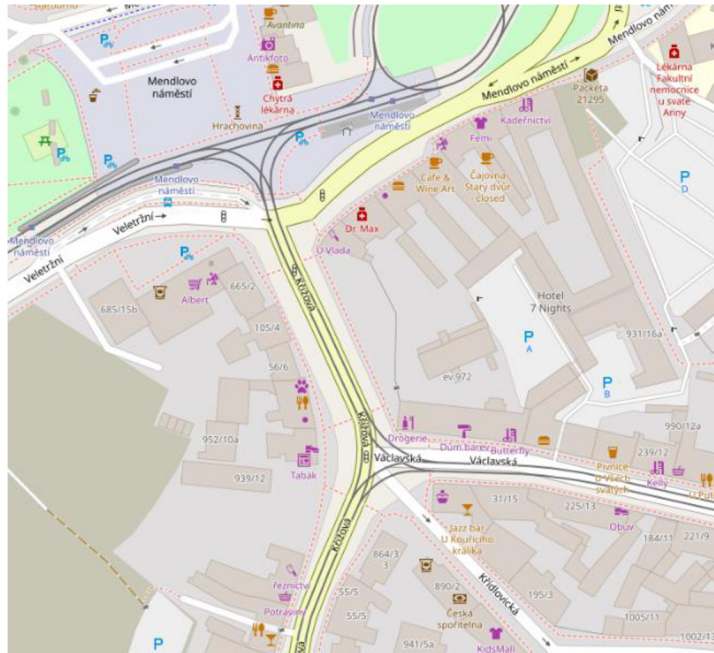
Příčinou často vznikajících zpoždění je velmi frekventovaná komplexní křižovatka ulic Nádražní, Nové Sady, Hybešova a Husova. Linky jedoucí ve směru Nové Sady – Soukenická překonávají dvojici světelně řízených křižovatek, linky ve směru Nové Sady – Hybešova pak kromě dvou světelných křižovatek mají svou dráhu zkomplikovanou kolejovými rozvětvenými souvisejícími jednak s odbočením ve směru ulice Husovy, ale taktéž kolejovými rozvětvenými souvisejícími se smyčkou Nové Sady.



Obrázek 6: Uzel Nové sady [18]

3.5.2 Úsek Mendlovo náměstí – Václavská/Poříčí

Příčinou nerovnoměrnosti jízdních dob v tomto úseku je opět vysoce frekventovaná dvojice světelně řízených křižovatek umocněná faktorem spojení několika linek, konkrétně 1, 5 a 6, na jedné trati a s tím související potencionální blokování průjezdů linek.



Obrázek 7: Uzel Mendlovo náměstí [18]

3.5.3 Úsek Česká – Grohova/Moravské náměstí/Šilingrovo náměstí

Uzel Česká je spolu s uzlem Hlavní nádraží nejfrekventovanějším komplexem zastávek. Na rozdíl od Hlavního nádraží však v uzlu Česká není možné rozřazovat jednotlivé linky na vícero nástupišť dle jejich tras a vzájemné blokování průjezdů linek je zde na denním pořádku.

Prvním podúsekem tohoto velkého komplexu je úsek mezi zastávkami Česká a Grohova, který se týká linek 3, 10 a 12. Ve směru Česká – Grohova je příčinou zpoždění zejména světelná křižovatka ulic Veverí a Žerotínovo náměstí mezi budovami Krajského úřadu Jihomoravského kraje a Ústavního soudu České republiky. Ve směru opačném pak do hry vstupuje i faktor organizace samotného uzlu, kdy zejména linky 3 a 10 mohou nabrat zpoždění samotným průjezdem uzlu.

Druhým podúsekem s častým přírůstkem zpoždění je úsek Česká – Moravské náměstí. Zde jsou tyto přírůstky způsobeny jak vysokou frekvencí tramvajových linek v uzlu, tak i samotnou světelně řízenou křižovatkou mezi ulicemi Moravské náměstí a Rooseveltova, tato křižovatka není jako mála v celém systému řízena signalizační návěstní soustavou (čočkami), nýbrž klasickou silniční světelnou signalizací, což má krom jiného za následek i to, že v rámci této křižovatky mají chodci překračující silnici na signál volno přednost před tramvajovými vozidly.

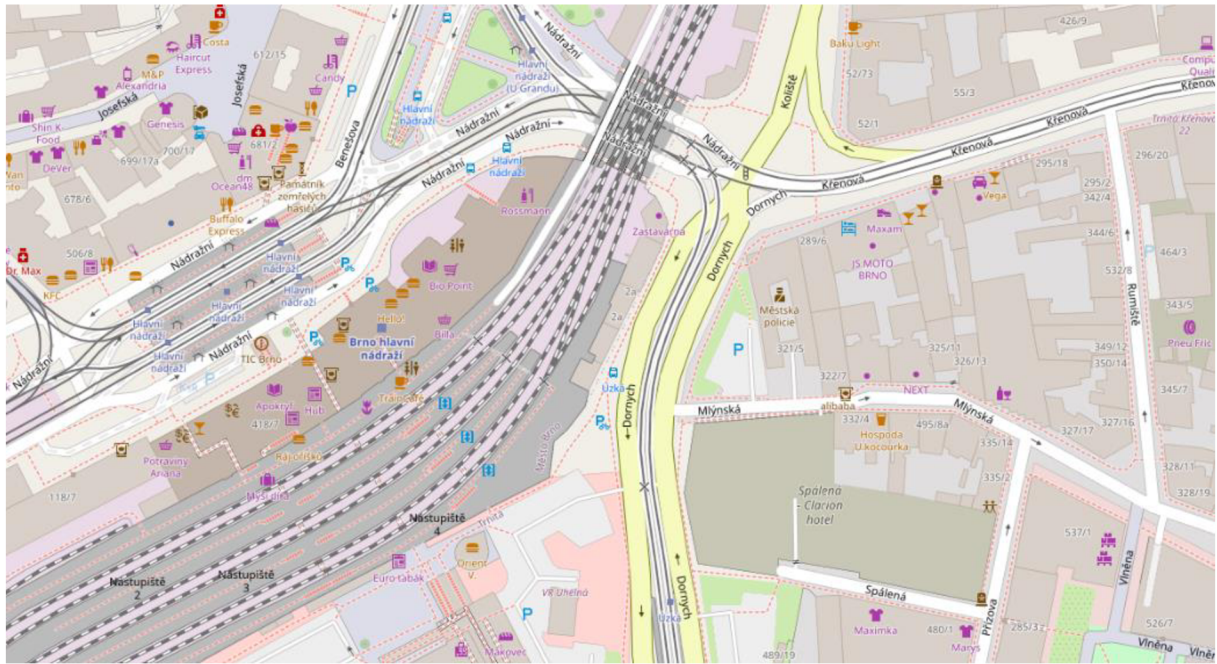
Posledním z kritických podúseků je trasa mezi zastávkami Česká a Šilingrovo náměstí. Největší komplikace v dodržování jízdních dob zde způsobuje dvojice světelných křižovatek. Tou první je křižovatka ulic Komenského náměstí a Joštova, tou druhou je pak křížení ulic Husova a Pekařská. Jelikož se obě křižovatky nachází na takzvaném malém městském okruhu, je zde nemožné nebo minimálně velmi obtížné nastavení preferencí pro tramvajovou dopravu a průjezdní doba tohoto úseku je spíše otázkou náhody než kalkulu.



Obrázek 8: Uzel Česká [18]

3.5.4 Úsek Hlavní nádraží – Vlhká/Úzká

K častému vzniku zpoždění dochází ale i ve druhém z nejméně frekventovaných uzlů v Brně, a sice v rámci zastávky Hlavní nádraží. Nejkritičtějšími úseky jsou pak úseky mezi zastávkami Hlavní nádraží – Vlhká a Hlavní nádraží – Úzká. Hlavní příčinou zpoždění je zde velmi frekventovaná a pro tramvaje velmi málo propustná křižovatka ulic Nádražní, Křenová a Dornych. Ve směru Úzká se tato křižovatka týká linky 12, ve směru Vlhká pak linek 8, 9 a 10. Jelikož se jedná o jednu z vůbec těch nejméně frekventovaných křižovatek v celém Brně, jsou zde zcela vyloučené preference městské hromadné dopravy, což často vede k průjezdu pouze jedné soupravy při signálu volno a není výjimkou, že může dojít k vytvoření kolony tramvajových vozů v prostoru před touto křižovatkou.



Obrázek 9: Hlavní nádraží – Úzká/Vlhká [18]

4 ZRYCHLUJICÍ OPATŘENÍ

4.1 BENEFITY ZRYCHLOVÁNÍ DOPRAVY

Zkrácení cestovní doby zvýšením rychlosti nebo odstraněním její propadů v daném úseku s sebou přináší jistou časovou rezervu, kterou lze využít k zvýšení kvality dopravního systému několika možnými přístupy.

V případě významné časové rezervy se otevírá možnost revize jízdních řádů s cílem zkrácení cestovních dob pro cestující. Dosáhnout významných časových úspor mezi jednotlivými zastávkami je však náročné, a tak by takováto úprava měla být zvažována pouze v případě, kdy by došlo k výraznému zvýšení rychlostí na úseku zahrnujícím několik zastávek.

Alternativním přístupem je pak ponechání nabyté časové úspory v rámci stávajícího jízdního řádu a její využití ke krytí případných nabytých zpoždění nebo k vytvoření flexibilnějšího času pro obsluhu zastávky. Tím může být dosaženo například pohodlnějších přestupů mezi linkami v rámci systému městské hromadné dopravy. Obecně vzato tento přístup umožňuje využití časové rezervy k eliminaci nahodilých faktorů, které ovlivňují fungování dopravního systému.

Zkrácení jízdních dob, méně četná zpoždění, ale i pohodlnější časové poměry v rámci přestupních vazeb jsou faktory, které mohou do tramvajového dopravního systému přilákat nové cestující, stejně jako udržet ty stávající.

4.2 OPATŘENÍ NA ÚROVNI TRAMVAJOVÉ DRÁHY

4.2.1 Geometrie trati

Základním předpokladem městské rychlodráhy je geometrie dráhy. Ta je však v drtivé většině situací determinována již existující zástavbou a nenabízí se tedy prostor pro rychlostně ideální vedení dráhy. Nejdotčenějšími lokalitami jsou především historické lokality s úzkým uličním profilem, kde je nutné volit oblouky velmi malých poloměrů. Větší volnost pak nabízí okrajové a satelitní oblasti, kde hustota zástavby není tak hustá. Zcela ideální situace pak nastává v okamžiku, kdy je dráha plánována současně s novou zástavbou nebo v předstihu, a ne až po ní.

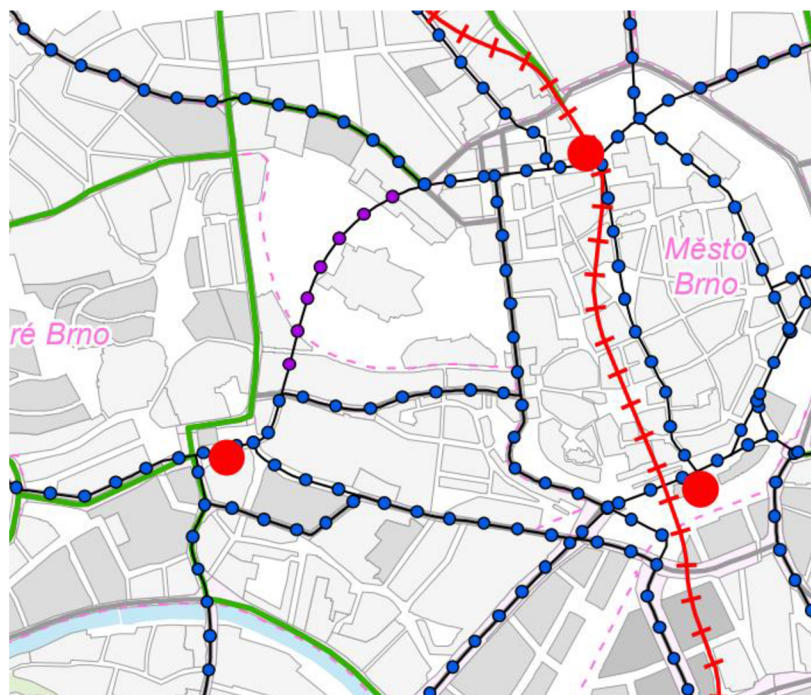
4.2.1.1 Přeložení tramvajových tratí

Existují však i tendence v městském plánování, kdy může dojít k přeložení původní trasy do nového vedení, které s sebou může přinést benefit zvýšení průjezdní rychlosti úseku. Vhodným příkladem je například již realizovaná přeložka tramvajového tělesa z ulice Dornych do ulice Plotní. Zde došlo kromě napřímení trasy trati rovněž k jejímu odloučení od IAD, což má za následek mimo jiné kvalitnější propojení autobusového nádraží Zvonařka s centrem města Brna.

Se změnami vedení tras kolejí se ale počítá i v připravovaném územním plánu města Brna. Jedná se o přesun trati v oblasti tzv. černovického trojúhelníku, tedy v oblasti masivního železničního rozvětvení. Díky této změně by se linky směřující do Líšně a ke Stránské skále mohly vyhnout obloukově velmi komplikovanému úseku v okolí zastávek Životského a Geislerova. [19]

Vytvořením územní rezervy v rámci připravovaného územního plánu však nebyla opuštěna ani myšlenka ze 70. let minulého století o rychlém propojení centra se Starým Brnem, a to tunelem pod hradem Špilberk, do kterého by byla přeložena tramvajová doprava z ulice Pekařské. Ta je totiž z kapacitních, sklonových a obloukových poměrů pro tramvaj velmi náročným úsekem. Od projektu bylo v roce 1979 nakonec upuštěno z neznámých důvodů [20].

Kousek od tohoto tunelu je pak v územním plánu navržena i další přeložka, nebo v tomto případě spíše nová alternativní trasa, a to konkrétně propojení ulice Hybešova s uzlem Mendlovo náměstí skrze jižní část areálu Fakultní nemocnice u svaté Anny. Tímto opatřením by například vozy a soupravy linky 1 nemusely projíždět obloukem při ulicích Hybešova a Václavská, stejně tak by se vyhnuly křižovatce ulice Václavské s ulicí Křížovou [19].



Obrázek 10: Navržená vedení tramvajových tratí v lokalitě Staré Brno [12]

Obecně vzato je ale změna trasy tramvajové dráhy ekonomicky, časově i organizačně velmi náročná. Za příklad si můžeme vzít zmiňovanou přeložku pouliční dráhy z ulice Dornych do ulice Plotní. Celý soubor staveb na zhruba 1,5 kilometru dlouhém úseku si vyžádala investici bezmála 1,2 miliardy Kč a realizace všech stavebních prací si vyžádala více než 4 roky času [21]. I z těchto důvodů je tak ideálním stavem plánování a vybudování tramvajových drah současně nebo v předstihu budování nové zástavby.

4.2.1.2 Výhodnější dopravní mód

Za zmínku v rámci geometrie trati stojí i možnosti nahrazení stávajících dopravních systémů systémy vyšší kategorie, jako je například nahrazení trolejbusové a autobusové dopravy dopravou tramvajovou, která bude vedena na samostatném tělese, čímž by došlo k navýšení přepravní kapacity, ale potencionálně i ke zvýšení rychlosti MHD v dané lokalitě.

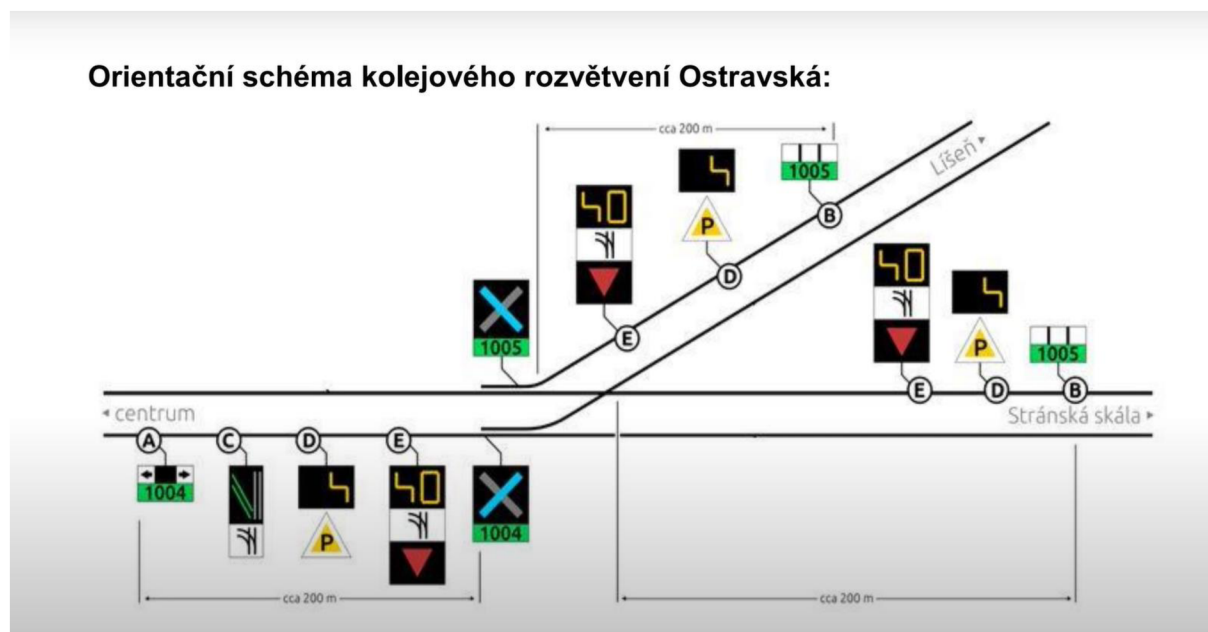
Jedním z příkladů ve městě je Brně je například územní rezerva v rámci připravovaného ÚP v rámci sídliště Vinohrady ve východní části aglomerace, kde by samostatné tramvajové těleso nahradilo exponovanou trolejbusovou dopravu [19].

