

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

Bc. LUKÁŠ MLÁDEK

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Návrh a simulace automatizovaného
provozu linky metra D**

Bc. Lukáš Mládek

Diplomová práce

2021

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Mládek**
Osobní číslo: **D17406**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Technologie a řízení dopravy**
Téma práce: **Návrh a simulace automatizovaného provozu linky metra D**
Zadávací katedra: **Katedra technologie a řízení dopravy**

Zásady pro vypracování

Úvod

1. Demografie a analýza dopravy zkoumané oblasti
2. Systém automatického provozu
3. Tvorba infrastruktury SW OpenTrack
4. Návrhy, simulace provozních konceptů

Závěr

Rozsah pracovní zprávy: **50-60**
Rozsah grafických prací: **5-6**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 62290-1 ED.2. Drážní zařízení – Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou – Část 1: Systémové principy a základní pojmy. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
ČSN EN 62290-2 ED.2. Drážní zařízení – Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou – Část 2: Specifikace funkčních požadavků. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
FOJTÍK, Pavel. 30 let pražského metra. 2., rozš. Vyd. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy. ISBN 80-239-2704-3

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Nachtigall, Ph.D.**
Katedra technologie a řízení dopravy

Datum zadání diplomové práce: **22. září 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. ledna 2021**

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji:

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

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 15.01.2021

.....

Bc. Lukáš Mládek

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Nachtigalovi, Ph.D. za smyslné vedení práce, za jeho ochotu poradit a pomoci nejen v situacích přímo souvisejících s tvorbou diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Eriku Tischerovi, za odbornou pomoc při používání SW OpenTrack. Na závěr bych rád poděkoval všem, kteří mi v letošním zatím nelehkém roce dopomohli k dopsání diplomové práce.

ANOTACE

Práce si klade za cíl analyzovat aktuální stav přípravy budování nové trasy metra D. Magistrát hlavního města počítá se stavbou samostatné trasy, nebo trasy jako větve současné trasy C. Pro variantu samostatné trasy bude v této práci sestavena simulace automatizovaného provozu. Cílem práce je sestavit simulaci ve variantách konvenčního a maximálního provozu pro nově budovanou trasu metra D v Praze.

KLÍČOVÁ SLOVA

Simulace automatizovaného provozu, pražské metro, trasa D, CBTC

TITLE

Project and simulation of automated traffic on the line metro D

ANNOTATION

The thesis deals with the analysis of the current state of the D metro railway. The capital town-council counts on the creation of an independent railway, or alternatively, a branch of the current C metro railway. A simulation of independent automated traffic will be desined. The aim of this thesis is to design simulation in forms of conventional and maximal traffic for the newly constructed metro railway in Prague.

KEY WORDS

Simulation of automated traffic, Prague Underground transport systém, Line D, CBTC

OBSAH

PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	3
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	11
ÚVOD	12
1 HISTORIE A ANALÝZA SOUČASNÉHO PROVOZU MHD NA TRASE METRA D	13
1.1 Historický vývoj plánování trasy D	13
1.2 Charakteristika dotčené části hlavního města Prahy	17
1.3 Demografie obyvatelstva spádové oblasti a možnost úpravy návazných druhů mhd	18
1.3.1 Pankrác	18
1.3.2 Krč + Budějovická.....	19
1.3.3 Lhotka + sídliště Krč	21
2 PROBLEMATIKA AUTOMATIZOVANÉHO PROVOZU	23
2.1 Stupně automatizace	23
2.1.1 Provoz vlaku podle rozhledu – GoA0	23
2.1.2 Neautomatizovaný provoz vlaku – GoA1	24
2.1.3 Poloautomatizovaný provoz – GoA2	24
2.1.4 Provoz vlaku bez strojvedoucího – Goa3	25
2.1.5 Bezobslužný provoz vlaku – Goa4	26
2.1.6 Postupné zavádění jednotlivých stupňů automatizace	26
2.2 Obecná organizace provozu.....	26
2.2.1 Základní provozní pravidla.....	27
2.2.2 Zásady zajištění bezpečného pohybu všech vlaků po síti	28

2.3	Funkce a bezpečnostní požadavky pro automatický provoz vlaku metra	29
2.4	Communications-Based Train Control (CBTC).....	30
2.5	Zabezpečovací zařízení pro automatické metro	34
3	PŘÍPRAVNÁ FÁZE SIMULACE A VÝBĚR PROVOZNÍHO KONCEPTU	38
3.1	SW OpenTrack	38
3.2	Příprava pro vlastní simulaci	39
3.2.1	Vytvoření infrastruktury pro simulaci	40
3.2.2	Zadání parametrů souprav	41
3.2.3	Vložení jízdnic cest	41
3.2.4	Vkládání jízdnic řádů	42
3.2.5	Vkládání parametrů zabezpečovacího zařízení	42
3.3	Stanovení minimálního intervalu a minimální doby obratu	46
3.4	Provozní koncept	48
4	SIMULACE AUTOMATIZOVANÉHO PROVOZU.....	51
4.1	Počet potřebných souprav	51
4.2	Začátek provozu, ranní sedlo	52
4.3	Návoz pro ranní špičku a její provoz.....	53
4.3.1	Ranní špička konvenční provoz.....	53
4.3.2	Ranní špička maximální provoz	54
4.4	Návoz souprav a Odpolední špička	56
4.5	Večerní sedlo a odstup souprav	57
	ZÁVĚR.....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	63
	SEZNAM PŘÍLOH.....	65

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Návrh sítě metra v roce 1987	14
Obrázek 2 Návrh vedení trasy po pravém břehu Vltavy	14
Obrázek 3 Budoucí vedení trasy D	17
Obrázek 4 Grafická poloha trasy D	19
Obrázek 5 Schéma organizace provozu	27
Obrázek 6 Jízda s pevným obsazením kolejových obvodů	32
Obrázek 7 Jízda v režimu CBTC	32
Obrázek 8 Podíl délky automatického provozu tratí ve světě	34
Obrázek 9 Podíl výrobců CBTC v závislosti na délu linek	34
Obrázek 10 Proces simulace (14)	38
Obrázek 11 Podélný řez trasy D	40
Obrázek 12 Infrastruktura trasy D	40
Obrázek 13 Model bezpečného rozesupu vlaku	45
Obrázek 14 Kolejové schéma stanice Pankrác/D	47
Obrázek 15 Základní stav stanice Depo Písnice při konvenčním provozu (autor)	52
Obrázek 16 Graf přepravní nabídky a poptávky - zahájení provozu	53
Obrázek 17 Zahájení provozu a nástup ranní špičky konvenčního provozu	54
Obrázek 18 Počáteční stav stanice pankrác pro maximální variantu	55
Obrázek 19 Zahájení provozu a nástup ranní špičky maximálního provozu	55
Obrázek 20 Graf nabídky a poptávky - ranní špička	56
Obrázek 21 Graf nabídky a poptávky - odpolední špička	57
Obrázek 22 Konečný stav maximální simulace ve stanici Depo Písnice	58
Obrázek 23 Graf nabídky a poptávky - noční provoz	58