4.2.2 Systémy a konstrukce rychlého odbočení

Kvalitní systém tramvajové dopravy bezesporu potřebuje kolejová rozvětvení, bez nich by nešla efektivně pokrýt poptávka širokého města. Některá kolejová rozvětvení se ale nacházejí ve výhodných místech trati, kde stojí za zvážení vybudování takzvané rychlostní výhybky.

Rychlostní výhybky jsou speciální kolejové konstrukce, které se výrazně liší od klasických výhybek využívaných na tramvajových tělesech, a to nejen konstrukčně, ale i svou specifickou průjezdní procedurou.

V Brně bylo v roce 2020 uvedeno do provozu první takovéto křížení, a to při ulici Ostravské v městské části Židenice, kde dochází k rozvětvení tramvajové dráhy linky 8, která dále pokračuje ve směru Novolíšeňská, Jírova a Mifkova a linky 10, která směřuje do smyčky Stránská skála. V tomto případě došlo k výměně původních žlábkových kolejnic NT1 za kolejnice 49E1, čímž se celé rozvětvení svou konstrukcí přiblížilo spíše konstrukčním řešením využívaných v klasické železniční dopravě.



Obrázek 11: Schéma rychlostního rozvětvení [22]

Výměna kolejnic ale není vše, co je k rychlostnímu křížení potřeba, dalším z klíčových prvků je zabezpečovací a signalizační soustava. Ta je složena z několika po sobě následujících návěstí, které zaručují bezpečný a rychlý průjezd vozů.

První návěstí (prvky A, respektive B viz schéma) je návěst, která informuje řidiče tramvaje o typu výhybky a poloze jejího snímače. Druhou v pořadí je návěst (prvky C viz schéma) informující řidiče vozidla o proběhnuvším zaregistrování požadovaného směru výhybky, po ní následuje předzvěst s rychlostí (prvek D viz schéma), kterou může řidič očekávat na návěsti poslední (prvek E viz schéma), která určuje maximální rychlost, jíž může tramvaj křížení projet [23]. Tyto návěsti jsou s dostatečnými rozestupy rozmístěny po délce zhruba 200 metrů tak, aby byl řidič schopný v těchto rychlostech případně reagovat na pokyny signalizační soustavy.

4.2.3 Splítkové výhybky

V místech s vysokou intenzitou tramvajové dopravy se u některých rozvětvení využívá takzvaných splítkových výhybek. Jejich princip je veskrze velmi jednoduchý a spočívá v rozřazení souprav na vlastní koleje ve stejné stopě. Jedná se o výhybky, které jsou zpravidla předsunuty před rozvětvení do takové vzdálenosti, kdy nájezd jedné soupravy nebo vozu neznamená nutnost vytvoření rozestupu potřebného k vyslání signálu a samotného přestavení výhybky do požadovaného směru.

Těchto speciálních druhů rozvětvení se využívá zejména u frekventovaných křižovatek s vysokou intenzitou provozu tramvajových vozidel a jejich cílem je tak zvýšení propustnosti těchto křižovatek.



Obrázek 12: Splítková výhybka Vozovna Komín [13]

4.2.4 Zbytná kolejová křížení

Tramvajový systém s vysokou hustotou provozu jako je ten brněnský je plný kolejových rozvětvení a křížení, z nichž mnohá jsou v dnešní době již reliktem minulosti a o jejich potřebnosti by se dalo polemizovat. Polemika nad jejich existencí je především založena na faktoru omezení rychlostí na takovýchto kříženích, která pak snižují průměrnou rychlost celého systému.

V brněnském systému by se do kolejových křížení s potencionální možností zrušení dala zařadit tato křížení:

- Kolejový triangl mezi zastávkami Vozovna Komín, Stránského a Sochorova. Ten se v běžném provozu nevyužívá, jeho přínos v současné době spočívá pouze k odstavování poškozených a závadových souprav a souprav posilových, zejména při událostech v okolí brněnské přehrady. Tyto manipulační procesy lze však přesunout do tramvajové smyčky Komín, která se nachází hned za zastávkou Vozovna Komín ve směru do Bystrce, a která je pro manipulační účely vhodnějším místem.
- Rozvětvení tramvajové dráhy v rámci zastávky Výstaviště – hlavní vstup, kde historicky pro obsluhu vysoké poptávky výstaviště byla vybudována třetí kolej. V dnešní době je střední kolej využívána pouze k seřazování tramvajových souprav směřujících do centra při mimořádně exponovaných akcích, které se na výstavišti konají. Výstavbou vratné smyčky v rámci písárecké vozovny však může k tomuto seřazování bez problémů dojít právě v rámci kolejového uspořádání vozovny a smyčky. Odstranění třetí koleje a úprava celého prostoru zastávky by tak s sebou přinesla zrychlení tramvajové dopravy v běžném provozu, a to zejména napřímením trati a také oboustranným odstraněním jedné sjezdové a jedné rozjezdové výhybky.
- Mechanická uzamčená výhybka Kotlanova je pozůstatkem původní smyčky, jež se zde nacházela a která byla zrušena dalším rozvojem líšeňské tramvajové dráhy. Její význam je v současnosti nulový a jejím zrušením by došlo k zjednodušení tramvajového tělesa.

4.2.5 Úseky s potenciálem navýšení maximální traťové rychlosti

Trendem v tramvajové dopravě je navyšování maximálních traťových rychlostí na vhodných úsecích. Při současném stavu brněnského vozového parku je reálné navýšení maximálních rychlostí na 70 km/h po vzoru úseku Lesnická-Bieblova-Fügnerova-Halasovo náměstí, nicméně je zapotřebí počítat s obměnou vozového parku a při plánování nových a rekonstrukcích stávajících tratí připravit možnosti rychlostí vyšších než 70 km/h, například po vzoru ostravského systému, kde mezi zastávkami Josefa Kotase a Václava Jiříkovského byla zprovozněna trať s maximální rychlostí 80 km/h [24]. Takovéto navýšení může být z logiky věci uskutečněno pouze na úsecích vedených na samostatném tělese a ideálně v místech, kde není hustá zastávková síť, která by přínos vysokých rychlostí eliminovala. Prvních časových úspor je při běžné provozní akceleraci a deceleraci při navýšení rychlosti z 60 km/h na 70 km/h dosaženo až při vzdálenosti zastávek 300 m, přičemž s rostoucí vzdáleností časová úspora roste.

Jako vhodné by mohly připadat úseky:

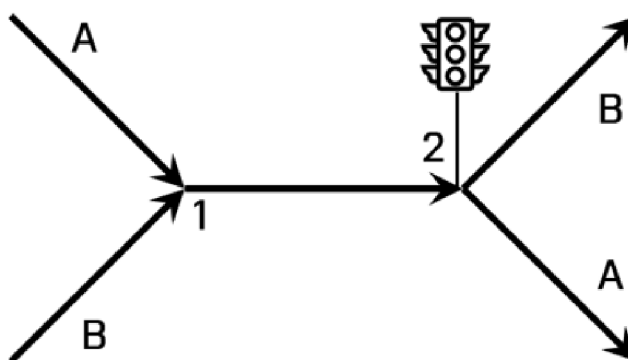
- Trať do Modřic, která je situována ve středu městské komunikace Vídeňská a zastávky se zde nachází v dostatečných vzdálenostech včetně faktoru, že část z nich je vedena v režimu na znamení, což přínos zvýšených maximálních rychlostí ještě umocňuje.
- Sídlištní rychlodráha do Líšně.
- Sídlištní rychlodráha do Bohunic a Starého Lískovce.
- Trať z Pisárek do Bystrce.

Samotné navýšení maximální traťové rychlosti však nutně znamená rekonstrukci tramvajového tělesa včetně jeho podloží, což znamená vysoké investiční náklady a výluky tramvajového provozu v daném úseku.

4.3 OPATŘENÍ NA ÚROVNÍ PROVOZU A ŘÍZENÍ

4.3.1 Řízení sledu vlaků

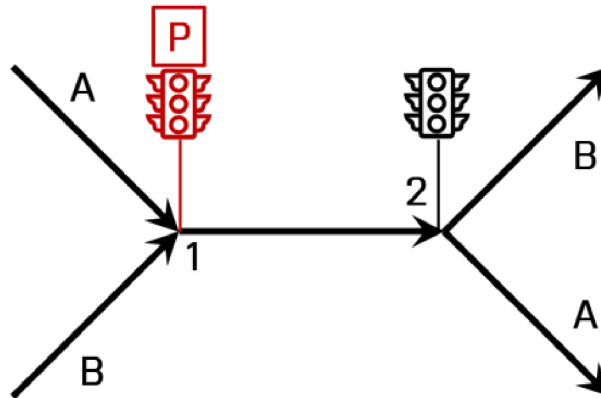
Ve specifických případech kolejového a trasového uspořádání může dojít k situaci, kdy se dvě či více linek jedoucích do té doby po svých vlastních kolejích spojí na jedné koleji, přičemž tento úsek je krátký a je ukončen křižovatkou řízenou světelnou signalizací, kde se tyto linky opět rozdělí a pokračují různými směry.



Obrázek 13: Schéma křížení

V těchto specifických případech může při frekventované dopravě docházet ke snížení propustnosti křižovatky, a to následujícím způsobem. Linky A a B se spolu potkají před kolejovým křížením 1. Souprava linky A vjede do sdíleného kolejového úseku první, souprava linky B se zařadí za ni. Křižovatka číslo 2 je bezpreferenčně světelně řízena. V momentě příjezdu soupravy A je však jízda povolena pouze ve směru linky B, souprava A tak tedy v tuto chvíli blokuje průjezdu linky B, která je zdržena jak čekáním linky A na signál volno, tak i pak samotným časem, který je signálu volno pro směr linky A vyhrazen.

Řešením této situace je rozřazení souprav před vjezdem do sdíleného kolejového úseku, a to systémem speciálních předzvěstí, které by soupravy rozřadily na základě signalizace v křižovatce č. 2 takovým způsobem, kdy by do sdíleného úseku najela první ta souprava, jež by v okamžiku příjezdu do křižovatky 2 měla signál volno. Systém by tedy byl založen na signalizaci křižovatky č. 2 se zohledněním času, který je potřeba k projetí společného kolejového úseku.



Obrázek 14: Schéma křížení s předzvěstí

Tento systém je založen na případném nezbytném čekání před příjezdem do křížení č. 1 a je tedy použitelný pouze v případech, kdy nejsou v těchto úsecích tramvaje součástí běžných jízdních pruhů.

Aplikace tohoto rozřazovacího systému v brněnském systému by se mohla týkat lokality Viaduktu Křenová, konkrétně rozřazení tramvajových souprav jedoucích z nástupišť 2 a 4, které dále pokračují ve směru zastávek Vlhká či Úzká, a rovněž vozy opouštějící nástupiště číslo 5. Druhou vhodnou lokalitou je pak Mendlovo náměstí. Zde by se jednalo o předzvěstový systém křižovatky ulic Křížová a Václavská, který by rozřazoval tramvaje jedoucí ze zastávky Mendlovo náměstí ve směru zastávek Václavská a Poříčí.

4.3.2 Preferenční systémy světelných křižovatek

Světelné křižovatky jsou z pohledu tramvajové dopravy ve městech jedním z největších zdrojů kumulace časových ztrát. I přesto však existují systémy, které mohou propustnost takovýchto křižovatek pro hromadnou dopravu zlepšit, a to systémy preferenčních mechanismů, které zajistí vytvoření intervalů pro průjezd MHD v rámci nastavení signálů křižovatky.

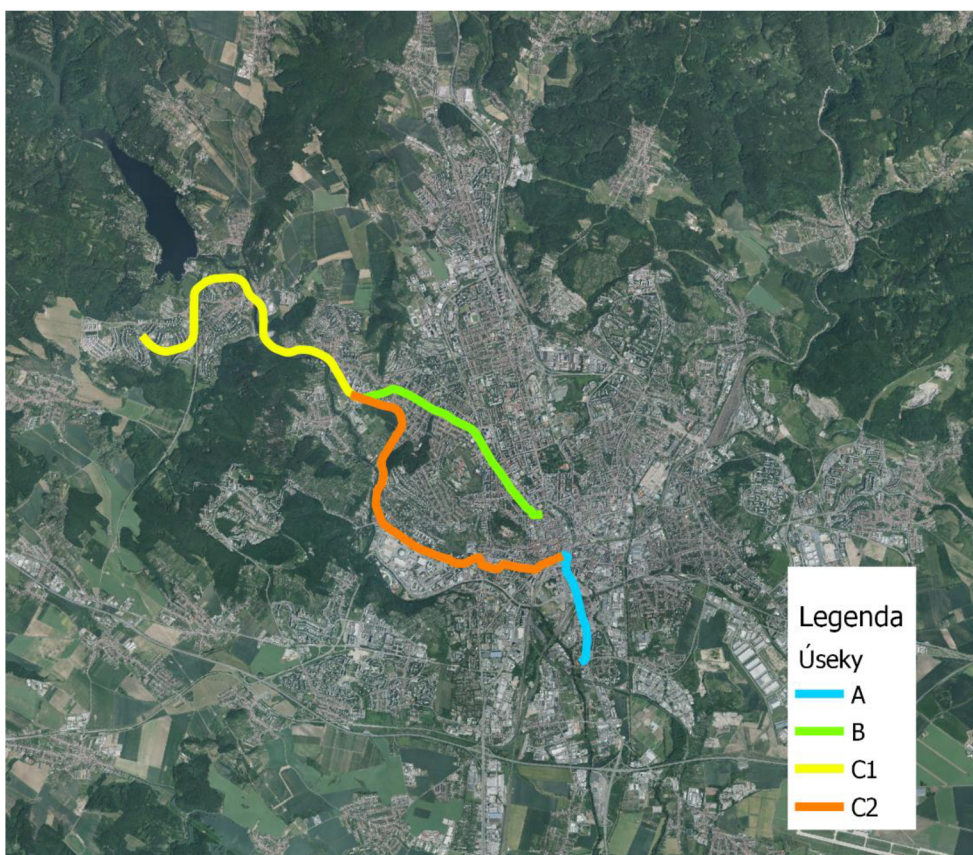
Proces nastavení těchto preferencí je složitá disciplína, ve které je potřeba zohlednit zejména význam dané pozemní komunikace, a ne jeho základě nastavit úroveň preference pro MHD tak, aby přílišnou preferencí MHD nedošlo k dopravnímu kolapsu IAD.

Tyto křižovatky jsou i z těchto důvodů ideálním prostorem pro využití nových technologií a umělé inteligence, které jsou schopny vyhodnocovat aktuální situaci nejen v křižovatkách samotných, ale i v jejich okolí. A jsou také schopny implementovat aktuální situaci daného spoje MHD a tomu přizpůsobit řízení křižovatky.

Systemy umělé inteligence jsou navíc schopné učit se a vyhodnocovat proběhnuvší zásahy do řízení křižovatek, na jejichž základě pak mohou samy implementovat jiné přístupy k jejich řízení.

5 ANALÝZA ÚSEKŮ

Pro podrobnou analýzu jednotlivých zpomalujících prvků a opatření pro zmírnění jejich dopadů, která již v systému tramvajové dopravy v Brně byla zavedena, byly zvoleny celkem tři úseky. Pod označením A je úsek tramvajové trati z Hlavního nádraží do Komárova, úsek B pokrývá trasu mezi uzly Vozovna Komín, Konečného náměstí a Česká, a poslední úsek C, který byl rozdělen na část 1 a 2 se bude věnovat trati Hlavní nádraží – Mendlovo náměstí – Vozovna Komín – Bystrc, Ečerova.



Obrázek 15: Mapa řešených úseků [11]

5.1 ÚSEK A - HLAVNÍ NÁDRAŽÍ – ÚZKÁ – KOMÁROV

Úsek Hlavní nádraží – Úzká – Komárov byl zvolen k analýze především z důvodu jeho v roce 2021 dokončené přeložky z ulice Dornych do ulice Plotní. Úsek je v současnosti využíván jednou z nejvytíženějších linek v celém systému, a sice linkou 12, která spojuje zmiňovaný Komárov s centrem města, a pokračuje do své cílové zastávky Technologický park na severu Brna [25].

Projekt Tramvaj Plotní, jehož byla přeložka trati součástí, byl zrealizován mezi březnem 2018 a srpnem 2021 a jeho cílem bylo zlepšit individuální automobilovou, ale i městskou hromadnou dopravu v této oblasti. Celý záměr investice spočíval v segregaci tramvajové a automobilové dopravy způsobem, kdy ulice Dornych byla zkapacitněna a vyhrazena dopravě automobilové, tramvajová trať pak z ulice Dornych byla přesunuta do sousední ulice Plotní, přičemž došlo k její segregaci od individuální automobilové dopravy. V rámci projektu došlo rovněž k souběžným pracím na inženýrských sítích a celková hodnota investice tak přesáhla 1,2 miliardy korun českých [21].



Obrázek 16: Srovnání původní a aktuální trasy [11]

5.1.1 Propady rychlosti na trase

Na aktuální trase je z pohledu prvků s omezenou rychlostí nejvýrazněji ovlivněn úsek mezi zastávkami Hlavní nádraží a Úzká, ve směru zastávky Úzká se jedná chronologicky o sjezdovou výhybku z odbočky, křížení s trolejbusovou dráhou, sjezdovou výhybku z odbočky, rozjezdová výhybka do odbočky a další křížení s trolejbusovými trolejemi. V opačném směru se jedná o stejné uspořádání s rozdílem toho, zda se jedná o výhybku rozjezdovou nebo sjezdovou.



Obrázek 17: Zpomalující prvky mezi zastávkami Hlavní nádraží a Úzká [11]

5.1.2 Jízdní řád úseku

Tabulka 5: Jízdní doby úseku Hlavní nádraží-Komárov

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace [min]	Mediánová jízdní doba [9]	Diference oproti JŘ
Hlavní nádraží	Úzká	1	3,02	+2,02
Úzká	Autobusové nádraží	2	1,52	-0,48
Autobusové nádraží	Železniční	1	1,02	+0,02
Železniční	Konopná	1	0,83	-0,17
Konopná	Komárov	2	1,18	-0,82
Celý úsek		7	7,57	+0,57

Tabulka 6: Jízdní doby úseku Komárov-Hlavní nádraží

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace	Mediánová jízdní doba [9]	Diference oproti JŘ
Komárov	Konopná	1	1,02	+0,02
Konopná	Železniční	1	1,00	+0,00
Železniční	Autobusové nádraží	1	1,00	+0,00
Autobusové nádraží	Úzká	2	2,18	+0,18
Úzká	Hlavní nádraží	3	2,18	-0,82
Celý úsek		8	7,38	-0,62

Tabulka 7: Jízdní řád úseku před přeložením ve směru Komárov

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace
Hlavní nádraží	Úzká	1
Úzká	Zvonařka	2
Zvonařka	Kovářská (z)	1
Kovářská (z)	Svatopetrská (z)	0
Svatopetrská (z)	Konopná	2
Konopná	Komárov	2
Celý úsek		8

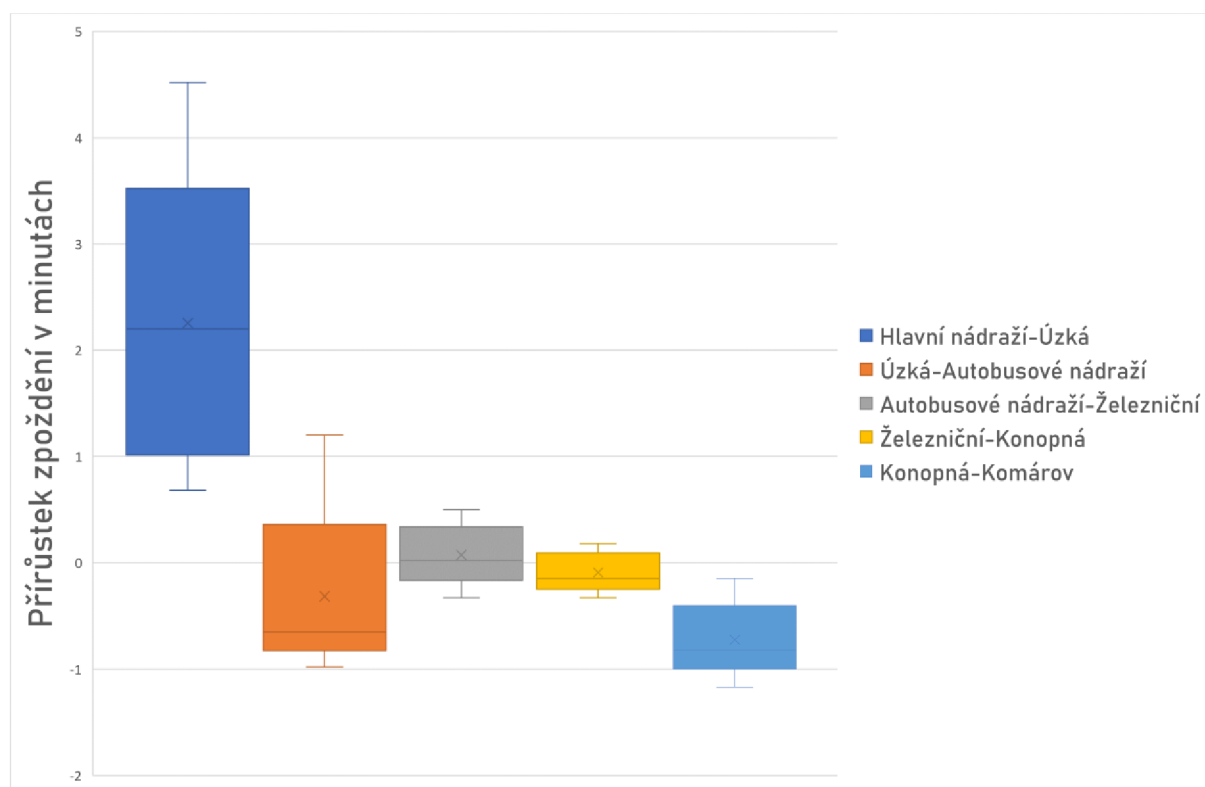
Tabulka 8: Jízdní řád úseku před přeložením ve směru Hlavní nádraží

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace
Komárov	Konopná	1
Konopná	Svatopetrská (z)	0
Svatopetrská (z)	Kovářská (z)	1
Kovářská (z)	Zvonařka	2
Zvonařka	Úzká	2
Úzká	Hlavní nádraží	3
Celý úsek		9

Z tabulek je patrné, že přeložením trati z ulice Dorných do ulice Plotní došlo, minimálně co se jízdních řádů týče, k časové úspoře celé jedné minuty. Tato úspora je způsobena zkrácením a napřímením samotné trasy včetně odstranění rychlostně omezených úseků, mezi které patřily omezení na 20 km/h v ostrém oblouku na ulici Dorných v blízkosti sochy motocyklisty, a dále také omezení na 20 km/h v úseku, kde původní trať křížovala hlavní komunikaci.

Kromě výše zmíněných pak došlo také k segregaci části trati od IAD, což výrazně pomohlo stabilitě dodržování jízdních řádů na celém segmentu. Zároveň je novým vedením trasy komfortněji obsluhováno ústřední autobusové nádraží Zvonařka.

5.1.3 Stabilita dodržování JŘ



Obrázek 18: Přírůstky zpoždění na trase Hlavní nádraží-Komárov [9]

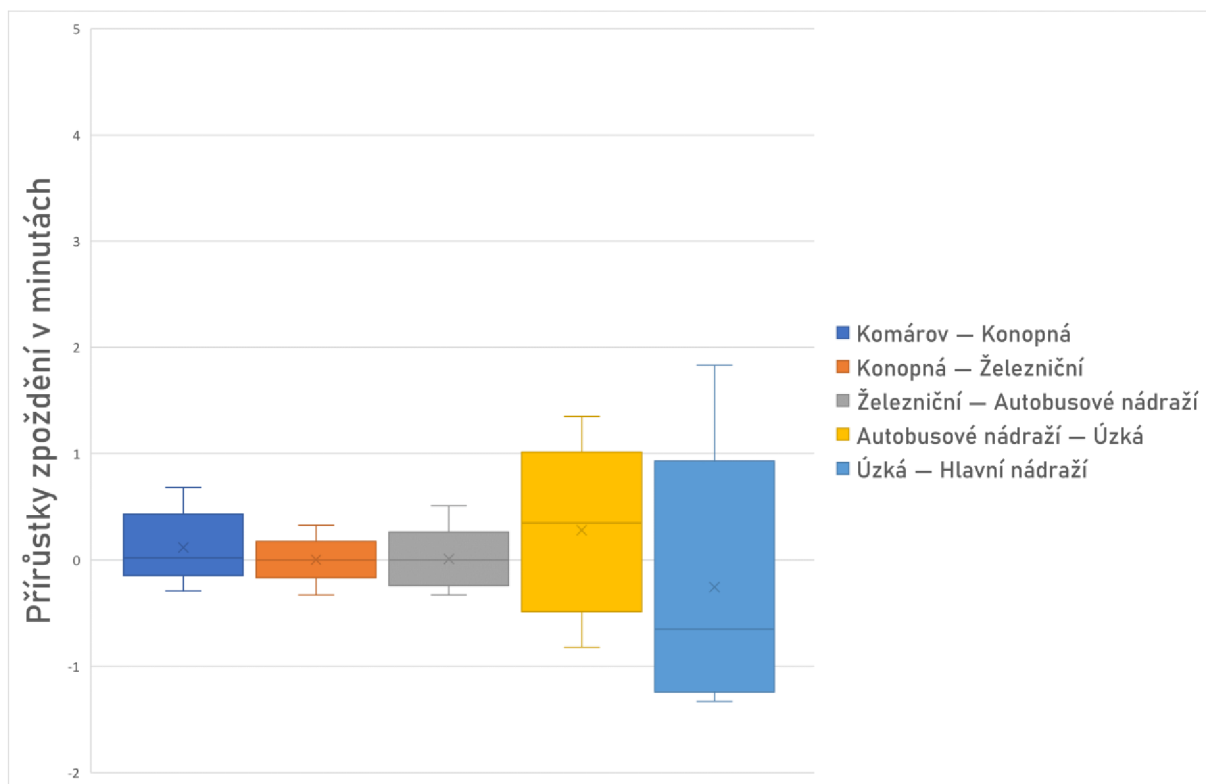
Z obrázku č. 18 je jasně patrné, že nestabilita v rámci jízdních dob mezi zastávkami je do značné míry determinována tím, zdali se tramvaj pohybuje na komunikacích společných s IAD, nebo na tělese od IAD odděleném. Na plně segregovaném tělese, tedy mezi zastávkami Autobusové nádraží a Komárov, jsou mediány i kvartily přírůstku zpoždění blízké času stanovenému jízdním řádem, s drobnou výjimkou závěrečného úseku trasy Konopná-Komárov, kde je ale nepatrně výraznější kolísání jízdních dob způsobené především vyšší časovou dotací úseku a taky faktem, že se jedná o závěrečný úsek před konečnou zastávkou linky 12.

Daleko výraznějších kvartilových rozptylů je dosahováno mezi zastávkami Úzká a Autobusové nádraží. To je způsobeno zejména trojicí nácestných světelně řízených křižovatek, přičemž na první z nich je důležitým křížením městských komunikací a preference MHD jsou těžko proveditelné. Na druhé z nich je MHD preferenčně zvýhodněna, avšak na třetí z nich křížuje tramvajová dráha silnici I. třídy číslo 42 a preferenční opatření v rámci světelného řízení jsou tak vyloučena.

Přírůstky zpoždění nejvíce zatížený úsek je pak mezi zastávkami Hlavní nádraží a Úzká, kde dolní kvartil nezasahuje pod zpoždění nižší než jedné minuty a za zvážení by tak stála úprava jízdního řádu ve smyslu navýšení jízdní doby v tomto úseku z jedné minuty na dvě. Samotné obrovské nárůsty zpoždění jsou způsobeny jednou jedinou, avšak velmi komplikovanou křižovatkou ulic Nádražní, Křenová, Koliště a Dornych, přičemž ulice Koliště a Dornych jsou součástí malého městského okruhu. Křižovatka samotná je vytížená ale i vozidly MHD, z pohledu tramvají se zde na krátkém společném úseku potkávají linky 8, 9, 10 a 12, přičemž linky 8, 9 a 10 pokračují dále ve směru ulice Křenové a linka 12 ulicí Dornych. Z důvodu této vytížené konfigurace tak zde může docházet i k vzájemnému blokování průjezdu jednotlivých linek.



Obrázek 19: Křižovatka ulic Nádražní, Křenová, Koliště a Dornych

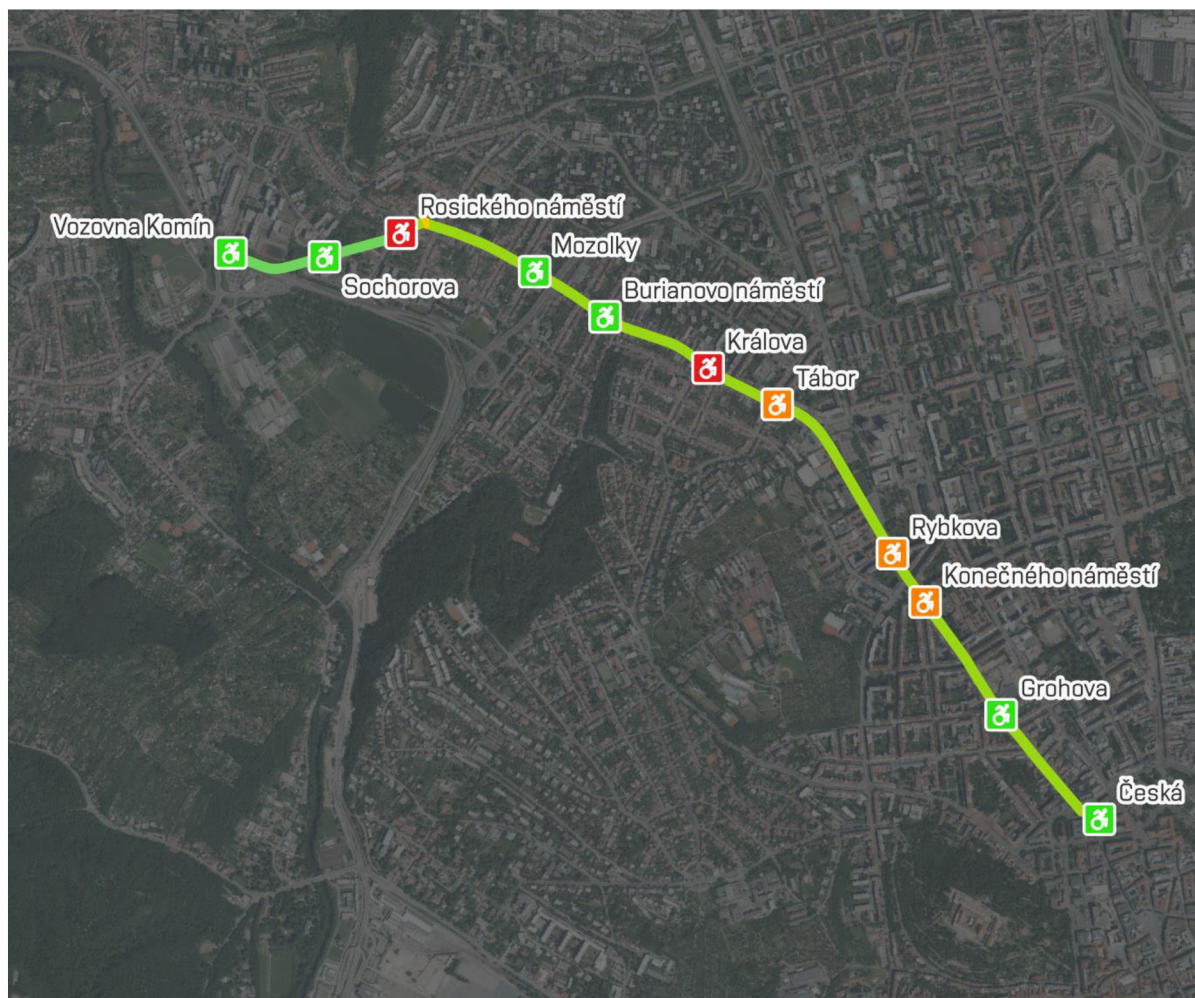


Obrázek 20: Přírůstky zpoždění na trase Komárov – Hlavní nádraží [9]

Zaměříme-li se na směr opačný, tedy směr Komárov – Hlavní nádraží, dospějeme veskrze ke stejným poznatkům, jako ve směru výchozím. Na spojnici zastávek Komárov – Konopná – Autobusové nádraží dochází pouze k marginálním odchýlkám od stanoveného jízdního řádu. Mezi zastávkami Autobusové nádraží a Úzká je již jisté kolísání cestovních dob patrné, a je způsobeno, stejně jako ve směru výchozím, zejména světelně řízenou křižovatkou se silnicí I/42 a křižovatkou s ulicí Úzkou. Největší nestabilita je pak nepřekvapivě mezi zastávkami Úzká a Hlavní nádraží, avšak oproti směru výchozímu jsou na zvládnutí úseku jízdním řádem vyhrazeny tři minuty jízdní doby, a přírůstky zpoždění tak nedosahují takových řádů jako ve směru opačném, naopak medián jízdních dob je nižší než samotná tříminutová dotace, a případného nabytého náskoku tak lze využít k eliminaci již nabytých zpoždění nebo k delšímu obslužení uzlové zastávky Hlavní nádraží.

5.2 ÚSEK B - VOZOVNA KOMÍN-KONEČNÉHO NÁMĚSTÍ-ČESKÁ

Úsek mezi zastávkami Vozovna Komín, Konečného náměstí a Česká, jež je vlastní linkám 3 a 10, a na své části také lince 12, byl vybrán pro detailnější analýzu zejména z důvodu umístění v relativně úzkém uličním profilu v historické zástavbě města a rovněž jako úsek předcházející byl ve své části v nedávné minulosti rekonstruován.



Obrázek 21: Trasa úseku ve směru Česká – Vozovna Komín [11]

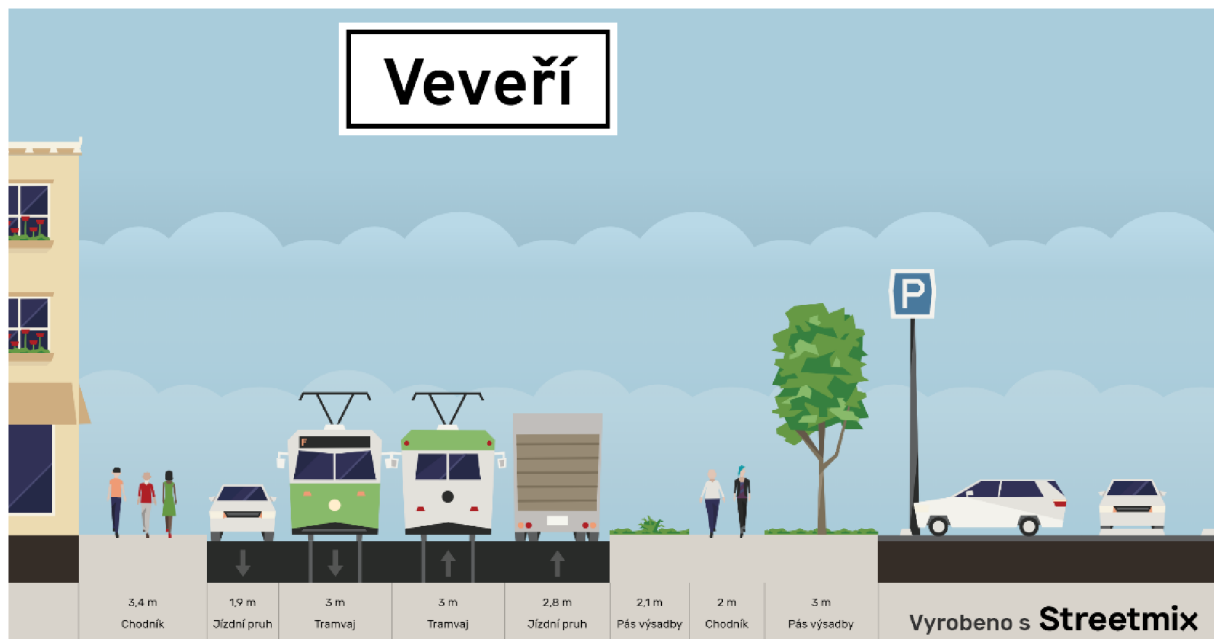
Úsek začíná zastávkou Vozovna Komín, za níž se trať odpojuje od trati směřující do Pisárek. Na relativně krátkém úseku se tramvaje pohybují po samostatném tělese, přičemž těsně před zastávkou Rosického náměstí se tramvaj zařazuje do běžného provozu na pozemních komunikacích a odkud dále pokračuje ulicemi Horovou a Minskou až ke křižovatce s ulicí Tábor-Mučednická. Po délce tohoto úseku sdílí tramvaje jízdní pás s IAD s výjimkami zastávek Burianovo náměstí a Mozolky ve

směru Vozovna Komín, kde byly zřízeny tramvajové zastávky tzv. brněnského typu, které tak umožňují průjezd IAD v době, kdy je obsluhována zastávka.