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vzdálenost a jízdní doba v mezistaničních úsecích.....	39
Tabulka 2 Seznam použitých itinerářů	42
Tabulka 3 Výpočet bezpečnostní vzdálenosti.....	46
Tabulka 4 Kapacita přepravy v závislosti na intervalu následných jízd.....	59
Tabulka 5 Požadavky na provoz a jejich splnění.....	60

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CBTC – Communications-Based Train Control

DKV – Depo kolejových vozidel

DPP – Dopravní podnik hl. m. Prahy

FR/C – Florenc na lince C

GoA – Grade of Automation

HA – Háje

KC – Kačerov

MHD – Městská hromadná doprava

MU – Muzeum

OCC – Operation Control Centre

RO – Rožtyly

SK – Staniční kolej

TK – Traťová kolej

UGTMS – Urban Guided Transport Management and Control System

ZZ – Zabezpečovací zařízení

ÚVOD

Tato práce si bere za cíl analyzovat současný stav veřejné hromadné dopravy v oblasti dotčené budování nové linky metra D a studie urbanistického rozvoje v této oblasti. Požadavkem Dopravního podniku hlavního města Prahy je zcela automatický provoz trasy metra. Práce se zaměří především na základní systémové požadavky a funkce automatického provozu metra na síti. V první kapitole bude stručně představena navrhovaná trasa D a uvedeny tři základní provozní koncepty (1).

Dráha speciální, metro, je jedním z nejdůležitějších páteřních systémů hlavního města Prahy. První trasou uvedenou do provozu byla linka metra C v roce 1974 v provozním úseku ze stanice Sokolovská (dnes Florenc) do stanice Kačerov. Následovala trasa A v roce 1978 a jako poslední z provozních úseků nových tras se přidala trasa B v roce 1985. Na všech třech trasách byly postupně otevírány nové úseky až do roku 2015, kdy byl jako poslední zprovozněn úsek na lince A mezi stanicemi Dejvická (mimo) – Nemocnice Motol. V současné době činí provozní délka celé sítě pražského metra 65,1 km a v provozu je 61 stanic (2).

Problematicke metra (dráze speciální) se autor již v minulosti věnoval v bakalářské práci, a následně i ve všech semestrálních pracích během studia, kde se naskytla možnost spojitosti zpracovávaného tématu a dráhy speciální. Z tohoto důvodu by se autor i nadále věnoval systému městské hromadné dopravy, který takřka po celém světě dominuje v množství přepravní kapacity na dané území.

Diplomová práce je výstupem projektu Spolupráce Univerzity Pardubice a aplikační sféry v aplikačně orientovaném výzkumu lokačních, detekčních a simulačních systémů pro dopravní a přepravní procesy (PosiTrans). Registrační číslo projektu: CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008394.

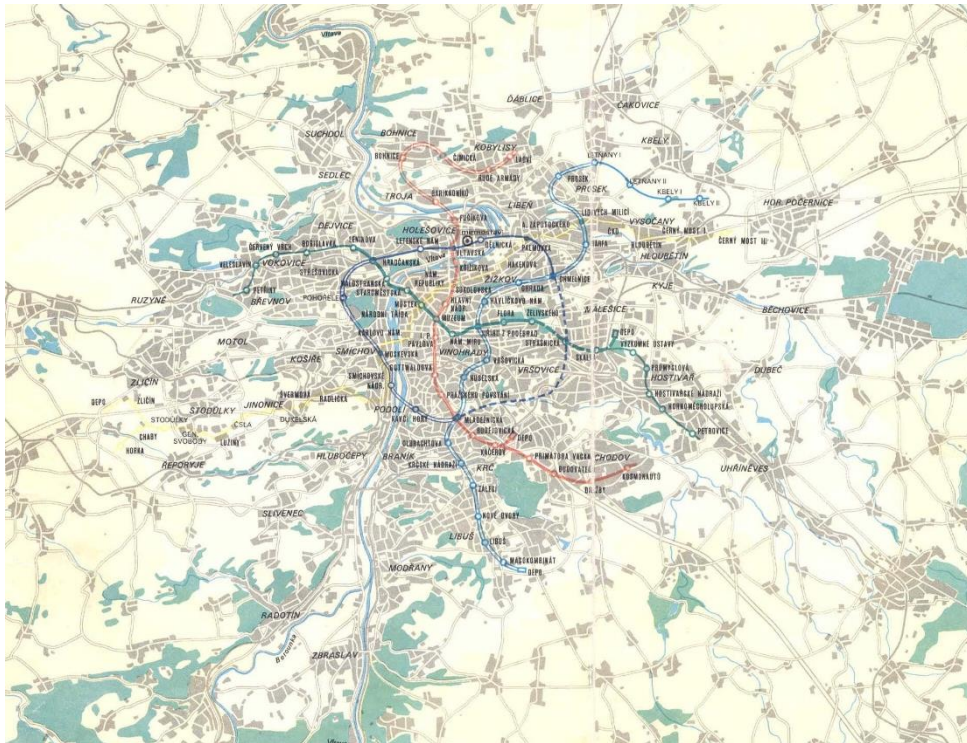
1 HISTORIE A ANALÝZA SOUČASNÉHO PROVOZU MHD NA TRASE METRA D

Tato kapitola bude mít za cíl zmapovat historii vývoje chystané trasy metra D, od prvotních náznaků až do dnešní doby, kdy probíhají první průzkumné a geologické vrty. V současné době vše nasvědčuje konečného vybudování prvního provozního úseku I.D do roku 2028. V druhé části kapitoly se autor zaměří na demografii území, kterými podle předpokladů trasa povede a zmapuje současnou situaci obsluhy dotčené oblasti městskou hromadnou dopravou.

1.1 HISTORICKÝ VÝVOJ PLÁNOVÁNÍ TRASY D

Projektová příprava nové trasy D prošla v posledních několika letech velkým vývojem. Rozsah sítě metra byl, je a bude vždy svázán s rozvojem města dle územního plánu. Zároveň je zapotřebí nahlížet na pravidla a důsledky mezi maximalizací funkční efektivity a ekonomickou náročností celého projektu. Rozvojem a komplexností projektu se již zabývala studie komplexnosti integrovaného dopravního systému hromadné dopravy v Praze (80. léta 20. století). Tato studie vyhodnocovala a srovnávala možnosti rozvoje metra, ve které se objevovalo několik variant provedení. Jednou z variant byly čtyři diametrální trasy A-D a jedna segmentová trasa E, vedená po obvodu vnitřní části města (dnes pro představu malý pražský okruh pro automobilovou dopravu), jako trasa (polo)okružní. (3)

Další variantou byly tři trasy diametrální s trasou okružní O. Plánovaná trasa D zároveň již v původní variantě obsahovala vyrovnané atrakční obvody v severním i jižním diametru. To by byl její velice významný přínos pro působení v síti metra. V této době se již pracovalo s hlavními kvalitativními ukazateli pro tvorbu trasování a alternativního trasování sítě městské hromadné dopravy v Praze. Jednalo se o spotřebu času samotného cestujícího, průměrná přepravní rychlost, přestupové vazby v síti veřejné dopravy, kvalitu přestupních vazeb a v neposlední řadě také průměrné zatížení (obsazenost) vozů v kritických úsecích. Na základě kvalitativních ukazatelů byla doporučena koncepce samostatného vedení trasy D, bez řešení možnosti větvení již provozuschopné trasy C. Tato studie z roku 1983 počítala s trasováním souběžně s pravým břehem řeky Vltavy až do prostor Palackého náměstí (dnes tramvajová trať). (3)