Obrázek 22: Zastávka Burianovo náměstí, tzv. brněnského typu [13]

Od křížení s ulicemi Tábor a Mučednická pokračuje trať ulicí Veverí, kde se již tramvaj odlučuje od IAD do vyhrazeného středového pásu. Nicméně v segmentu ulice mezi křižovatkami s ulicemi Resslerova (resp. Hrnčířská) a Rybkova (resp. Zahradníková) je ulice z důvodu místního šířkového uspořádání příčinou zdržení tramvajové i individuální dopravy, neboť jízdní pruh IAD ve směru do centra svou šířkou neumožňuje vzájemný bezkolizní průjezd automobilů a tramvají. Tramvaje jsou tak zejména ve špičkových hodinách nuceny akceptovat rychlost IAD, která je z důvodu blízkosti světelných křižovatek velmi nízká.



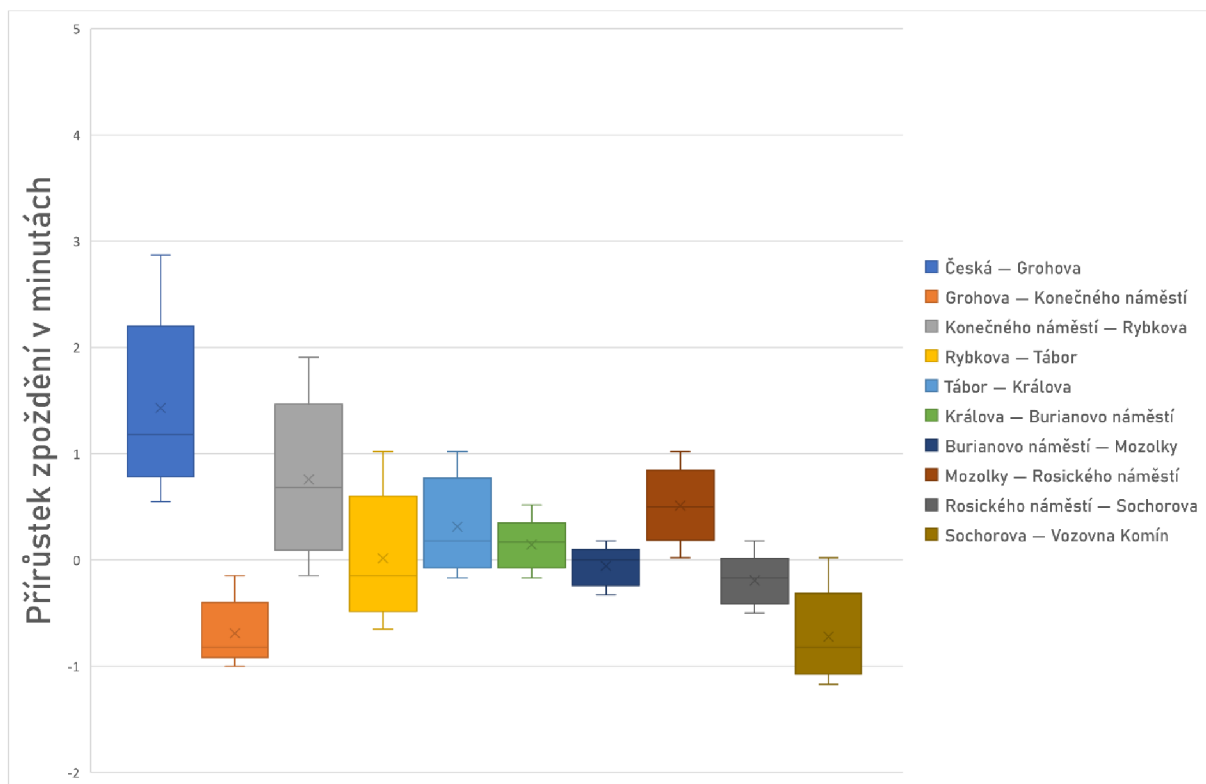
Obrázek 23: Schéma šířkového uspořádání ulice Veverí [26]

Po projetí tohoto úseku následuje dvojice světelných křižovatek v rámci lokality náměstí Konečného, jež rovněž mohou způsobovat nestability v rámci dodržování jízdních řádů. Poté tramvaj pokračuje svým odděleným pásem až na Žerotínovo náměstí, kde se napojuje do uzlu Česká.

5.2.1 Stabilita jízdního řádu

Tabulka 9: Jízdní doby úseku Česká-Vozovna Komín

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace [min]	Mediánová jízdní doba [9]	Diference oproti JŘ
Česká	Grohova	1	2,18	+1,18
Grohova	Konečného náměstí	2	1,18	-0,82
Konečného náměstí	Rybkova	1	1,68	+0,68
Rybkova	Tábor	2	1,85	-0,15
Tábor	Králova	1	1,18	+0,18
Králova	Burianovo náměstí	1	1,17	+0,17
Burianovo náměstí	Mozolky	1	1,00	+0,00
Mozolky	Rosického náměstí	1	1,50	+0,50
Rosického náměstí	Sochorova	1	0,83	-0,17
Sochorova	Vozovna Komín	2	1,18	-0,82
Celkem		13	13,75	+0,75



Obrázek 24: Přírůstky zpoždění na trase Česká – Vozovna Komín [9]

Průměrná časová ztráta, kterou spoje na linkách 3 a 10 nabírají v rámci úseku Česká – Vozovna Komín se pohybuje lehce pod jednou minutou, což je v rámci komplexnosti úseku velmi decentní výsledek.

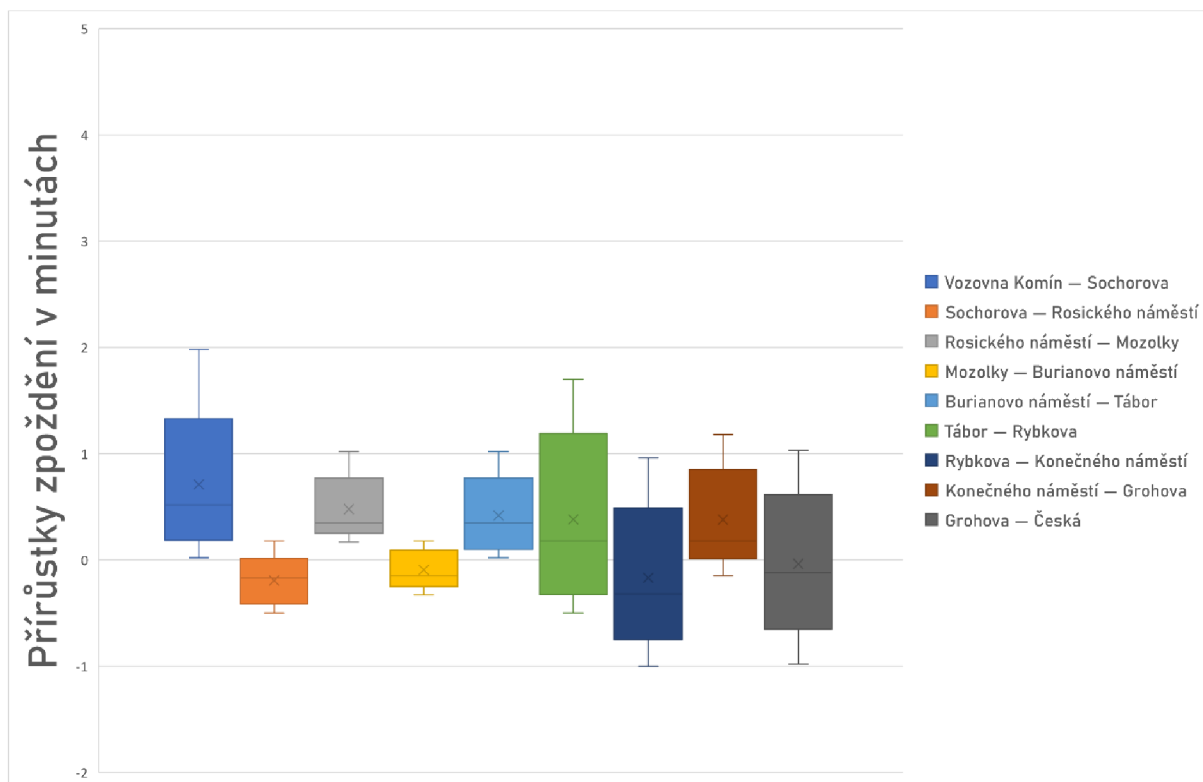
Zaměříme-li se na jednotlivé úseky, pak úsek Česká – Grohova – Konečného náměstí pracuje v režimu plus-minus, jež byl již výše popsán. Mezi zastávkami Česká a Grohova tedy dochází k jistým časovým ztrátám, které mohou být zapříčiněny čekáním na křižovatce u Krajského úřadu Jihomoravského kraje, kde je však v provozu preferenční systém nižší úrovně, který dokáže, je-li to možné, přidělit tramvajové dopravě mezinterval v rámci nastavení světelné křižovatky.

Mezi zastávkami Konečného náměstí a Rybkova je pak vyšší míra nestability jízdních dob způsobena dvojicí světelně řízených křižovatek, a to konkrétně s ulicemi Kotlářská a Nerudova. Po nich následuje inkriminovaný úsek ulice Veverí, který však v tomto směru netrpí úzkým jízdním pruhem IAD a poněkud vyšší nestabilita je zde způsobena křižovatkou s ulicí Šumavskou, která dříve byla preferenčně plně vstřícná průjezdu tramvajů, avšak s nárůstem IAD v této oblasti došlo k omezení preferenčních mechanismů v rámci řízení křižovatky.

Následující úsek vedený ulicemi Minská a Horova je pak i přesto, že zde tramvaje a IAD využívají stejnou stopu, poměrně stabilní částí trati. To je způsobeno nejspíše faktem, že tramvaj vjíždí do úseku, kde nedochází ke kongescím IAD a zároveň se zde nacházejí zastávky brněnského typu, díky kterým pak nedochází ani k blokování IAD čekáním na obsluhu zastávky tramvajemi. Závěrečný úsek na samostatném tělese mezi zastávkami Sochorova a Vozovna Komín pak s bohatou dvouminutovou dotací jízdního řádu slouží jako vyrovnávací úsek k částečné eliminaci již nabytých zpoždění.

Tabulka 10: Jízdní doby úseku Vozovna Komín - Česká

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace [min]	Mediánová jízdní doba [9]	Diference oproti JŘ
Vozovna Komín	Sochorova	1	1,52	0.52
Sochorova	Rosického náměstí	1	0,83	-0.17
Rosického náměstí	Mozolky	1	1,35	0.35
Mozolky	Burianovo náměstí	1	0,85	-0.15
Burianovo náměstí	Tábor	1	1,35	0.35
Tábor	Rybkova	2	2,18	0.18
Rybkova	Konečného náměstí	2	1,68	-0.32
Konečného náměstí	Grohova	1	1,18	0.18
Grohova	Česká	3	2,88	-0.12
Celkem		13	13,82	+0,82



Obrázek 25: Přírůstek zpoždění na trase Vozovna Komín – Česká [9]

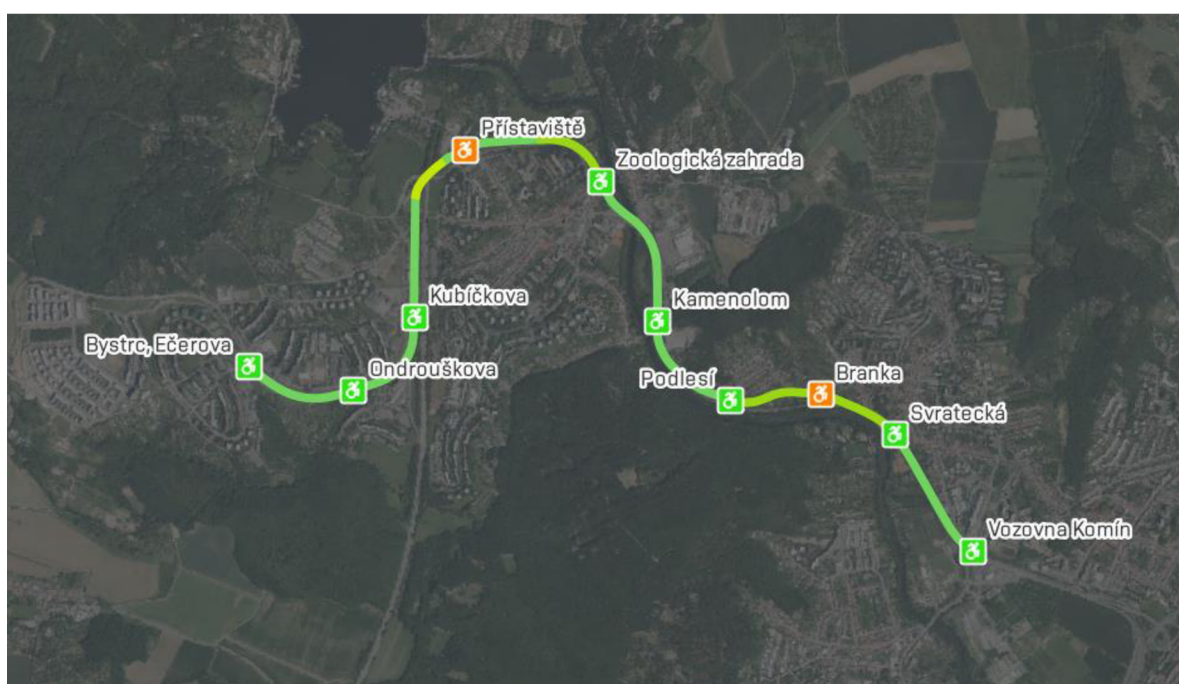
Opačný směr úseku, tedy směr Vozovna Komín – Česká, je co do stability výrazněji pestřejším úsekem. K první výraznější nestabilitě dochází již na prvním úseku mezi zastávkami Vozovna Komín a Sochorova, kde je nestabilita způsobena zejména odbočením z bystrcké trati a s tím související případné zdržení při křižování trati jiným linkám. Úsek v rámci ulic Horova a Minská je, co se přírůstků zpoždění týče, dobře nastavenou a dobře fungující částí systému, kde vznikají jen marginální zpoždění a výkyvy v rámci jízdních dob.

Po tomto úseku pak následuje problematický úsek ulice Veverčí, kde dochází ke zdržení zejména z důvodu faktického sdílení jízdního prostoru tramvajů a IAD. Po něm následuje již zmiňovaná série křižovatek v rámci Konečného náměstí.

Posledním úsekem s vyšší mírou odlišností od jízdních dob daných jízdním řádem je závěrečný úsek Grohova – Česká, kde jsou výkyvy způsobeny křižovatkou na Žerotínově náměstí, ale i samotným průjezdem uzlu Česká.

5.3 ÚSEK C1 - EČEROVA-VOZOVNA KOMÍN

Úsek Ečerova-Vozovna Komín se nachází v severozápadní části města Brna a je páteřní linií městské hromadné dopravy pro městské části Komín a Bystrc. Konstrukčně je veden na samostatném drážním tělese s výjimkou tří přejezdů v blízkosti zastávek Branka, Podlesí a Kamenolom. Úsek je vlastní páteřní lince číslo 1, ale také z části linkám 3 a 10 a obsluhuje významné cíle, kterými jsou zejména brněnská zoologická zahrada a Brněnská přehrada, jež jsou oblíbenými destinacemi pro turisty i místní obyvatelstvo. Zastávka Zoologická zahrada je rovněž významným uzlem městské i regionální dopravy.



Obrázek 26: Mapa úseku Vozovna Komín – Bystrc, Ečerova [11]

Úsek začíná v blízkosti trolejbusové vozovny v Komíně, odkud dále údolím řeky Svratky pokračuje zastávkami Svratecká, Branka, Podlesí a Kamenolom až do zmiňovaného uzlu Zoologická zahrada. Odtud se dále již odpojuje od řeky Svratky a pokračuje do městské části Bystrc, a to zastávkou Přístaviště, za níž je umístěna smyčka Rakovecká, následují zastávky Kubíčková a Ondrouškova a celý úsek je zakončen smyčkou Bystrc, Ečerova.

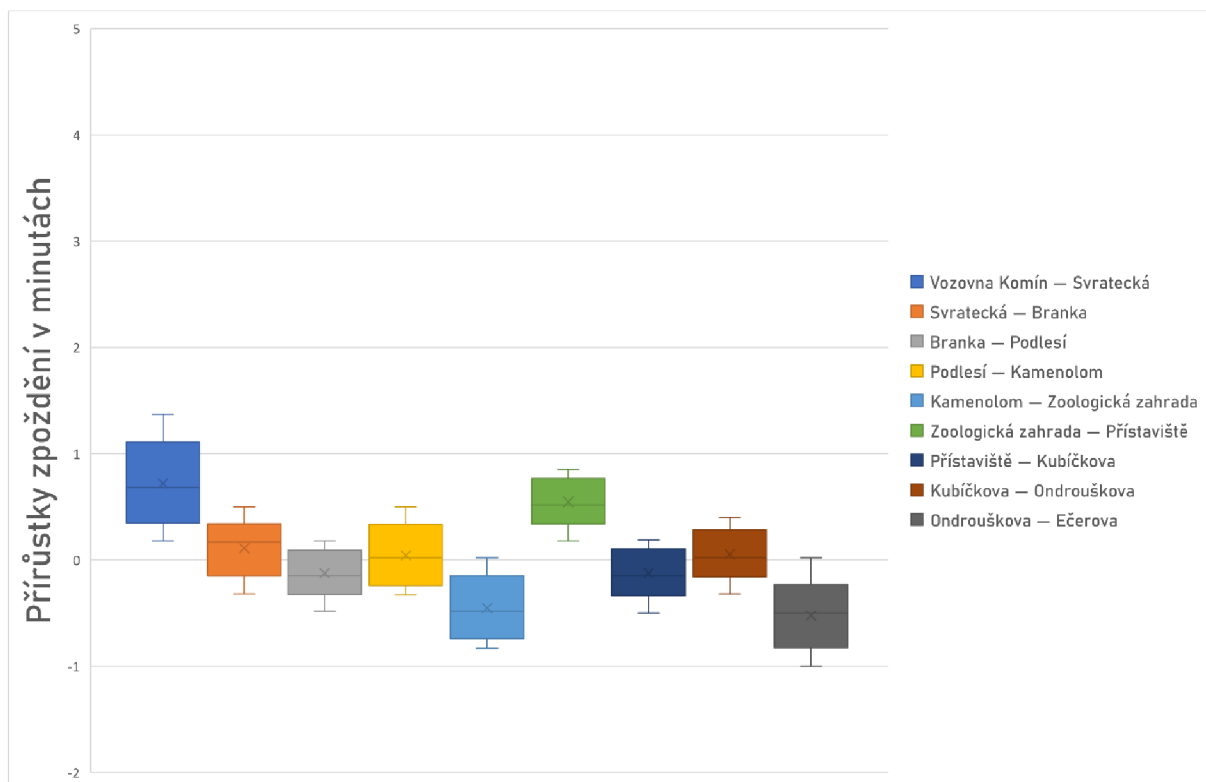
Ve výchozím směru Vozovna Komín – Ečerova je majoritní traťová rychlost na úseku 60 km/h, výjimku tvoří úsek mezi zastávkami Svratecká a Podlesí, který je veden v blízkosti zástavby a kde je rychlost omezena na 50 km/h, mezi 22 a 6

hodinou pak na 40 km/h. Ve směru opačném se pak přidává úsek mezi zastávkami Přístaviště a Zoologická zahrada, na jehož části je z důvodu bezpečné jízdy v klesajícím oblouku traťová rychlost stanovena na 50 km/h, a také úsek v blízkosti smyčky Rakovecká, kde je rychlost z důvodu oblouku, sjízdné výhybky a mostní konstrukce omezena na 40 km/h. Omezení s sebou přináší i zmiňované přejezdy Kamenolom a Branka, na nich je rychlost omezena na 30 km/h.

5.3.1 Stabilita jízdních řádů

Tabulka 11: Jízdní doby úseku Vozovna Komín – Bystrc, Ečerova

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace [min]	Mediánová jízdní doba [9]	Diference oproti JŘ
Vozovna Komín	Svratecká	1	1,68	+0,68
Svratecká	Branka (z)	1	1,17	+0,17
Branka (z)	Podlesí (z)	1	0,85	-0,15
Podlesí (z)	Kamenolom (z)	1	1,02	+0,02
Kamenolom (z)	Zoologická zahrada	2	1,52	-0,48
Zoologická zahrada	Přístaviště	1	1,52	+0,52
Přístaviště	Kubíčková	2	1,85	-0,15
Kubíčková	Ondrouškova	1	1,02	+0,02
Ondrouškova	Bystrc, Ečerova	2	1,5	-0,5
Celkem		12	12,13	+0,13

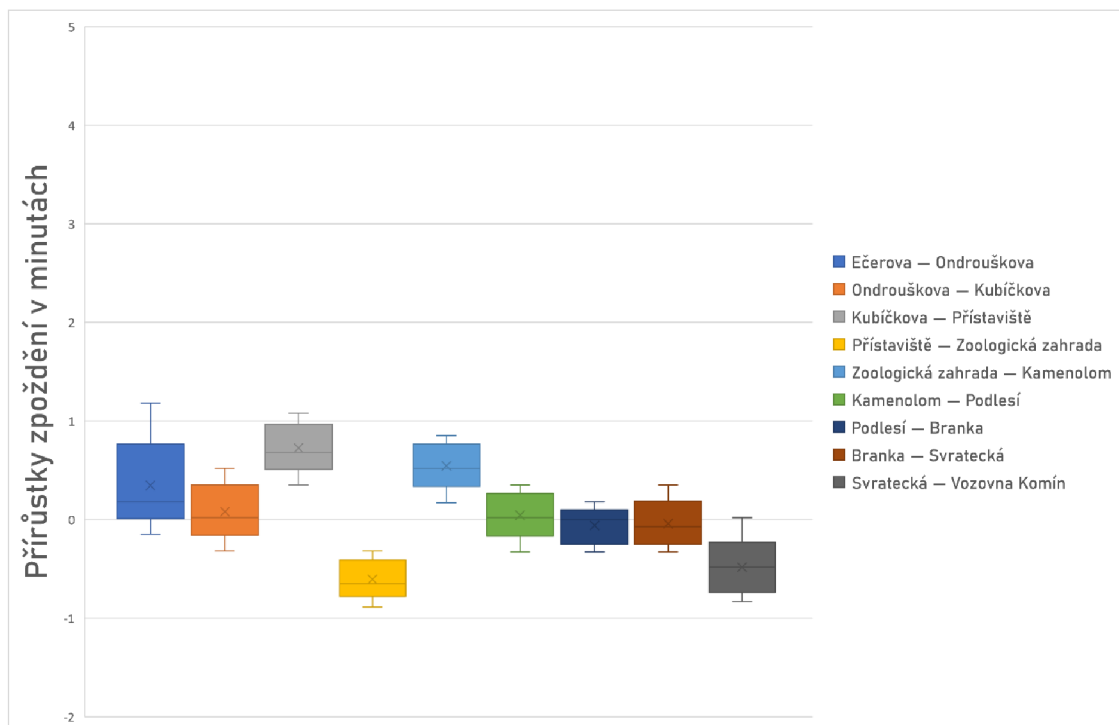


Obrázek 27: Přírůstky zpoždění na trase Vozovna Komín – Bystrc, Ečerova [9]

Jízdní řád linky odpovídá taktice plus-minus, kdy na některých mezizastávkových úsecích akceptujeme zpoždění, abychom jej na některém z následujících úseků opět eliminovali. Při pohledu na krabicový graf přírůstků zpoždění je pak patrné, že na řešeném úseku nedochází k výraznějším časovým nerovnostem jízdních dob, což je způsobeno jeho umístěním na samostatném tělese, které z možných způsobů vedení vysokou stabilitu dodržování jízdních řádů nejlépe zajišťuje. Jistá nestabilita by se dala spatřit na úsecích, jež jsou ovlivněny zastávkami na znamení, nicméně ani u nich nedosahují rozptyly takových hodnot, které můžeme sledovat například na úsecích v centru města, které jsou ovlivněny světelnými křižovatkami.

Tabulka 12: Jízdní doby úseku Bystrc, Ečerova - Vozovna Komín

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace [min]	Mediánová jízdní doba [9]	Diference oproti JŘ
Bystrc, Ečerova	Ondrouškova	1	1,18	+0,18
Ondrouškova	Kubíčková	1	1,02	+0,02
Kubíčková	Přístaviště	1	1,68	+0,68
Přístaviště	Zoologická zahrada	2	1,35	-0,65
Zoologická zahrada	Kamenolom (z)	1	1,52	+0,52
Kamenolom (z)	Podlesí (z)	1	1,02	+0,02
Podlesí (z)	Branka (z)	1	1,0	+0,0
Branka (z)	Svratecká	1	0,93	-0,07
Svratecká	Vozovna Komín	2	1,52	-0,48
Celkem		11	11,22	+0,22

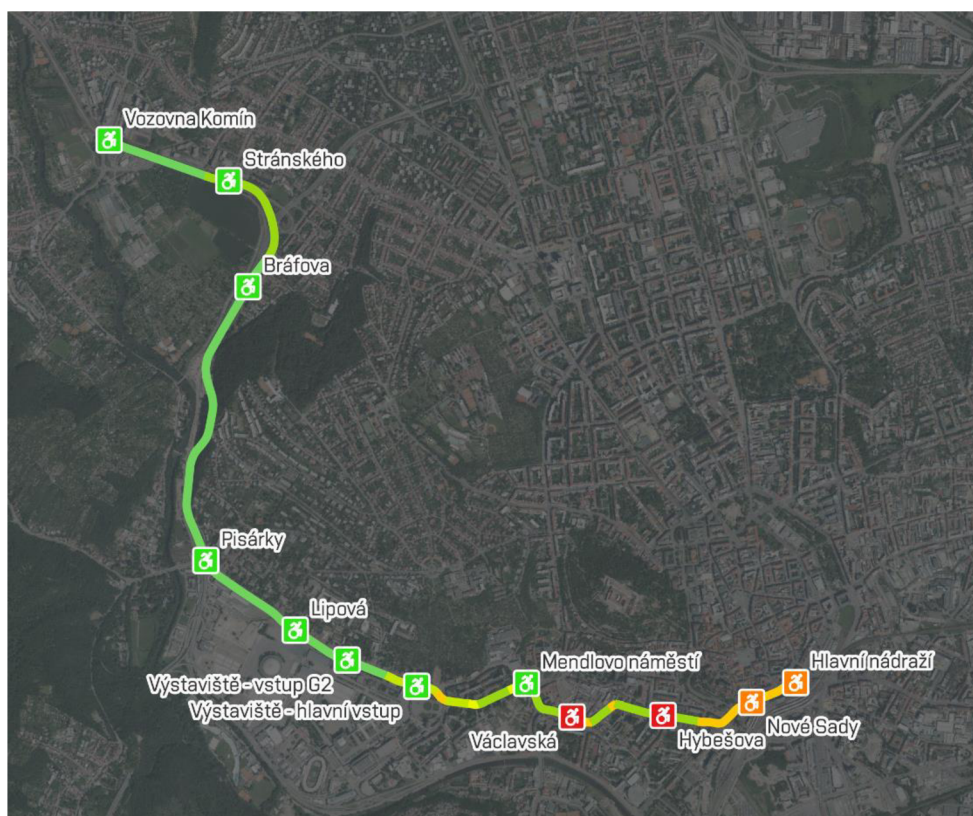


Obrázek 28: Přírůstky zpoždění na trase Ečerova - Vozovna Komín [9]

I v opačném směru trasy si můžeme všimnout velmi dobré stability dodržování jízdních dob jízdního řádu. Za povšimnutí stojí i situace mezi zastávkami Kubíčkova, Přístaviště a Zoologická zahrada, na které je ukázkově vidět správný způsob nastavení efektivního jízdního řádu, kdy na úseku Kubíčkova-Přístaviště akceptujeme zpoždění v rozmezí mezi půl a jednou minutou, které následně na úseku Přístaviště-Zoologická zahrada eliminujeme. Tímto způsobem nastavení jízdního řádu se tak vyhneme zbytečným prostožům, které by byly případně způsobeny čekáním spoje na čas odjezdu.

Stabilita jízdních řádů a minimální výkyvy jízdních dob na tomto úseku jsou determinovány umístěním trati na samostatném tělese, které je ze všech možných umístění trati z pohledu rychlosti a stability dodržování jízdních dob nejvýhodnějším typem umístění.

5.4 ÚSEK C2 – HLAVNÍ NÁDRAŽÍ – VOZOVNA KOMÍN

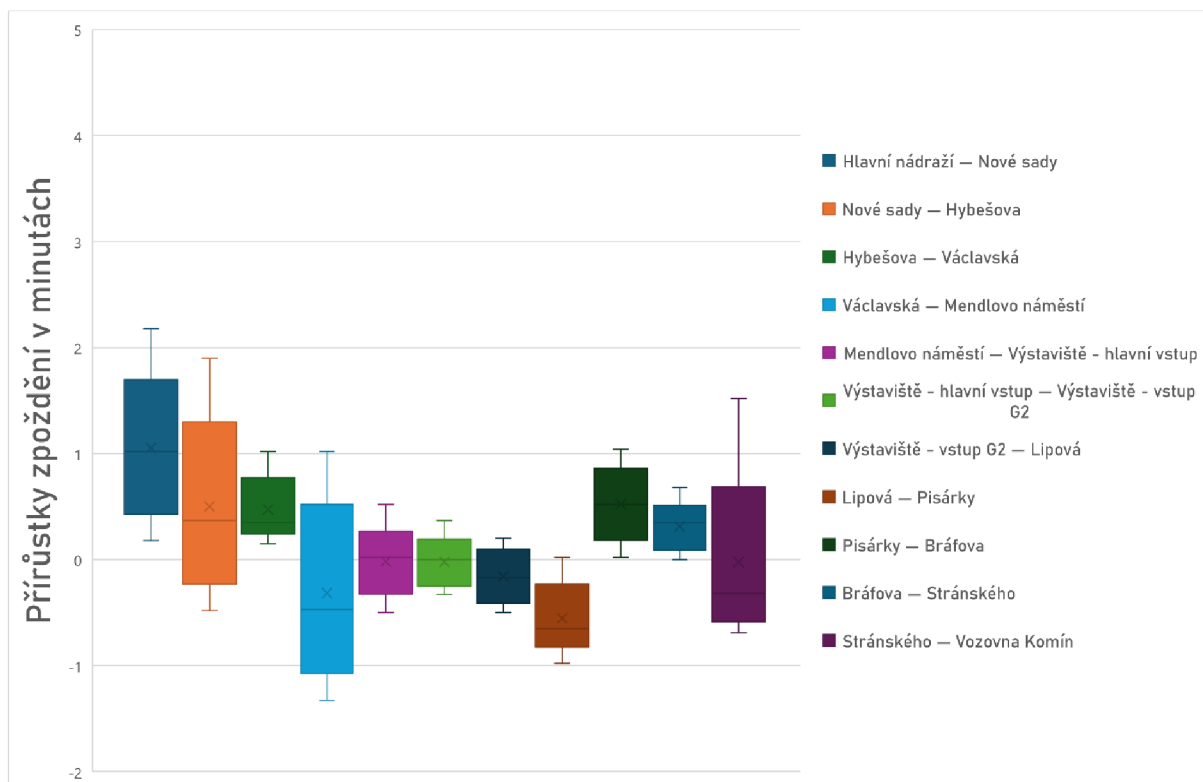


Obrázek 29: Trasa mezi zastávkami Hlavní nádraží a Vozovna Komín [11]

Úsek Hlavní nádraží – Vozovna Komín začíná centrálním uzlem brněnské MHD zastávkou Hlavní nádraží. Odtud dále pokračuje ulicemi Starého Brna do dalšího významného uzlu Mendlovo náměstí. Z Mendlovo náměstí pak tramvaje dále pokračují okolo prostor brněnského výstaviště a pisárecké vozovny až do tunelu při ulici Žabovřeské, který byl v roce 2023 zprovozněn, aby bylo uvolněno místo pro zkapacitnění velkého městského okruhu. Tramvajová dráha pak odbočuje směrem do městských částí Žabovřesky a Komín, až do cílové stanice řešeného úseku Vozovna Komín.

Tabulka 13: Jízdní doby úseku Hlavní nádraží – Vozovna Komín

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace [min]	Mediánová jízdní doba [9]	Diference oproti JŘ
Hlavní nádraží	Nové sady	1	2,02	+1,02
Nové sady	Hybešova	2	2,37	+0,37
Hybešova	Václavská	1	1,35	+0,35
Václavská	Mendlovo náměstí	3	2,53	-0,47
Mendlovo náměstí	Výstaviště-Hlavní vstup	2	2,02	+0,02
Výstaviště-Hlavní vstup	Výstaviště-Vstup G2 (z)	1	1,00	+0,00
Výstaviště-Vstup G2 (z)	Lipová	1	0,83	-0,17
Lipová	Pisárky	2	1,35	-0,65
Pisárky	Bráfova (z)	2	2,52	+0,52
Bráfova (z)	Stránského (z)	1	1,35	+0,35
Stránského (z)	Vozovna Komín	2	1,68	-0,32
Celkem		18	19,02	+1,02



Obrázek 30: Přirůstky zpoždění na trase Hlavní nádraží – Vozovna Komín [9]

Druhý úsek linky číslo 1, tedy mezi Hlavním nádražím a Vozovnou Komín je již z pohledu jízdních dob a jejich stability poněkud zajímavějším úsekem zejména proto, že kombinuje trať na samostatném tělese a tratě vedoucí historickým centrem města, což je patrné i z rozptylu dojezdových časů v grafu.

Velký rozptyl mezi zastávkami Nové sady a Hybešova již byl popsán v předchozích kapitolách, pouze je vhodné dodat, že linka 1 je tímto úsekem vzhledem k nasazování velkokapacitních dlouhých souprav více znevýhodněna.