Obrázek 1 Návrh sítě metra v roce 1987

Zdroj: (1)



Obrázek 2 Návrh vedení trasy po pravém břehu Vltavy

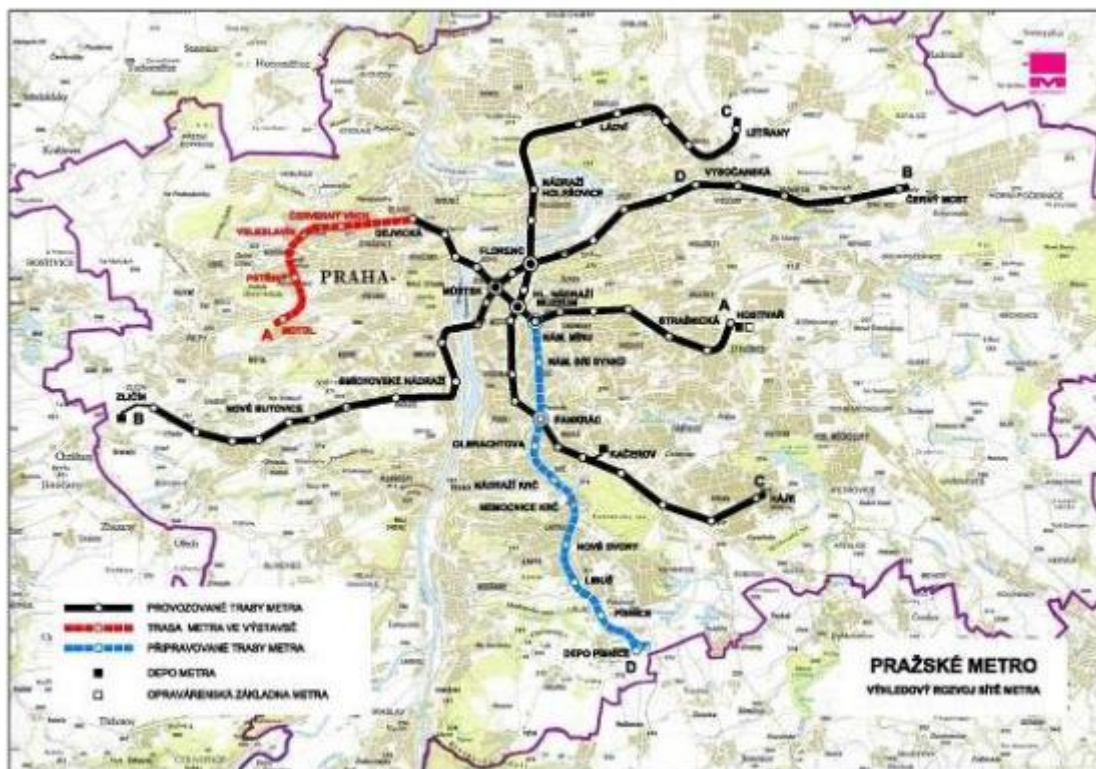
Zdroj: (1)

Obsluha jižní části Prahy byla již v té době zajištěna trasou C. Na základě nečekané změny předpokladů urbanizace bylo rozhodnuto, že dojde k větvení stávající trasy C a nová větev bude samostatně chápána jako nová trasa metra D. Ta přinášela možnost dalšího pokračování trasy severním směrem. Oblast pravého břehu Vltavy tak bude i nadále obsluhována tramvajovou dopravou. V následujících komplexních studiích v letech 1988–1990

byla trasa D zvažována stále především ve variantě klasického metra. V roce 1991 bylo společností Metroprojekt Praha téměř dokonale zpracováno zadání stavby I.D v rozsahu Zálesí – Náměstí Míru. Pro zvýšení účinnosti provozu a odlehčení jiným systémům dopravy byl tento úsek prodloužen až po stanici Nové Dvory. V této podobě by měl provozní úsek I.D délku cca 7,7 km a disponoval by sedmi stanicemi s přestupní vazbou na trasu metra C ve stanic Pankrác. Zadání stavby bylo v této podobě zaneseno do územního plánu v roce 1999. Po roce 1993 příprava trasy metra D začala stagnovat a veškerá pozornost se začala upírat na preferované severní prodloužení trasy C. Trasa D se dostala zpět na světlo až v roce 2001. Důvodem byla potřeba shromáždění podkladů pro stavební uzávěry pro trasy městské kolejové dopravy. V této době došlo k opětovnému prověření úseku I.D Nové Dvory – Náměstí Míru, ale stále ve variantě klasického metra. V návaznosti na koncepci obsluhy hlavního města Prahy veřejnou dopravou vznikly v následujících letech další materiály na základě objednávky Ministerstva dopravy České republiky. Jednalo se o Studii obsluhy hlavního města Prahy hromadnou dopravou osob ve vazbě na Středočeský kraj (dále jen „Studie obsluhy“). Studie byla zpracována Ústavem dopravního inženýrství Praha a společností Metroprojekt a.s.. Studie obsluhy byla a stále je základním koncepčním materiálem, který byl zpracován pro do dnešní doby platný územní plán hl. m. Prahy. Dopracována byla v roce 2002 a komplexně řešila dopravní obsluhu hlavního města a jeho spádových oblastí hromadnou dopravou. Vzhledem k specifiku trasy D, už od počátku 90. let minulého století procházela trasa velice pestrým názorovým vývojem a realizační hodnotou. Z tohoto důvodu se nepodařilo odpovídajícím způsobem uzavřít potřebné náležitosti definitivního pojetí: trasování, volba dopravního systému, realizační etapizace a vlastního financování. V souvislosti s přípravou nového územního plánu Prahy se v roce 2007 začaly tvořit technické ověřovací studie a modelové rozborů. Z takto vyhotovených materiálů se následně dalo pro záměr pokračování trasy metra D dostatečně čerpat a vyvozovat závěry řešení. Byla prokázána vhodnost vedení trasy metra D přes stanici nemocnice Krč a návrh sledování budoucího rozvoje dopravy jižním směrem ze stanice Nové Dvory. Dostatečný rozvoj jižním směrem umožní prodloužení větve až do cílové stanice Depo Písnice s vazbou na terminál autobusové dopravy a velkokapacitní záchytné parkoviště P+R. Důvodem důležitosti této větve je množství přímo obslužených obyvatel oblasti a možnost významné redukce autobusové dopravy. V roce 2010 byla zpracována dokumentace územního rozhodnutí pro trasu I.D společností Metroprojekt a.s. v úseku Náměstí Míru – Depo Písnice. Po dohodě s investory je projekt orientován na nový dopravní systém automatického provozu (metro bez strojvedoucího). Provoz tak bude zcela řízen a zabezpečen zabezpečovacím systémem CBTC, včetně oddělovacích stěn na hraně