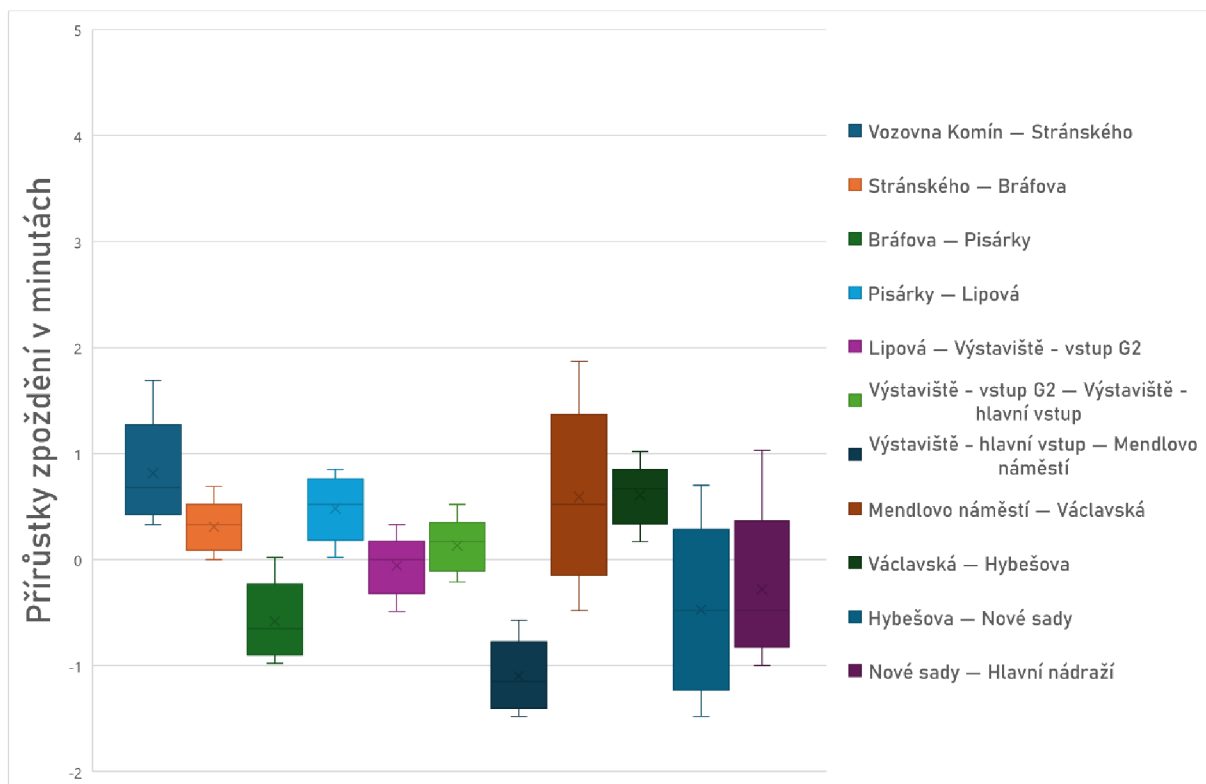
Zřejmě nejvýraznějším úsekem, co se rozličenosti jízdních dob týče, je úsek mezi zastávkami Václavská a Mendlovo náměstí, který je vysoce ovlivněn dvojicí světelných křižovatek, kterými musí tramvaje projet a které nemají nastavený preferenční systém vzhledem k jejich významnosti pro IAD.

Poté, co se tramvaj přesune na samostatné těleso, již žádnou výraznější nestabilitu nespatřujeme, s výjimkou závěrečného úseku řešeného segmentu, tedy úsek mezi zastávkami Stránského a Vozovna Komín, kde je rozptyl způsoben zejména vyrovnáváním nabytých zpoždění na straně jedné, a přednostním vpouštěním

souprav jiných linek při sjíždění na společný úsek tak, aby byly zajištěny případné vazby mezi linkami, neboť linka číslo 1 ze všech linek v tomto úseku směřuje nejdál.

Tabulka 14: Jízdní doby úseku Vozovna Komín - Hlavní nádraží

Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Časová dotace [min]	Mediánová jízdní doba [9]	Diference oproti JŘ
Vozovna Komín	Stránského (z)	1	1,68	+0,68
Stránského (z)	Bráfova (z)	1	1,33	+0,33
Bráfova (z)	Pisárky	3	2,35	-0,65
Pisárky	Lipová	1	1,52	+0,52
Lipová	Výstaviště- Vstup G2 (z)	1	1,00	+0,00
Výstaviště- Vstup G2 (z)	Výstaviště- Hlavní vstup	1	1,17	+0,17
Výstaviště- Hlavní vstup	Mendlovo náměstí	3	1,85	-1,15
Mendlovo náměstí	Václavská	2	2,52	+0,52
Václavská	Hybešova	1	1,67	+0,67
Hybešova	Nové sady	3	2,52	-0,48
Nové sady	Hlavní nádraží	2	1,52	-0,48
Celkem		19	19,13	+0,13



Obrázek 31: Přirůstky zpoždění na trase Vozovna Komín - Hlavní nádraží [9]

Zaměříme-li se na opačný směr řešeného úseku, tak v rámci části trati vedené po samostatném tělese nedochází k výrazným odlišnostem v jednotlivých jízdách spojů linky. První výraznější nastává v úseku Mendlovo náměstí - Václavská, přičemž tato nestabilita je způsobena dvojicí světelně řízených křižovatek, mezi nimiž se na společném úseku trati potkávají linky 1, 5 a 6. Diference mezi zastávkami Hybešova - Nové sady jsou zapříčiněny ze stejných důvodů, jako ve směru výchozím.

6 NÁVRH ÚPRAVY ÚSEKŮ

6.1 ČASOVÉ BILANCE NAVRŽENÝCH ÚPRAV

U úprav, které zahrnují navýšení průjezdních rychlostí v určitých částech segmentů je potřeba zjistit, jaký časový benefit tato opatření přinesou. Výpočty budou prováděny s modelem tramvajového vozu o délce 30 000 mm, který bez ohledu na reálné vedení trati rovnoměrně zrychluje se zrychlením $1,05 \text{ m/s}^2$ a rovnoměrně zpomaluje se zrychlením $-1,00 \text{ m/s}^2$. Souprava tedy bude s rovnoměrným zrychlením zrychlovat z výchozí rychlosti na rychlost maximální v daném úseku, v okamžiku dosažení maximální stanovené rychlosti se její pohyb změní na rovnoměrný přímočarý, a dále bude s rovnoměrným zrychlením zpomalovat na rychlost cílovou, při zohlednění posloupnosti maximálních rychlostí tak, že v žádném úseku nebude překročena maximální rychlost pro úsek stanovená. V rámci výpočtů tak budou zanedbány sklonové a obloukové poměry.

V případě, kdy se modelová souprava dostane na prvek systému s omezením rychlosti, jako jsou výhybky či křížení s jinými drahami, bude po celé délce soupravy dodržena rychlost pro prvek stanovená. U opatření pro jevy, které se v rámci provozu vyskytují nahodile, nelze určit jejich průměrnou časovou úsporu.

6.1.1 Vstupní předpoklady výpočtů

Zónové úseky o nenulové délce jsou určeny svou délkou v metrech a maximální rychlostí, která je na úseku platná. V případě přechodu z úseku s nižší maximální rychlostí na úsek s maximální rychlostí vyšší, bude započato zrychlování až v momentě vjezdu vozu na úsek s rychlostí vyšší. Obdobně při přechodu na úsek s maximální rychlostí nižší, kde bude zpomalování započato ještě na úseku s rychlostí vyšší tak, aby v momentě vjezdu vozu na úsek s rychlostí nižší byla dodržena maximální stanovená rychlost.

Na bodových zpomalujících prvcích (zejména na výhybkách) bude jejich rychlostní omezení dodrženo celou délkou soupravy, přičemž tato délka bude odečtena od délky úseku následujícího po tomto prvku. Zastávkám, pro odlišení od zpomalovacích prvků bude přiřazena fiktivní marginální délka 0,01 metrů, již bude

přiřazen čas pro obsluhu zastávky vyhrazený, pro účely výpočtů bude univerzálně využíván čas 15 sekund.

6.1.2 Vzorce výpočtů

Čas t_{acc} potřebný k akceleraci na maximální rychlost, kde $v_{max,x}$ je maximální rychlost na aktuálním úseku, $v_{max,x-1}$ maximální rychlost na úseku předešlém a a_{acc} souhrnné výpočtové zrychlení:

$$t_{acc} = \frac{(v_{max,x} - v_{max,x-1})}{a_{acc}}$$

Dráha s_{acc} potřebná k akceleraci, kde t_{acc} je čas potřebný k dané akceleraci, a_{acc} souhrnné výpočtové zrychlení a $v_{max,x-1}$ maximální rychlost na úseku předešlém:

$$s_{acc} = t_{acc} \cdot v_{max,x-1} + \frac{1}{2} \cdot a_{acc} \cdot t_{acc}^2$$

Čas t_{dec} potřebný ke zpomalení, kde $v_{max,x}$ je maximální rychlost na aktuálním úseku, $v_{max,x+1}$ maximální rychlost na úseku následujícím a a_{dec} souhrnné výpočtové zpomalení:

$$t_{dec} = \frac{(v_{max,x} - v_{max,x+1})}{a_{dec}}$$

Dráha s_{dec} potřebná ke zpomalení, kde t_{dec} je čas potřebný k danému zpomalení, a_{dec} souhrnné výpočtové zpomalení a $v_{max,x+1}$ maximální rychlost na úseku následujícím:

$$s_{dec} = t_{acc} \cdot v_{max,x+1} + \frac{1}{2} \cdot a_{dec} \cdot t_{dec}^2$$

Dráha s_{con} během níž se vůz pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem, kde s_{real} je skutečná délka daného úseku, s_{acc} dráha nutná k akceleraci a s_{dec} dráha nutná ke zpomalení:

$$s_{con} = s_{real} - s_{acc} - s_{dec}$$

Čas t_{con} během něhož se vůz pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem, kde s_{con} je dráha rovnoměrného pohybu a $v_{max,x}$ maximální rychlost na úseku:

$$t_{con} = \frac{s_{con}}{v_{max,x}}$$

Speciálním případem je pak situace, kdy vůz na úseku nedosáhne maximální stanovené rychlosti, a tedy po akceleraci následuje ihned decelerace, v tomto případě je potřeba zjistit rychlost v_{int} , což je nejvyšší rychlost, které vůz může na daném úseku dosáhnout při využití maximální možné akcelerace a decelerace.

Speciální rychlost v_{int} dosažené v úseku, kde a_{acc} a a_{dec} jsou souhrnná výpočtová akcelerace, respektive decelerace, s_{real} je skutečná délka úseku, $v_{max,x-1}$ a $v_{max,x+1}$ maximální rychlost na předešlém, respektive následujícím úseku:

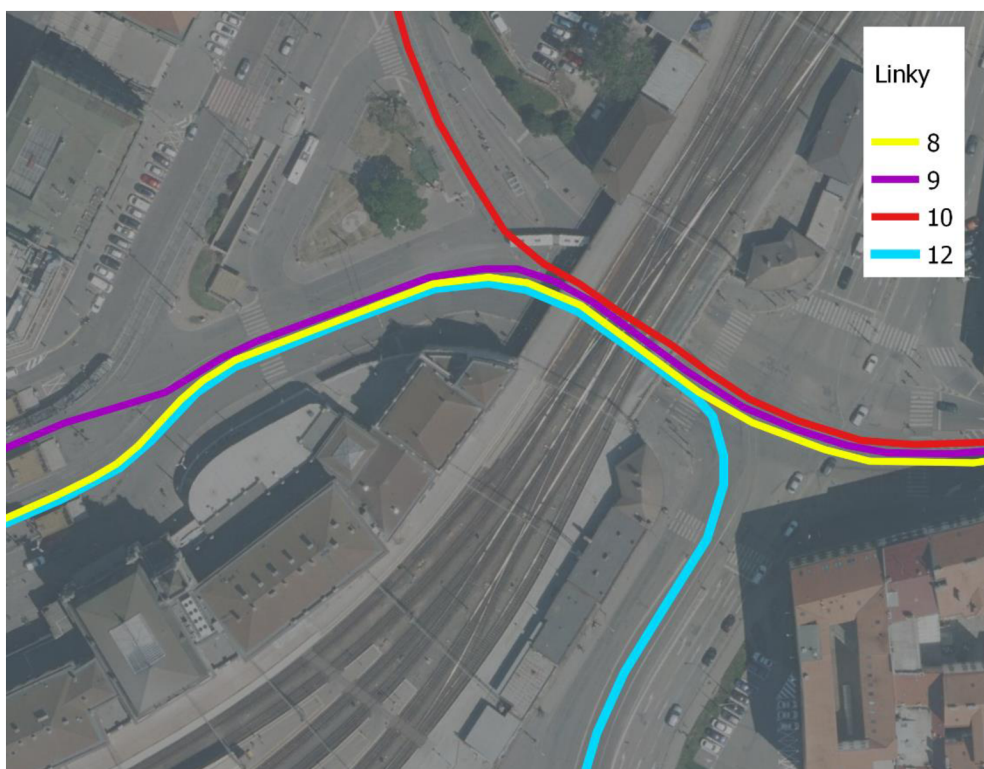
$$v_{int} = \sqrt{\frac{2 \cdot a_{acc} \cdot a_{dec} \cdot s_{real} + v_{max,x-1}^2 \cdot a_{dec} + v_{max,x+1}^2 \cdot a_{acc}}{a_{acc} + a_{dec}}}$$

Následný výpočet času potřebného na zrychlení a zpomalení se pak počítá obdobným způsobem jako čas t_{acc} , respektive t_{dec} s rozdílem, že rychlost $v_{max,x}$ je v tomto specifickém případě nahrazena rychlostí v_{int} .

6.2 OPATŘENÍ V ÚSEKU A - HLAVNÍ NÁDRAŽÍ – KOMÁROV

Jak již bylo popsáno, v roce 2021 byla zkompleťována přeložka této trati z ulice Dorných do ulice Plotní, během které došlo k odstranění ostrých oblouků, smyčky a křížení s pozemními komunikacemi IAD, přičemž byl zároveň úsek segregován od IAD. Toto opatření vedlo ke zkrácení jízdní doby o jednu minutu, ale především byla zajištěna vyšší stabilita dodržování jízdních dob. Mezi zastávkami Úzká a Komárov tak není potřeba navrhovat žádné úpravy.

Jediným z možných opatření je tak vyřešení komplikované situace pod železničním viaduktem, kde se na jedné koleji sjíždí linky 8, 9, 10 a 12, přičemž linky 8, 9 a 10 pokračují dále ve směru ulice Křenové a linka 12 odbočuje do ulice Dorných. Z důvodu tohoto uspořádání tras linek pak může dojít k vzájemnému blokování průjezdu křižovatkou, kdy při seřazení souprav linek směřující dále ulicemi Křenovou a souprav linek směřující ulicemi Dorných souprava první skupiny potenciálně může blokovat linku skupiny druhé a to způsobem, kdy čekáním na signál volno zabrání průjezdu druhé soupravy, která by signálu volno jinak využila.



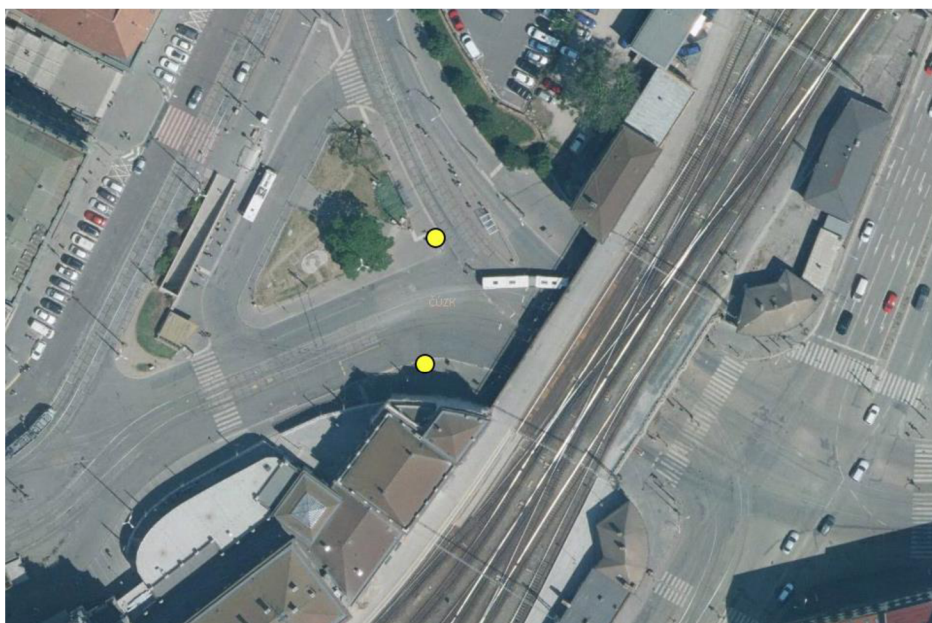
Obrázek 32: Linky pod viaduktem [11]

6.2.1 Řízení sledu vlaků

Řešením výše zmíněného problému by mohl být systém řízení sledu vlaků, který by zajistil rozřazení vozů či souprav ještě před tím, než by vjely do společného úseku trati. Takový systém by aktivně nezasahoval do intervalového nastavení světelné signalizace křižovatky, nýbrž by pouze využíval informace o budoucích signálech křižovatky, které by byly s předstihem přeneseny do předzvěstového signalizačního systému. Vzhledem ke komplexnosti křižovatky a přilehlého přestupního uzlu Hlavní nádraží by se systém mohl aplikovat ve dvou variantách, z nichž každá má své výhody a nevýhody.

6.2.1.1 Varianta A

Varianta A systému řízení sledu vlaků by počítala s vybudováním dvou signalizačních předzvěstí, z nichž první by se nacházela v rámci tramvajového nástupiště číslo 5 (v běžném provozu nástupiště spojů linky 10 ve směru Vlhká), a druhá pak v rámci autobusového nástupiště číslo 10, jež je využíváno zejména pro obsluhu autobusových spojů náhradní dopravy při vlakových výlukách.



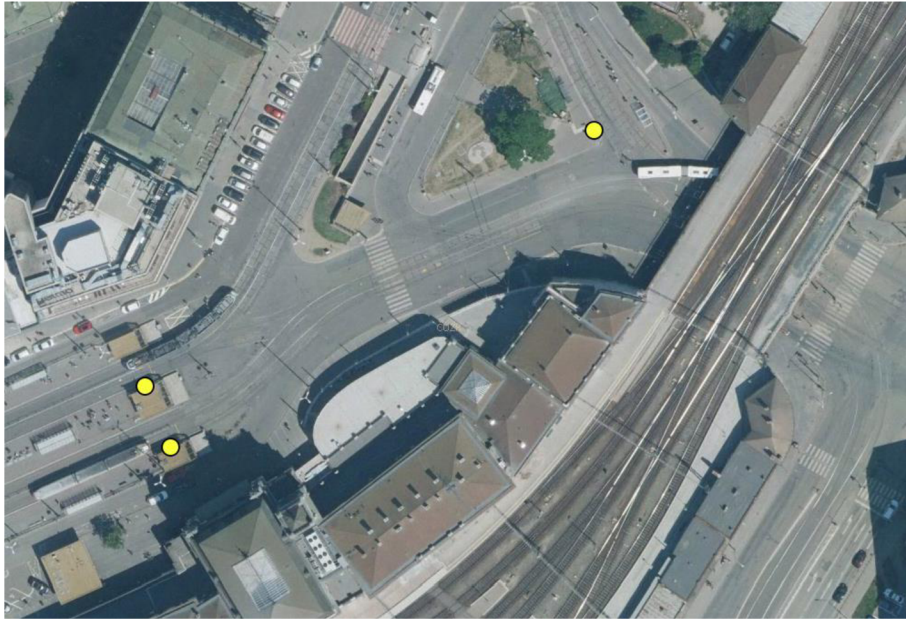
Obrázek 33: Rozmístění předzvěstí ve variantě A [11]

Ve variantním uspořádání A by tak v běžném nevýlukovém provozu bylo zajištěno rozřazování pouze spojů linek 12 a 10, přičemž linka 10 patří k těm nejméně

frekventovaným tramvajovým linkám ve městě. Poměr nákladů a přínosů v tomto případě by pak stál za hlubší zkoumání.