nástupiště od jízdni cesty a horním napájecím systémem. Tyto změny (základní rozměry tunelů, délka nástupišť, délka odstavných a odstavně obratových kolejí, ...) by měly být zcela kompatibilní se všemi rozměry stávajících tras metra. Tato varianta z hlediska vedení města vysoce překračuje investiční možnosti. Magistrát hlavního města Prahy proto navrhuje vytvoření první větve trasy D ze stanice Pankrác do stanice Depo Písnice v dopravním systému, který bude kompatibilní s dosavadními trasami (především trasou C). Docílí se tím optimalizace investičních a provozních nákladů nově budované trasy. Následovaly činnosti spjaté s cílem zajištění územního rozhodnutí pro celou trasu a zpracování projektové dokumentace potřebné k získání stavebního povolení. Tato fáze postupuje v režimu kompatibility s trasou C (metro se strojvedoucím), ve variantě bez DKV pro trasu D v Písnici a ve dvou variantách kolejového řešení stanice Pankrác. První návrh je vybudovat stanici Pankrác jako samostatnou přestupní stanici, s budoucím prodloužením severním směrem do centra. Ve druhé variantě je uvažováno vybudování kolejové spojky mezi trasami C a D ve stanici Pankrác. Tato varianta by znamenala zásah do územního plánu a změna by vedla k zpoždění celého projektu minimálně o rok. Na konci roku 2014 na základě připomínek byla schválena nová stanoviska pro trasu D, kde je počítáno s vybudováním samostatné stanice Pankrác s přestupní vazbou na trasu C. V nově vybudované stanici je vyžadováno oddělení prostor nástupiště od jízdni dráhy stěnou pro plně automatizovaný provoz trasy D. (3)

V tomto roce (2014) byla také zpracována studie proveditelnosti, která obsahuje ekonomické hodnocení a prokazuje efektivnost investice vybudování plně automatizované trasy bez nutnosti vybudování samostatného DKV v Písnicích. Studie se opírá o přepravní požadavky a bezproblémovou harmonizaci na přestupní vazby s trasou C, a na možnosti potřeb nasazování kratších souprav (3-4 vozy). Kratší soupravy mohou být využity v počátečním období, následně v závislosti na přepravní poptávku. Vše bylo završeno v červenci 2015, kdy bylo přijato usnesení rady hlavního města Prahy o plně automatizovaném dopravním systému s prvním provozním úsekem mezi stanicemi Depo Písnice – Pankrác. Následují inženýrské procesy spojené s výkupem nemovitostí a pozemků pro první úsek. V roce 2019 dochází k prvním průzkumným výkopovým a ražebními pracím v okolí stanice Pankrác. Celý tento proces vedoucí k vzniku čtvrté trasy metra na území Prahy proběhl v rozmezí 31 let a lze doufat, že ražba a budování nebudou trvat stejně dlouho. (3) Předběžný termín dokončení je stanoven na polovinu roku 2028.



Obrázek 3 Budoucí vedení trasy D

Zdroj: (2)

1.2 CHARAKTERISTIKA DOTČENÉ ČÁSTI HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY

Oblast jihovýchodní části města se nachází ve spádové oblasti provozované trasy C a návazných autobusových linek. Tato oblast je typická panelovou zástavbou s vysokou hustotou osídlení, a to především v městských částech Písnice, Lhotka, Nové Dvory, Krč, Kamýk, Modřany a následně v přímém okolí stanic linky C mezi stanicemi Roztyly (RO) a Háje (HA).

Krajinný ráz a okolí stanic Chodov, Opatov a Háje je více rovinný, a zároveň blízkost stanic k sídlištním celkům umožňuje krátké dojezdové časy, návazné dojezdové časy ke stanicím páteří sítě, nebo přímo nabízí možnost pěšího přesunu z místa bydliště. Oproti tomu návazné linky z oblastí Nové Dvory, Písnice, Kamýk, východní část Modřan a okolí Lhotky je zapotřebí překonávat Krčské údolí charakteristické klesáním a následným stoupáním k nejbližší stanici Kačerov (KC). Navrhované vedení trasy metra D je znázorněno na obrázku 3. Pro příklad z dnešní autobusové zastávky Písnice (v místě uvažované stanice metra trasy D) do terminálu Kačerov je jízdní doba 18 minut. Jedním z hlavních přínosů tak bude řešení

obsluhy územních celků, kde doprava nabízenou kapacitou neuspokojuje poptávku po přepravě. Příkladem této situace je zastávka Nemocnice Krč, kde v průběhu jedné hodiny ranní špičky odjíždí 141 autobusových spojů (každých cca 25,5 s).

Nesmíme zapomenout, že při využití linek návazné autobusové dopravy ze zastávek v blízkosti páteřního systému, je zapotřebí k jízdám taktéž připočítat časové přírážky na chůzi k zastávce návazné dopravy (v odlehlých částech zástavby může tato hodnota činit až 10 minut). K těmto hodnotám se dále připočítají časové hodnoty čekání na spoj návazné dopravy, čekání na spoj páteřního systému a v neposlední řadě také doba chůze v přestupním terminálu. V této oblasti tedy může, v některých případech, doba cesty při užití některé z návazných linek od domu do soupravy metra činit i 30 minut v některých případech i více.

Dalším aspektem pro budování nové části páteřního systému je vysoká obsazenost vozidel návazné dopravy, a to především v ranních a odpoledních špičkách. To je způsobeno již výše zmíněnou silnou hustotou osídlení oblasti, sociálně ekonomickou skladbou obyvatelstva, a zároveň stále nízkými jízdami do centra města. Cestování hromadnou dopravou je v některých oblastech velmi často negativně zasaženo vysokou dopravní kongescí z provozu individuální automobilové dopravy. Delší doba cestování plně obsazeným dopravním prostředkem poté výrazně snižuje komfort přepravy cestujících, kteří by následně mohli volit alternativu v přístupu přepravy do bodu zájmu.