6.2.1.2 Varianta B

Variantní řešení B by pak počítalo s vybudováním tří signalizačních předzvěstí, a to v rámci tramvajového nástupiště číslo 5, a dále v rámci nástupišť číslo 2 (v běžném provozu linka 9) a 4 (v běžném provozu linky 8 a 12) v přednádražním prostoru.



Obrázek 34: Rozmístění předzvěstí, varianta B [11]

Toto uspořádání by pak zajišťovalo možnost řazení sledů vlaků linek 9 a 10 a linky 12, přičemž linky 9 a 12 by byly rozřazeny již v rámci nástupišť 2 a 4 v přednádražním prostoru. Rizikem tohoto uspořádání je však potenciální možnost blokování linek, které z nástupiště číslo 2 pokračují dále ulicí Benešovou, tedy v běžném provozu linky 1, 2, 4 a 7, které by byly blokovány čekajícím spojem linky 9. Tímto uspořádáním by tak sice byl částečně eliminován problém rozřazování souprav před křižovatkou pod železničním viaduktem, avšak mohl by vzniknout problém krystalizace zpoždění linkám, jichž se tato křižovatka přímo nedotýká.

6.2.1.3 Ekonomický aspekt řešení

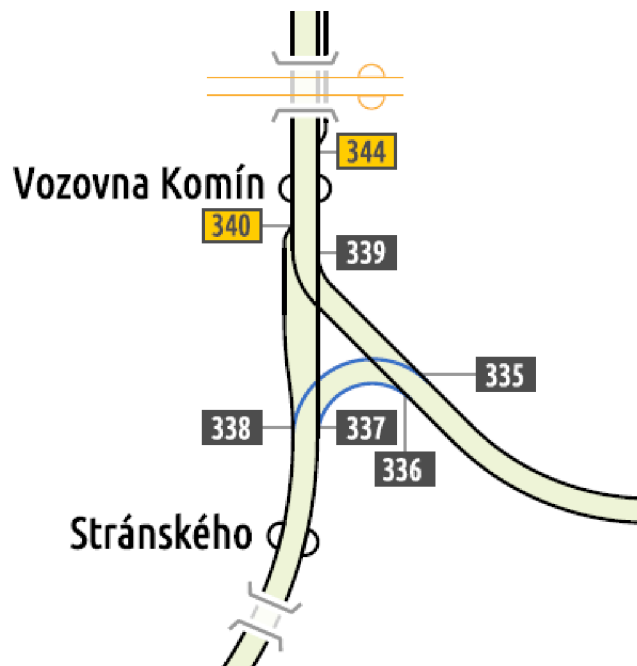
System samotný by se konstrukčně nijak výrazně nelišil od stávajících signalizačních systému DPMB, ve své podstatě by se jím pouze přenášel

intervalový plán světelné křižovatky upraven o předpokládané časy dojezdu vozů a souprav od návěsti ke křižovatce. Z tohoto důvodu by se cena instalace takového systému výrazně nelišila od obdobných projektů a pohybovala by se v řádech do 1 milionu Korun českých. Nutností pro řádné fungování daného systému je však rovněž proškolení všech dotčených pracovníků DPMB včetně řidičů a změna některých interních předpisů v rámci podniku.

6.3 OPATŘENÍ V ÚSEKU B – VOZOVNA KOMÍN–ČESKÁ

6.3.1 Rozvětvení Vozovna Komín

Kolejové rozvětvení při zastávce Vozovna Komín je významným tramvajovým křížením v systému, neboť se zde do jedné trati spojují linky směřující z Pisárek v jednom směru a Žabovřesk ve směru druhém.



Obrázek 35: Schéma rozvětvení [27]

V současnosti je kolejové rozvětvení uspořádáno formou trianglu a zajišťuje teoretickou možnost jízdy všemi směry, nicméně v běžném provozu je využíváno pouze pro směry výše zmíněné. Součástí rozvětvení je tak 5 mechanických výhybek a jedna výhybka elektrická.

V nulové variantě úpravy úseku, tedy při zachování současného stavu, ve směru Vozovna Komín – Sochorova projíždí vozy elektrickou rozjezdovou výhybkou č. 340,

na níž je rychlost v rámci postavení jazyků výhybky do odbočky omezena na 10 km/h, a dále mechanickou sjezdovou výhybku č. 336 včetně kolejového křížení v přímém směru, kde je maximální rychlost omezena na 30 km/h. Ve směru opačném se pak jedná o rozjezdovou mechanickou výhybku č. 335 projížděnou v přímém směru, a tedy omezenou na rychlost 15 km/h, a dále o mechanickou sjezdovou výhybku č. 339, kde se sjíždí z odbočky a maximální rychlost průjezdu je stanovena na 15 km/h.

Varianta A opatření v úseku by počítala s odstraněním kolejové spojky tratí do Žabovřesk a Pisárek, a tedy s trvalým odstraněním výhybek číslo 335, 336, 337 a 338, a to za předpokladu, že tato kolejová spojka je zbytná a její současná vytíženost by se dala přenést na jiné odstavné koleje v její blízkosti, například do smyčky Komín.

Varianta B řešení propadů rychlostí na rozvětvení pak počítá s úpravami v rámci varianty A a je dále rozšířena nahrazením výhybek číslo 339 a 340 výhybkami rychlostními po vzoru kolejového rozvětvení při ulici Ostravské. To by pro soupravy jedoucí ve směru Vozovna Komín – Sochorova znamenalo navýšení maximální rychlosti na hrotech výhybky ze současných 10 km/h na 40 km/h a ve směru opačném pak při sjezdu po hrotech výhybky ze současných 15 km/h na 40 km/h. Vybudování rychlostního rozvětvení a současné zachování kolejové spojky by pak byl kontraproduktivní tah, který by zcela eliminoval benefity rychlostního křížení.

6.3.1.1 Časová bilance opatření pro úsek Vozovna Komín - Sochorova

Tabulka 15: Časová bilance opatření mezi zastávkami Vozovna Komín a Sochorova

Směr: Vozovna Komín – Sochorova	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	81,10	-0,00
Varianta A (odstranění spojky)	77,57	-3,53
Varianta B (rychlostní výhybka)	60,61	-20,49

Tabulka 16: Časová bilance opatření pro úsek Sochorova – Vozovna Komín

Směr: Sochorova – Vozovna Komín	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	68,10	-0,00
Varianta A (odstranění spojky)	65,34	-2,76
Varianta B (rychlostní výhybka)	54,71	-13,39

Odstranění kolejové spojky v rámci rozvětvení by přineslo obousměrnou časovou úsporu v řádech nižších jednotek sekund, přičemž by tato úspora byla vykoupena odstraněním využitelných odstavných kolejí.

Zajímavější časové benefity ale získáme aplikací rychlostního rozvětvení, ve směru Vozovna Komín – Sochorova by takové opatření přineslo časovou úsporu okolo 20 sekund, v opačném směru pak 13 sekund, což už jsou úspory, které v rámci celkového pohledu stojí za úvahu.

6.3.2 Řešení problémového úseku Veverí

Vzájemná koexistence tramvají a vozidel individuální automobilové dopravy na úseku ulice Veverí při Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně je v současném uspořádání zdrojem nestability v dodržování jízdních dob mezi zastávkami Tábor a Rybkova. Základní myšlenkou budoucích řešení této lokality by tak mělo být vytvoření vzájemně bezkolizních tras tramvají a vozidel IAD, čímž by byl eliminován problém s čekáním tramvajových vozů v dopravních kongescích. Navrhovaná řešení lze rozdělit do dvou kategorií, ta první počítá s plnohodnotným zachováním IAD, ta druhá s jejím odklonem do jiných městských ulic.

Pokud bychom tedy chtěli ponechat IAD ve zmiňovaném úseku a zachovat stávající tramvajovou trať, jediným možným řešením by bylo rozšíření jízdního pruhu IAD ve směru do centra, a to na úkor přilehlého chodníku při fakultě stavební. V rámci těchto úprav by bylo vhodné vyřešit i samotnou zastávku Rybkova ve směru do centra, která je v současnosti řešena způsobem, kdy jsou cestující nuceni využívat

pro výstup a nástup vozovky. Pro zajištění její bezbariérovosti se v tomto případě nejlépe hodí vybudování zastávky vídeňského typu, neboť vybudování zastávky s nástupním ostrůvkem by v tomto případě z důvodu stísněných šířkových poměrů bylo velmi komplikované a pravděpodobně by se neobešlo bez zásahu do pozemků fakulty stavební.

Druhým pohledem na celou problematiku je úplné nebo jednosměrné vyloučení individuální automobilové dopravy z tohoto úseku, kterým by však došlo k zatížení okolních komunikací v lokalitě. Proti tomuto návrhu se staví i vedení městské části Brno-střed [28].

6.4 OPATŘENÍ V ÚSEKU C1 – EČEROVA-VOZOVNA KOMÍN

6.4.1 Rekonstrukce tramvajového tělesa při ulici Obvodové

Na rok 2024 je Dopravním podnikem města Brna naplánována kompletní rekonstrukce tramvajového tělesa mezi zastávkami Přístaviště a Zoologická zahrada, jejíž výsledkem bude mimo jiné i navýšení traťové rychlosti v tomto úseku ze současných 60 km/h, respektive na části úseku z 50 km/h, na 70 km/h v obou směrech trati [29].

6.4.1.1 Časová bilance opatření

Tabulka 17: Časová bilance úseku Přístaviště – Zoologická zahrada

Směr Přístaviště – Zoologická zahrada	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	81,06	-0,00
Varianta A (navýšení rychlosti na 70 km/h)	73,62	-7,44

Tabulka 18: Časová bilance úprav úseku Zoologická zahrada – Přístaviště

Směr Zoologická zahrada - Přístaviště	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	83,17	-0,00
Varianta A (navýšení rychlosti na 70 km/h)	78,47	-4,70

Navýšením maximální traťové rychlosti, zejména na delších úsecích můžeme dosáhnout významných časových úspor. Konkrétně ve směru Zoologická zahrada – Přístaviště, kde je v současnosti maximální traťová rychlost stanovena na 60 km/h, dosáhneme jejím navýšením o 10 km/h časové úspory bezmála 5 sekund.

Výraznější časovou úsporu pak získáme v opačném směru, což je dáno současným nastavením traťových rychlostí, kdy zhruba na polovině úseku je stanovena rychlost 60 km/h, která je však na druhé polovině omezena na 50 km/h z důvodu bezpečnosti. Navýšením rychlosti na 70 km/h tak dosáhneme ještě výraznější časové úspory, v tomto případě pak zhruba 7,5 sekundy.

6.4.2 Navýšení maximálních traťových rychlostí mezi zastávkami Přístaviště – Ečerova

Uvedeme-li do života myšlenku navýšení maximální traťové rychlosti po vzoru úseku při ulici Obvodové i pro segment mezi zastávkami Přístaviště a Ečerova, tedy pokud by byly provedeny takové úpravy na tramvajovém tělese, které my zajistily možnost maximální traťové rychlosti 70 km/h na úseku, dosáhli bychom dalších časových úspor.

Tabulka 19: Časová bilance opatření v úseku Přístaviště – Ečerova

Směr Přístaviště – Ečerova	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	242,46	-0,00
Varianta A (navýšení rychlosti na 70 km/h)	235,71	-6,89

Tabulka 20: Časová bilance opatření v úseku Ečerova – Přístaviště

Směr Ečerova – Přístaviště	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	226,32	-0,00
Varianta A (navýšení rychlosti na 70 km/h)	219,36	-6,96

Navýšením traťové rychlosti v tomto úseku bychom dosáhli obousměrné úspory času okolo 7 sekund. Je však potřeba dodat, že na rozdíl od úseku při ulici Obvodové je segment mezi zastávkami Přístaviště a Ečerova výrazně komplikovanější co se úprav tramvajového tělesa týče, a to z důvodu komplikovanějšího vedení trati, která je ve dvou úsecích vedena na mostních konstrukcích a nachází se v těsnější blízkosti zástavby, což by znamenalo především vyšší investiční náklady na provedení těchto úprav. Poměr užitku a vstupních nákladů by tak byl otázkou hlubší diskuse.

6.4.3 Mimoúrovňové křížení Kamenolom

V roce 2020 byl odsouhlasen plán stavby mimoúrovňové křižovatky Kamenolom, což je v současnosti velmi komplikovaná křižovatka, na níž se kříží čtyři pruhy automobilové dopravy včetně dopravy trolejbusové, a zároveň je protínána řešenou tramvajovou tratí.



Obrázek 36: Křižovatka Kamenolom [11]

V souladu se stávajícími plány je zohledněno zachování pozemního tramvajového koridoru. Nad tímto úsekem bude realizována konstrukce mostu, na němž bude umístěn pětipaprskový kruhový objezd. Tato architektonická konfigurace propojí centrum města s oblastí Bystrce a zároveň umožní nepřerušný průběh tramvajové dopravy v daném směru [30].

Současné plány však i přes zachování koridoru znamenají jisté změny vedoucí ke zrychlení jejího provozu. Zásadním pro tramvajovou dopravu v dané lokalitě bude zrušení světelně řízeného přejezdu, na kterém navíc ještě křížuje trolejbusovou dráhu a rychlost je zde tedy omezena na 30 km/h. Diskutabilnější je pak plánované zrušení zastávky Kamenolom, které by jistě přineslo časovou úsporu v rámci celého úseku, nicméně by byla výrazně omezena dostupnost tramvajové dopravy pro obyvatele v blízkém okolí současné zastávky.

6.4.3.1 Časová bilance opatření

Tabulka 21: Časová bilance opatření v úseku Zoologická zahrada – Podlesí

Směr Zoologická zahrada – Podlesí	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	148,44	-0,00
Varianta A (odstranění přejezdu)	144,68	-3,76
Varianta B (odstranění přejezdu i zastávky)	113,41	-35,03

Tabulka 22: Časová bilance opatření v úseku Podlesí – Zoologická zahrada

Směr Podlesí – Zoologická zahrada	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	149,34	-0,00
Varianta A (odstranění přejezdu)	144,74	-4,60
Varianta B (odstranění přejezdu i zastávky)	113,47	-35,87

VARIANTNÍ ŘEŠENÍ A, které by počítalo pouze s odstraněním křížení tramvajové trati s pozemní komunikací, jejíž součástí je i trolejové vedení trolejbusů při zachování tramvajových zastávek Kamenolom v současných dislokacích by přineslo časovou úsporu zhruba 4 sekund.

Uspořádání, které by počítalo kromě zrušení přejezdu i se zrušením zastávek Kamenolom pro tramvajovou dopravu, by pak přineslo úsporu mnohem vyšší. Ta by byla získána odstraněním omezené rychlosti při křížení trolejí, ale zejména úsporou času neobsluhováním zastávky, včetně času potřebného ke zrychlení ze zastávky a brzdění do ní. V průměru by se tento časový zisk pohyboval okolo 35 sekund čistého času, což je hodnota výrazná, avšak byla by vykoupena omezením dostupnosti tramvajové dopravy pro cestující z oblasti zastávky Kamenolom.

6.5 OPATŘENÍ V ÚSEKU C2 – HLAVNÍ NÁDRAŽÍ - VOZOVNA KOMÍN

6.5.1 Rozvětvení Vozovna Komín

Teoretické možnosti opatření v rámci rozvětvení Vozovna Komín a jejich předpoklady byly blíže specifikovány v rámci kapitoly 7.3.1.

Varianta A úprav v rámci uzlu Vozovna Komín je založena na předpokladu teoretické zbytnosti odstavných kolejí mezi tratěmi ve směrech Vozovna Komín – Sochorova a Vozovna Komín – Stránského, a počítala by tedy s odstraněním mechanických výhybek číslo 335, 336, 337 a 338, neboť se jedná o prvky s omezenou rychlostí průjezdu.

Varianta B by počítala s odstraněním výhybek dle varianty A, a dále nahrazení výhybek číslo 339 a 340 rychlostními výhybkami po vzoru již realizovaného tramvajového rozvětvení při ulici Ostravské. V praxi by opatření ve směru Vozovna Komín znamenalo navýšení rychlosti při sjezdu z hrotů výhybky z 30 km/h na 60 km/h, v opačném směru pak navýšení rychlosti na hrotech výhybky z 15 km/h na 60 km/h.

6.5.1.1 Časová bilance opatření

Tabulka 23: Časová bilance opatření v úseku Vozovna Komín – Stránského

Směr Vozovna Komín – Stránského	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	90,31	-0,00
Varianta A (odstranění přejezdu)	85,80	-4,51
Varianta B (odstranění přejezdu i zastávky)	71,91	-18,40

V současné nulové variantě musí tramvajové soupravy v běžném provozu zdolávat v obou směrech jednu rozjezdovou elektrickou výhybku a jednu mechanickou výhybku sjezdovou, které jsou rozjížděny a sjížděny v přímém směru s výjimkou výhybky číslo 112, která je sjížděna z odbočky.

Varianta A opatření pak počítá se zrušením středové koleje včetně všech výhybek, a to za předpokladu její aktuální zbytnosti. V současnosti se kolej využívá jako odstavná, ale také při velkokapacitních akcích pořádaných na výstavišti k seřazování vozů. Proveditelnost této úpravy by pak počítala s dostatečností odstavných ploch v okolí, v tomto případě se jedná o samotnou pisáreckou vozovnu a smyčku Mendlovo náměstí. Seřazování vozů pro velkokapacitní akce by pak pro směr do Bystrce probíhalo dle současných procedur, pro seřazování vozů směřujících dále do centra by byly využity prostory pisárecké vozovny včetně nově budované vratné smyčky.