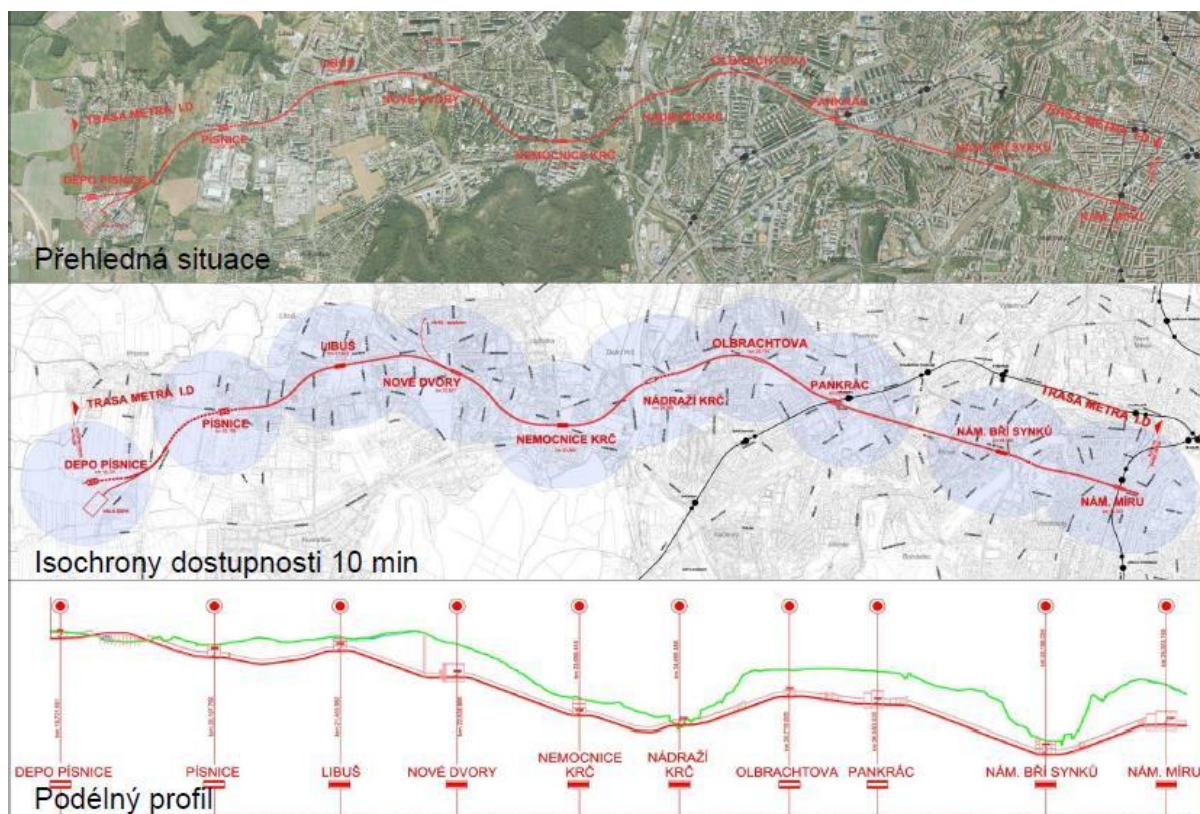
1.3 DEMOGRAFIE OBYVATELSTVA SPÁDOVÉ OBLASTI A MOŽNOST ÚPRAVY NÁVAZNÝCH DRUHŮ MHD

Budoucí páteřní systém bude v prvním úseku (I.D) budován na územím městské části Praha 4, z městského obvodu Pankrác přes městské obvody Krč + Budějovická, Lhotka + Sídliště Krč, a dále do oblasti Písnic. Při určení spádových oblastí k nově budované trase metra je nutno brát v potaz všechny nepříznivé vlivy zmíněné v předchozí kapitole. Bylo zjištěno, že nárůst obyvatel v této oblasti se během let 2002–2016 navýšil pouze o necelá 2 % a celkově v této oblasti žije přibližně 175 tisíc obyvatel (2017) (4).

1.3.1 PANKRÁC

Toto území, v místě současné stanice trasy metra C Pankrác, bude přestupním bodem mezi již existující trasou C a budovanou trasou metra D. V této oblasti žije, z údajů posledního sčítání obyvatelstva, podle trvalého bydliště 16 248 obyvatel (4). Z tohoto důvodu se autor rozhodl stanovit poměr při využití dopravy v poměru 25:15:30:30 za účely svých cest (jiný druh

dopravy: osobní automobilová: metro D: metro C). To by znamenalo, že přibližně 3 250 obyvatel této oblasti v průběhu dne nově využije budovanou trasu metra D, alespoň jedním směrem. Výpovědní hodnota těchto čísel, se přiblíží reálným hodnotám, v době zprovoznění druhého úseku (II.D), v případě budování segregované trati. Další oblasti budou posuzovány pouze z pohledu množství obyvatelstva a návaznosti veřejné osobní dopravy, na trasu metra C, popřípadě na budované metro D.



Obrázek 4 Grafická poloha trasy D

Zdroj: (5)

1.3.2 KRČ + BUDĚJOVICKÁ

V této oblasti podle informací posledního sčítání žije přibližně 26 900 obyvatel (4). Tato oblast má zastoupení v podobě železnice nádražím Krč, které v určitých časech v průběhu dne představuje nejrychlejší a nejpohodlnější přesun do centra města. Své zastoupení má i nemocniční komplex Nemocnice Krč, který by se stal mnohem lépe přístupnějším pro osoby s omezenou schopností pohybu a orientace. To jsou dva velké kapacitní zdroje pohybu cestujících, které se do množství obyvatel využívajících veřejnou dopravu musí započítat. Nevýhodou všech autobusových linek vycházejících z této oblasti nebo procházející touto oblastí směr Kačerov je již výše zmíněné překonání Krčského údolí a častých dopravních

kongescí. V této oblasti budovaná trasy metra D dostává smysl s ohledem na snížení jízdních dob do centra. Z a do městské části Krč ústí mnoho linek autobusové dopravy ze Smíchovského nádraží. Stálo by za úvahu využití propojení s trasou D, na rozdíl od transferu do oblasti Smíchova, který je v současné době jedním z časově nejvýhodnějších spojení do centra města. K posouzení je vhodná i varianta využití autobusové dopravy k břehu Vltavy do oblasti městské části Braník, a následně pokračovat po nábřeží do centra tramvajovou dopravou. Ta je však negativně limitována úzkými hrdly v městské části Podolí a následnou tvorbou dopravních kongescí, které jsou v ranní a odpolední špičce každý pracovní den. (4)

V této městské části Prahy by v budoucnu měly být orientovány hned dvě stanice trasy D, a to stanice Olbrachtova a Nádraží Krč. Stanice Olbrachtova by měla být situována mezi ulicemi Olbrachtova, Na Strži a Antala Staška. V této oblasti je umístěno sedm zastávek autobusové dopravy, které při vhodném uskupení mohou vytvořit místa centrálních vstupů do nové stanice metra. V takovémto případě by nová trasa D byla schopna pojmout cestující hned ze sedmi linek autobusové dopravy, a to včetně velmi vytížených linek směřujících k nemocničnímu komplexu v Krči.

Další stanicí na trase D je předpokládána stanice Nádraží Krč. Tato stanice nabízí jednu zásadní výhodu, ale i některé nevýhody. Stanice metra by měla být situována v blízkosti železniční tratě a stanice vlakové dopravy Nádraží Krč. Železniční nádraží v současné době obsluhuje dvě linky Pražské integrované dopravy S. Linky integrované dopravy S8 a S88, ve směru Praha hlavní nádraží a v opačném směru Nádraží Braník a dále do Čerčan, Dobříše a Vraného nad Vltavou. Obě tyto linky jsou vedeny v časovém intervalu 30 minut v ranní i odpolední špičce, ale během dne převládá interval jedné hodiny v obou směrech. Tato železniční trať skýtá ve směru nádraží Braník také jednu nevýhodu, kterou je její napojení na trasu hlavního tranzitního koridoru (Praha – Plzeň) pouze ve směru pokračování ve směru stanice Plzeň. Toto napojení nám tedy neumožňuje propojení pravého břehu Vltavy s levým tak, aby bylo možné železniční stanici Nádraží Krč propojit se stanicí Praha Smíchovské nádraží bez nutnosti úvratě jízdy ze zastávky Malá Chuchle. Obě tyto linky zůstávají především na pravé straně Vltavy, kde jsou vedeny souběžně s tramvajovou tratí pro linky 3, 17 a 21. Z tohoto důvodu železniční linky nejsou přínosem pro navýšení poptávky po kapacitě oproti stávajícím linkám tramvajové dopravy. Nevýhodou této stanice je její umístění v Krčském údolí pod pražskou Jižní spojkou. Nevýhoda údolí a jedné z velice vytížených silničních tepny Prahy je nízká zástavba údolí. Z tohoto důvodu jsou autobusové linky vedeny blíže k zástavbě. Na budoucí stanici metra by při současné situaci navazovaly pouze tři linky

autobusové dopravy, a dvě linky železniční dopravy, které nepřinášejí postačující poptávku po kapacitě dopravy na trase D.