6.5.2.1 Časová bilance opatření

Tabulka 25: Časová bilance úprav v úseku Výstaviště-vstup G2 – Mendlovo náměstí

Směr Výstaviště-vstup G2 – Mendlovo náměstí	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	164,83	-0,00
Varianta A	144,87	-19,81

Tabulka 26: Časová bilance úprav v úseku Mendlovo náměstí – Výstaviště-vstup G2

Směr Mendlovo náměstí – Výstaviště-vstup G2	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	155,99	-0,00
Varianta A	146,54	-9,45

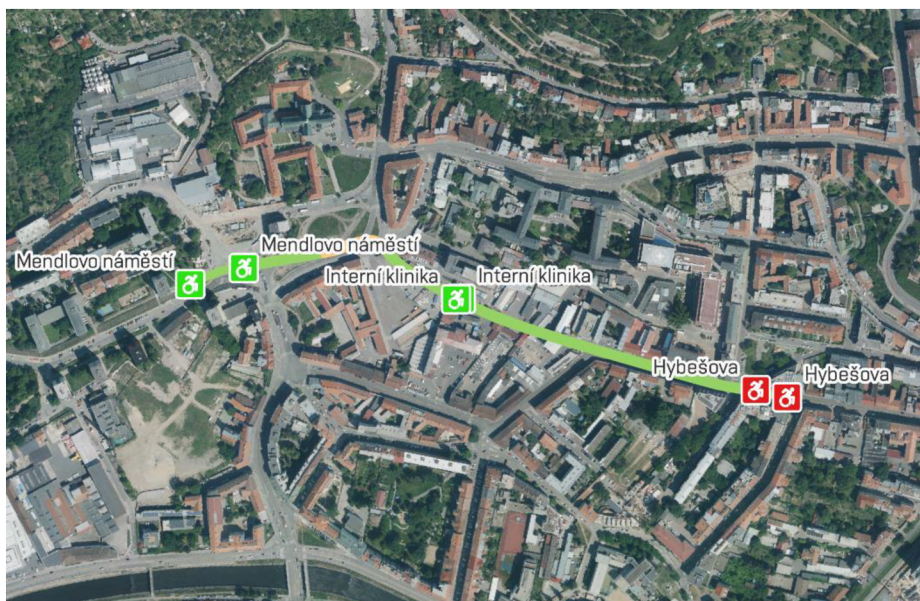
Redispozicí zastávky Výstaviště – hlavní vstup ve směru do centra by bylo dosaženo úspory 20 sekund, v opačném směru poté 9 sekund. Výraznější časová úspora ve směru do centra je dána současnou dispozicí, kdy směr do centra je více zasažen rychlostními omezeními na výhybkách.

6.5.3 Mendlovo náměstí

Mendlovo náměstí je jeden z nejvýznamnějších přestupních uzlů v rámci brněnské aglomerace, kam kromě samotných tramvajových linek 1, 5 a 6 zajíždí i vytížené trolejbusové linky 25 a 26, ale i další spoje brněnské městské hromadné dopravy i dopravy regionální.

Nulová varianta by počítala se zachováním současného uspořádání tratí, přičemž by byl aplikován systém řízení sledu vlaků po vzoru navrženého systému na úseku Hlavní nádraží – Komárov, přičemž rozřazovací předzvěsti by byly umístěny v rámci nástupiště linky číslo 1 ve směru do centra, a druhá v rámci nástupiště linek 5 a 6 ve směru Poříčí.

Varianta A by počítala s novým vedením trati, a to dle rezervy navržené v novém územním plánu města Brna. V tomto novém uspořádání by se nová trať odpojila v ulici Hybešova od stávající trati a průrazem jižní části areálu Fakultní nemocnice u svaté Anny by se opět napojila na stávající trať v oblasti uzlu Mendlovo náměstí, přičemž na novém úseku by byla vytvořena nová zastávka.



Varianta B by pak počítala s novým vedením trati dle varianty A, zároveň by došlo ke zrušení stávajícího kolejového vedení ulicí Václavskou, díky čemuž by pak linka 2 obsluhovala nácestné Mendlovo náměstí.

6.5.3.1 Časová bilance opatření

Tabulka 27: Časová bilance úprav v úseku Mendlovo náměstí – Hybešova

Směr Mendlovo náměstí – Hybešova	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	156,08	-0,00
Varianta A (nové vedení)	132,05	-24,03
Varianta B (přeložka)	128,44	-27,64

Tabulka 28: Časová bilance úprav v úseku Hybešova – Mendlovo náměstí

Směr Hybešova – Mendlovo náměstí	Celkový čas [s]	Úspora oproti variantě 0 [s]
Varianta 0	176,24	-0,00
Varianta A (nové vedení)	151,91	-24,33
Varianta B (přeložka)	140,22	-36,02

Novým vedením trati skrze jižní část areálu Fakultní nemocnice u svaté Anny by kromě uvolnění dopravy v ulici Václavské došlo rovněž k výrazné časové úspoře, která by se v obou směrech pohybovala okolo 25 sekund. Nicméně vybudování tohoto nového koridoru by s sebou přineslo výrazné investiční náklady a zásah do staveb, které se v současnosti v areálu nacházejí.

Kompletní přeložka, tedy zrušení stávající tratě ulicí Václavskou by pak přineslo ještě vyšší časovou úsporu z důvodu zrušení rozvětvení mezi novou a stávající tratí, a zároveň by byl kvalitněji obsluhován uzel Mendlovo náměstí z důvodu závleku linky 2 do něj.

6.6 CELKOVÁ ČASOVÁ BILANCE ÚSEKU BYSTRC, EČEROVA – VOZOVNA KOMÍN – HLAVNÍ NÁDRAŽÍ

Tabulka 29: Souhrn časových úspor pro linku 1

Úprava	Časová bilance ve směru Ečerova – Hlavní nádraží [s]	Časová bilance ve směru Hlavní nádraží – Ečerova [s]
Navýšení maximálních traťových rychlostí v úseku Ečerova – Přístaviště	-7,44	-4,70
Rekonstrukce tramvajové dráhy při ulici Obvodové	-6,96	-6,89
Mimoúrovňová křižovatka Kamenolom, varianta B	-35,03	-35,87
Opatření v lokalitě Vozovna Komín	-18,40	-17,80
Redispozice zastávky Výstaviště – hlavní vstup	-19,81	-9,45
Přeložka tramvajové trati z ulice Václavské do areálu FNUSA	-27,64	-36,02
Celkem	-115,28	-110,73

Souborem navržených opatření pro trasu Bystrc, Ečerova – Vozovna Komín – Hlavní nádraží by vznikla celková časová úspora blížící se 2 minutám času, a to v obou směrech trasy. Tato nabytá časová rezerva by se dala využít jednak ke zkrácení jízdních dob v rámci jízdního řádu linky číslo 1, nebo k zachování současného uspořádání jízdních dob a využití rezervy pro komfortnější časové rozvržení trasy. Nejideálněji by se pak jevila kombinace výše zmíněných možností, tedy odebrání jedné minuty na vhodném místě v jízdním řádu linky, a ponechání jedné minuty k pokrytí vznikajících zpoždění v současném vedení linky.

Je však nutné dodat, že ekonomická a časová náročnost opatření je velmi vysoká, a byla by závislá na investicích v řádech desítek miliard Kč. Rovněž by realizace navržených opatření znamenala vyluku některých úseků trati, která by se pohybovala v řádech jednotek let.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo koncepční posouzení brněnského tramvajového systému se záměrem identifikovat příčiny zpoždění a navrhnout opatření vedoucí k jejich eliminaci a zvýšení rychlosti v systému jako takovém.

Úvodní část práce se zabývala teoretickým východiskům rychlé tramvajové dopravy a jejímu významu v rámci městské hromadné dopravy.

V analytické části byl zkoumán současný stav brněnského tramvajového systému, a to z pohledu rychlosti dopravy a intenzity provozu, načež byly identifikovány zpomalující prvky v systému a jejich omezení. Dále byly nalezeny lokality ve městě Brně, kde ke zpoždění tramvajové dopravy dochází nejčastěji. Na základě této analýzy byl zpracován přehled možných opatření, a to jak existujících, tak i nových, které vedou ke zrychlení tramvajové dopravy.

V závěrečné části byly detailně zanalyzovány vybrané segmenty brněnského tramvajového systému, a to zejména z pohledu jízdních dob a přírůstků zpoždění na jednotlivých úsecích těchto segmentů. Na základě této analýzy byly pak pro tyto segmenty navrženy konkrétní opatření a úpravy, které vedou k navýšení průjezdních rychlostí tramvajů nebo odstranění nahodilých propadů rychlostí v těchto úsecích. Tyto úpravy byly následně výpočty ověřeny a vyhodnoceny v kontextu jednotlivých úseků dráhy.

Optimalizací tramvajového systému v oblasti jízdních řádů, dopravních systémů a kolejového uspořádání tak lze dosáhnout cenných časových úspor v rámci běžného provozu, jejichž využití ke zkrácení cestovních dob nebo k eliminaci zpoždění je příležitostí pro další navyšování kvality a konkurenceschopnosti brněnské tramvajové dopravy.

8 POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA

- [1] KOTAS, Patrik. *Dopravní systémy a stavby*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2321-4.
- [2] Koncepce Smart Cities: odolnost prostřednictvím SMART řešení pro obce, města a regiony. Online. Praha: Ministerstvo pro místní rozvoj, 2021. Dostupné z: <https://budtesmart.cz/koncepce-smart-cities>. [cit. 2024-01-11].
- [3] BRNĚNSKÉ KOMUNIKACE A.S. Ročenka dopravy 2022. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.bkom.cz/informacni-centrum/rocenky-dopravy-brno-15/rocenka-dopravy-brno-2022-pdf-225>..
- [4] Dopravní generel města. Online. Statutární město Brno. Dostupné z: <https://www.brno.cz/w/dopravni-generel-mesta>. [cit. 2023-06-14]. online. In: Dopravní generel města. [cit. 2023-06-14].
- [5] Směrnice D21: Návěštní soustava. Upravené vydání. DPMB, 2017..
- [6] IDS JMK. Sledování provozu IDS JMK. Online. 2023. Dostupné z: <https://mapa.idsjmk.cz/>. [cit. 2023-12-12].
- [7] DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA BRNA A.S. Organizování městské hromadné dopravy: Směrnice D01. Revize 6. Brno: DPMB, 2017.
- [8] Rychlost tramvajové dopravy. Online. MHD Ostrava. Ostrava, 2023. Dostupné z: http://mhd-ostava.cz/?s=rychlost_tramvajove_dopravy. [cit. 2023-06-27].
- [9] Pohyb vozidel MHD. Online. Kancelář architekta města Brna. Brno, 2023. Dostupné z: http://webmaps.kambrno.cz/webmaps.kambrno.cz/pohyb_vozidel_mhd/. [cit. 2023-06-27].
- [10] ČSN 73 6405, Projektování tramvajových tratí. Český normalizační institut, 2022.
- [11] KOPECKÝ, Vojtěch. *Mapa autora práce na podkladu ortofoto ČÚZK*. 2024.
- [12] Územní plán města Brna: Návrh pro 2. opakované veřejné jednání. In: . Brno: SMB, KAM Brno, 2021. Dostupné také z: <https://upmb.brno.cz/pripravovany-uzemni-plan/ii-upraveny-navrh-2021/>.
- [13] KOPECKÝ, Vojtěch. *Fotografie autora práce*. 2024.

- [14] Zpráva o plnění závazku veřejné služby za rok 2019. Online. In: . Brno: Dopravní podnik města Brna. Dostupné z:
https://www.brno.cz/fileadmin/user_upload/sprava_mesta/magistrat_mesta_brna/OD/Smlouva_o_zavazku_veřejne_sluzby/Zprava_o_plneni_zavazku_veřejne_sluzby_za_rok_2019.pdf. [cit. 2022-05-11].
- [15] SKORUS, Daniel. *Výukový materiál pro uchazeče o práci řidiče tramvaje*. Diplomová práce, vedoucí Ing. Jan Děcký. Brno: Masarykova univerzita, pedagogická fakulta, katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání, 2015.
- [16] DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA BRNA A.S. Seznam tramvajových nástupišť s nájezdovými rampami k 1.5.2023. Online. Dpmb.cz. Dostupné z:
https://www.dpmb.cz/sites/default/files/jizdni-rady/Ostatn%C3%AD%20pdf/230501_web_nast-s-rampami_ed.pdf. [cit. 2023-12-13].
- [17] DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA BRNA A.S. Přehled tramvajových zastávek, které nemají nástupní ostrůvek. Online. Dpmb.cz. 2023. Dostupné z:
https://www.dpmb.cz/sites/default/files/jizdni-rady/Ostatn%C3%AD%20pdf/230501_web_vystup-do-vozovky.pdf. [cit. 2023-12-29].
- [18] KOPECKÝ, Vojtěch. *Mapa autora práce na podkladu OpenStreetMap*. 2024.
- [19] Územní plán města Brna: Návrh pro 2. opakované veřejné jednání. In: . Brno: SMB, KAM Brno, 2021. Dostupné také z: <https://upmb.brno.cz/pripravovany-uzemni-plan/ii-upraveny-navrh-2021/>.
- [20] KÁRNÝ, Michal. *Tramvaje pod zemí? Myšlenka stále přežívá*. online. In: Brnenskydenik.cz. 2009. Dostupné z: <https://brnensky.denik.cz/serialy/tramvaje-pod-zemi-myslenka-stale-preziva20091018.html>. [cit. 2023-12-10].
- [21] HANÁK, Radomír. *Tramvaj Plotní - soubor staveb - etapa 2-4: A. Průvodní zpráva*. Sudop Brno spol. s.r.o., 2016.
- [22] Rychlosti šalin (rychlosti tramvají v Brně) [@Dobrovolný šalinář]. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=QHivufmrC8s&t=269s>. [cit. 2024-01-11].
- [23] BMHD. Zahájení rychlostního provozu na rozvětvení linek 8 a 10 při ulici Ostravská. Online. Bmhd.cz. 2020. Dostupné z:
<https://www.bmhd.cz/aktuality/aktualita.php?1630>. [cit. 2023-12-10].

- [24] V Ostravě je hotová další tramvajová trať na 80 km/h, na Dubinu přibyly nízké protihlukové stěny. Online. In: . Dostupné z: <https://zdopravy.cz/v-ostrave-je-hotova-dalsi-tramvajova-trat-na-80-km-h-na-dubinu-pribyly-nizke-protihlukove-steny-135276/>. [cit. 2023-12-05].
- [25] Tři roky a 1,2 miliardy. Plotní ulicí v Brně dnes začínají jezdit tramvaje. Online. In: Zdopravy.cz. 2021. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/tri-roky-a-12-miliardy-plotni-ulici-v-brne-dnes-zacinaji-jezdit-tramvaje-85701/>. [cit. 2023-12-10].
- [26] STREETMIX. Veverí-Streetmix. Online. Streetmix.net. 2024. Dostupné z: <https://streetmix.net/wojtech.kopecky/1/veveri>. [cit. 2024-01-10].
- [27] DPMB A.S., . *MHD Brno Schéma sítě tramvajové dráhy*. Schéma. 2022.
- [28] BRNĚNSKÝ DENÍK. Veverí bez aut a rozdělená pěší zónou? Nechceme, rozhodli radní městské části. Online. Brnenskydenik.cz. 2020. Dostupné z: https://brnensky.denik.cz/zpravy_region/veveri-bez-aut-a-rozdelena-pesi-zonou-nehceme-rozhodli-radni-mestske-casti-20190425.html. [cit. 2024-01-07].
- [29] ZDOPRAVY.CZ. Zrychlení tramvají k přehradě a dokončení obří harfy. Brno čeká příští rok několik velkých staveb. Online. Zdopravy.cz. 2023. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/zrychleni-tramvaji-k-prehrade-a-dokonceni-obri-harfy-brno-ceka-pristi-rok-nekolik-velkych-staveb-186554/>. [cit. 2024-01-05].
- [30] BRNOINMOTION. Mimoúrovňové křížení Kamenolom. Online. Brnoinmotion. 2024. Dostupné z: <https://brnoinmotion.cz/projekt/mimourovnove-krizeni-kamenolom/>. [cit. 2024-01-03].

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

(z)	Zastávka na znamení
(X)	Výluková linka
BB	Bezbariérová zastávka
ČR	Česká republika
DPMB	Dopravní podnik města Brna a.s.
FNUSA	Fakultní nemocnice u svaté Anny
IAD	Individuální automobilová doprava
IDSJMK	Integrovaný dopravní systém Jihomoravského kraje
JŘ	Jízdní řád
Kč	Koruna Česká
Km/h	kilometrů za hodinu
MHD	Městská hromadná doprava
NN	Zastávka s nízkým nástupištěm
ÚP	územní plán
VN	Zastávka s vysokým nástupištěm
VO	Zastávka bez nástupního ostrůvku se vstupem do vozovky
Voz/hod	vozidel za hodinu

10 SEZNAM PŘÍLOH

MAPOVÉ PODKLADY V MĚŘÍTKU 1:5000 [11]

1_A_VZK_ECE	Vozovna Komín – Bystrc, Ečerova (současné vedení)
1_B_ECE_VZK	Bystrc, Ečerova – Vozovna Komín (současné vedení)
1_C_HLN_VZK	Hlavní nádraží – Vozovna Komín (současné vedení)
1_D_VZK_HLN	Vozovna Komín – Hlavní nádraží (současné vedení)
3_A_VZK_CES	Vozovna Komín – Česká (současné vedení)
3_B_CES_VZK	Česká – Vozovna Komín (současné vedení)
12_A_HLN_KOM	Hlavní nádraží – Komárov (současné vedení)
12_B_KOM_HLN	Komárov – Hlavní nádraží (současné vedení)
12_C_HLN_KOM	Hlavní nádraží – Komárov (původní vedení)
12_D_KOM_HLN	Komárov – Hlavní nádraží (původní vedení)

VÝPOČTY

A	Soubor výpočtů časových bilancí
---	---------------------------------