1.3.3 LHOTKA + SÍDLIŠTĚ KRČ

Území městské části Lhotka a sídliště Krč je, co do obyvatelstva, zastoupeno především třemi velkoobjemovými sídlišti, a to v části Lhotka, Libuš a Krč. Tato sídliště představují více než 60% z celkového počtu 15720 obyvatel městské části. (4). Z hlediska zastoupení veřejné autobusové dopravy je v tomto územním celku zajištěna přestupná návaznost na téměř všechny linky, tedy přísun cestujících ke stanici metra bude zajištěn. Nedílnou součástí v tomto územním celku s návazností veřejné autobusové dopravy je spojení s městskou částí Novodvorská a Hodkovičky s celkovou kapacitou 14 453 obyvatel (4). V této městské části existuje autobusová návaznost na trasu metra C přes Krčské údolí (velmi časově náročné), tak i na tramvajovou dopravu vedoucí po pravém břehu Vltavy. Tramvajová doprava z tohoto území je v období ranní a odpolední špičky komplikována v městské části Praha Braník úzkými hrdly a častými dopravními kongescemi. Z hlediska dopravy je městská část Lhotka a Sídliště Krč odkázána na autobusovou dopravu, která je velmi časově náročná pro dosažení návaznosti na páteří systém pražské hromadné dopravy. V jižní části územního celku je v plánu zřídit předposlední stanici trasy D Písnice a poslední stanici na okraji Prahy Depo Písnice. Stanice Písnice by v budoucnu měla disponovat depem kolejových vozidel.

V této oblasti se budou nacházet všechny zbývající stanice plánované trasy, a to stanice Nemocnice Krč, Nové Dvory, Libuš, Písnice a Depo Písnice. V oblasti se nachází hned několik velkých bodů zájmu pražského obyvatelstva, a také sídlištní komplexy, které poskytnou nejvyšší podíl potencionálních cestujících nové trasy D.

Prvním velkým bodem zájmu je nemocniční komplex v Krči: Nemocnice Krč, Thomayerova nemocnice, porodnice a Institut klinické a experimentální medicíny (zkráceně IKEM). Jak bylo napsáno na začátku kapitoly, v této oblasti jiná než autobusová a individuální automobilová doprava neexistuje, a proto je toto území velice náchylné k tvorbě dopravních kongescí. Z tohoto důvodu zde bude situována stanice metra D nesoucí název Nemocnice Krč. Stanice by měla být vybudována na křižovatce dnešních ulic Zálesí a Vídeňská, přibližně v polovině celého nemocničního komplexu. Tato stanice nabídne přestupní vazbu hned z 12 linek autobusové dopravy, což je oproti stanici Nádraží Krč nárůst o 400 %.

Stanice Nové Dvory by se zdála podle předchozího odstavce jako takřka zbytečná opak je ale pravdou. Stanice Nové dvory je situována přesně na pomezí sídliště Lhotka a sídliště Krč,

kde nabídne přímý přístup na trasu metra D bez nutnosti využití návazné autobusové dopravy do stanice Nemocnice Krč. Stanice by dle dostupných dat měla být situována na křižení ulic Durychova a Libušská. V tomto okolí se v současné době nachází základní zázemí každodenních potřeb a je spojnici hned sedmi autobusových linek s možností vazby na autobusové linky 197 a 215.

Následující stanicí plánované trasy D je stanice Libuš. V této lokalitě se nenachází velké panelové zástavby, ale je zde návaznost na novější velkokapacitní obytné jednotky na jedné straně a několik desítek rodinných domů na straně druhé. Tato stanice do rozvoje města nabízí potenciální možnosti pro developerské záměry, ale i pro budování obytných jednotek (nebyl posuzován plán rozvoje pražské části v této oblasti). Oblast disponuje pouze třemi autobusovými linkami. V budoucnu by se dalo využít současné tramvajové dopravy (linky 3, 17 a 21), které jsou zakončeny v oblasti sídliště Modřany. Jednalo by se o prodloužení tramvajového pásu přes zastávky Observatoř Libuš k zastávce Sídliště Libuš, kde se v současné době nalézá otočka autobusů pro linku 215. Tím by se dal zefektivnit tok cestujících do centra města ze sídliště Modřany, kteří by místo zdlouhavé jízdy tramvají po pravém břehu Vltavy mohli využít rychlejšího a kvalitnějšího druhu dopravy.

Posledními dvě stanicemi by měli být stanice Písnice a Depo Písnice. Tyto stanice se již budou nacházet na pomezí Prahy, a proto jejich významem bude především pro budoucí rozvoj dané lokality. Stanice Písnice se bude nacházet vedle známého obchodního objektu SAPA, který se tímto druhem dopravy může více přiblížit běžným občanům, a ne pouze velkoobchodníkům a provozovatelům restauračních zařízení. Navíc tato oblast nedisponuje hustou zástavbou, která umožní vybudování samostatného depa kolejových vozidel pro samostatnou trasu D. Konečná stanice Depo Písnice je předpokládána do oblasti nesoucí stejného názvu Písnice. Toto území disponuje pouze mírnou zástavbou podobnou menší vesnici. To by nová trasa D mohla výrazně změnit a tím i napomoci rozvoji této oblasti s možným napojením na průmyslovou oblast Vestec.

2 PROBLEMATIKA AUTOMATIZOVANÉHO PROVOZU

Tato kapitola se bude zabývat definováním automatického provozu metra, členěním do jednotlivých stupňů automatizace a specifickým funkcím pro automatický provoz metra. Dle definice je automatický provoz systém provozu vlaků s vlastním pohonem po vyhrazené vodící dráze bez strojvedoucího, nebo zcela bezobslužně. Provoz vlaků bez strojvedoucího je takový druh provozu, při kterém jsou ve vlaku přítomni zaměstnanci, kteří nejsou odpovědní za řízení vlaku, ani za sledování trati před vlakem. Provozní personál v těchto případech odpovídá za bezpečný výstup a nástup cestujících, případně za bezpečné vypravení vlaku ze stanice. Provoz vlaků bez obsluhy je takový druh provozu, při kterém není ve vlaku přítomen žádný člen personálu a za všechny požadované funkce zodpovídá technické zařízení.

2.1 STUPNĚ AUTOMATIZACE

U systému městských drah se rozlišuje celkem pět druhů automatizace (Grade of Automation (GoA)). Jednotlivé stupně přesně definují, které základní funkce plní provozní personál, a které systém městské dopravy s vyhrazenou vodící drahou (Urban Guided Transport Management and Control System (UGTMS)). Kromě těchto základních funkcí může systém vykonávat i jiné nepovinné funkce, které však nemají vliv na jeho kategorizaci. Zařazení jednotlivých nepovinných funkcí je plně v kompetenci provozovatele dráhy a dopravy. Systémy se stupněm automatizace GoA0 – GoA2 se z hlediska členění považují za konvenční systémy provozu, kdežto GoA3-GoA4 za automatický systém provozu.

Dále bude u jednotlivých systémů GoA provedena analýza potřebného personálu, který by byl požadován pro plynulé a bezpečné využívání. Pro provoz je nutno zohlednit počet plánovaných stanic v první etapě budované linky I.D (Depo Písnice – Pankrác), kde je uvažováno 8 stanic včetně stanice Pankrác a Písnice s kolejovou spojkou do DKV.

2.1.1 PROVOZ VLAKU PODLE ROZHLEDU – GoA0

Při řízení vlaku podle rozhledu má strojvedoucí plnou zodpovědnost za bezpečnost jízdy vlaku a není kontrolován žádným technickým zařízením. Za bezpečné a plynulé provozování dráhy a drážní dopravy odpovídá provozní personál. U tohoto stupně automatizace může být zřízeno vlakové, staniční a traťové zabezpečovací zařízení, není však podmínkou (6). Pro provoz vlaku podle rozhledu, je řízení v systému metra upraveno interním předpisem D2/1 DPP

pro provoz metra. To nařizuje, že na čele vlaku musí být zdvojená vlaková četa a rychlost metra nesmí přesáhnout 60 km/h. Dále je zapotřebí uvažovat personál stanice pro řešení mimořádných událostí (tzv. dozorčí stanice), pracující v pravidelných denních a nočních 12hodinových směnách. Nedílnou součástí tohoto provozu je poté dispečerský aparát, pracující na denní a noční směny stejně jako dozorčí stanice. Z toho plyne, že na časovou jednotku jednoho dne (24 h) je zapotřebí dvou osob na pozici provozního dispečera, dvě osoby s funkcí dozorčího stanice, a s každou vlakovou jednotkou, která vjede do trati dvě osoby na pozici vlakové čety. V tomto případě taktéž dochází při snížené maximální rychlosti jízdy k navýšení jízdních dob v jednotlivých mezistaničních úsecích.

2.1.2 NEAUTOMATIZOVANÝ PROVOZ VLAKU – GoA1

Při neautomatizovaném provozu vlaku se strojvedoucí nachází v přední části soupravy a sleduje trať před vozidlem ve směru jízdy. Zrychlení a zpomalení „brždění“ vlaku provádí strojvedoucí řídící vlak na základě viditelných návěstidel, případně návěstí předávaných na řídící stanoviště strojvedoucího. Strojvedoucí vede vlak pod dozorem vlakového zabezpečovače. Vlakový zabezpečovač může být bodový, liniový, semi-liniový, provádějící dohled nad jízdou vlaku v rozsahu své specifikace. Vlakový zabezpečovač provádí dohled nad kontrolou bdělosti, kontrolou rychlosti vlaku a kontrolou dodržování návěstních znaků. Za bezpečné opuštění stanice odpovídá v plném rozsahu provozní personál, a to i při úkonu zavírání dveří vlaku (6). Tento systém je v systému pražského metra viděn na linkách A a B (zabezpečovací zařízení LZA a ARS), kde strojvedoucí řídí vlak zcela manuálně pod dohledem zabezpečovacího zařízení. Tudíž na strojvedoucího je kladena veškerá zodpovědnost za jízdu vlaku. V porovnání, co do počtu provozního personálu při provozu v tomto režimu dostačuje na stanovišti strojvedoucího jedna osoba. Nejen, že díky alespoň nějakému zabezpečení jízdy vlaku stačí jeden strojvedoucí, tak i maximální rychlost v mezistaničních úsecích se posouvá na hranici 80 km/h. Vyšší rychlost přináší výhodu v navýšení kapacity trati potažmo celé linky v obou směrech. V oblasti personálu dále jako v systému GoA0 je zapotřebí uvažovat personál dozorčího stanice a personál dispečerského aparátu ve stejném počtu i časové náročnosti.

2.1.3 POLOAUTOMATIZOVANÝ PROVOZ – GoA2

Při jízdě v režimu poloautomatizovaného provozu vykonává strojvedoucí pouze dohled nad bezpečnou a plynulou jízdou vlaku po trati. V případě nebezpečí, nebo při vzniku nečekané

mimořádné události, tak může vlak bezpečně zastavit na bezpečném místě. Potřeba zrychlení potažmo i zpomalení je prováděno automaticky stejně jako dohled nad udržováním a dodržováním maximální povolené rychlosti. Bezpečná jízda vlaku je tedy v plné zodpovědnosti vlakové čety. Další změnou při provozu metra v odvětví bezpečnosti je zavírání nástupních/výstupních dveří, které může být prováděno automatizovaně, nebo rovněž provozním personálem dopravce (6). Tento stupeň automatizace je použit na zatím nejvyspělejší lince pražského metra, a to na lince C. Jde o francouzské zabezpečovací zařízení MATRA Pa 135 kompatibilní s vozovými soupravami typu M1. Při použití stačí pouze, aby strojvedoucí uvedl vlak do rychlosti 30 km/h a dále je vlak veden automaticky, a to včetně zbývajících rozjezdů na maximální rychlost 80 km/h, udržování konstantní rychlosti, případného zpomalení nebo zastavení v následné stanici. Strojvedoucí po uzavření dveří a rozjezdu následně vykonává pouze dohled nad jízdou vlaku a sledování návěstních znaků pro případ neočekávané situace. S ohledem na množství personálu zůstáváme na stejném počtu jako při stupni automatizace GoA1.

2.1.4 PROVOZ VLAKU BEZ STROJVEDOUČÍHO – GoA3

V tomto stupni automatizace není v přední části vlaku přítomen zaměstnanec, který by pohledem dohlížel a kontroloval stav trati a v případě nebezpečí vlak zastavil. Běžná jízda vlaku je zcela závislá na bezchybné funkci zabezpečovacího zařízení, které hlídá volnost a bezpečnost vlakové cesty. Ve vlaku však musí být přítomen provozní personál, který provádí kontrolu vlaku. V důsledku na volitelných funkcích v tomto stupni automatizace může odpovídat za bezpečný odjezd vlaku, za zavření dveří, za kontrolu stavu vlaku a bezpečnost cestujících. Tento zaměstnanec je zejména odpovědný za řešení nouzových situací při mimořádných událostech a při případných poruchách systému (6). Tento stupeň automatizace už v České republice k vidění není. Jak bylo zmíněno výše, tento stupeň automatizace funguje bez přítomnosti strojvedoucího, ale je zapotřebí jednoho člena personálu pro případ mimořádné události. To v praxi představuje například personál na pozici průvodčího nebo revizora. Z názoru autora je vhodné této osobě věnovat nějakou funkci při jízdě vlaku pro zajištění jeho alespoň minimálního pracovního vytížení. Z pohledu personální náročnosti, zde došlo k úbytku potřeby strojvedoucího na vlaku, ale narostla potřeba po osobě vykonávající dohled uvnitř vozidla. To v praxi znamená, že i když už se pohybujeme v systému automatické jízdy, potřeba personálu se nezměnila. Jediné, co se může změnit je rozdíl ve finančním ohodnocení mezi

dozorcem a strojvedoucím (6). Otázka zůstává, zda by tato pozice byla dobře finančně ohodnocena.

2.1.5 BEZOBSLUŽNÝ PROVOZ VLAKU – GoA4

Při tomto stupni automatizace jsou oproti předchozímu stupni GoA3 vyžadována další opatření, s přihlédnutím ke skutečnosti, že ve vlaku není přítomen žádný provozní personál. Celý systém proto musí být vybaven bezpečnostní detekční funkcí, která má za úkol ohlášení nebezpečných a nouzových situací. Při vzniku nebezpečné situace, která by vyžadovala zásah provozního personálu, je tento personál automaticky informován a vyslán učinit opatření k nápravě tohoto stavu (6). GoA4 je doposud nejvyspělejší stupeň automatizace využívaný napříč celým světem (New York, Kodaň, Šanghaj...). Jde o systémy automatizovaného provozu, kde jsou hrany nástupišť vybaveny přepážkou s otvíracími dveřmi, která znemožňuje nepovolený vstup do kolejiště, případně zabraňuje pádu do kolejiště, nebo pokusům o sebevraždu. Tunely jsou vybaveny detekcí pohybu, a to pro případ pohybu osob údržby. Dále jsou kolejnice vybaveny senzory, které zaznamenávají jízdu vlaku a případné technické poruchy. Personální náročnost je u tohoto systému minimální. V tomto stupni automatizace už je zapotřebí pouze kvalitního personálu dispečerského aparátu, v některých větších systémech je zapotřebí i několika členů na jednu linku. To je při velkém ušetření personálu ve stanicích a na soupravách vlaku zanedbatelné množství.

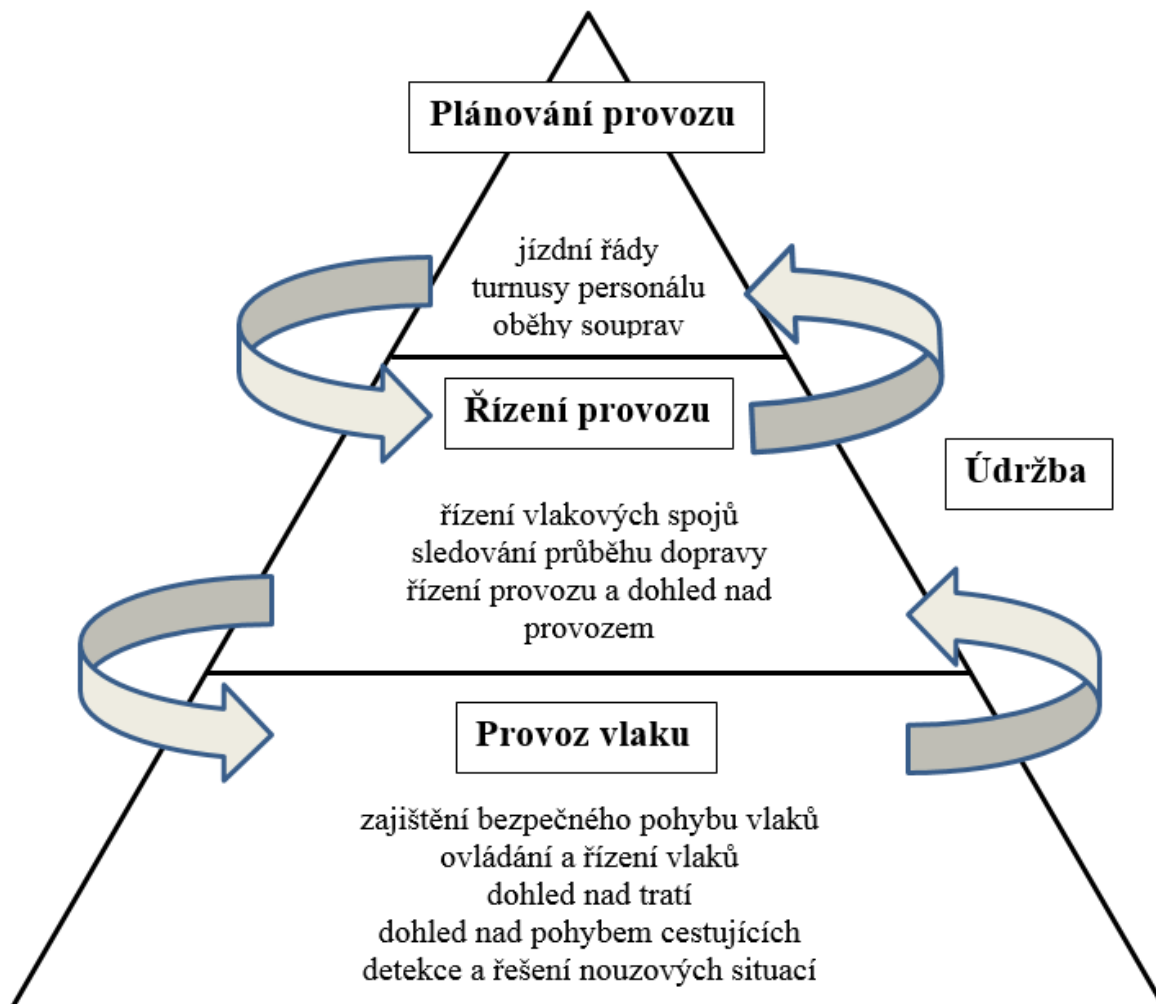
2.1.6 POSTUPNÉ ZAVÁDĚNÍ JEDNOTLIVÝCH STUPŇŮ AUTOMATIZACE

Při pohledu na vybavení tratě není důležité, aby všechny části trati byly vybaveny zařízením se shodným stupněm automatizace. Rozsah zabezpečení však musí být vždy na nejvyšším možném stupni z pohledu vzájemného vybavení tratí a vozidel. Zařízení s rozdílným stupněm automatizace, která jsou v rámci jednoho systému použita, musí být vzájemně zcela kompatibilní pro plné použití v provozu (5).

2.2 OBECNÁ ORGANIZACE PROVOZU

Při provozu městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou, též i metra podle obecných pravidel platí základní hierarchie pro provoz. Tato hierarchie určuje jednotlivé stupně organizace provozu, které jsou znázorněny na obrázku 5. V jednotlivých stupních organizace

jsou specifikovány povinné a volitelné systémové požadavky, které se liší podle stupně automatizace. Řízení provozu na všech stupních automatizace je prováděno ze střediska pro řízení provozu (Operations Control Centre (OCC)).



Obrázek 5 Schéma organizace provozu

Zdroj: (7)

2.2.1 ZÁKLADNÍ PROVOZNÍ PRAVIDLA

V odvětví automatizovaného provozu je nezbytné přesné definování oblasti spadající do řízení UGTMS. Na hranici této oblasti případně přímo uvnitř oblasti musí mít dané zařízení možnost kontroly vlakového zařízení tak, aby před začátkem provozu vlaku byly dostupné informace o bezchybném fungování všech vlakových částí zařízení. Tento test musí být realizován tak, aby v budoucnu nezpůsobil zastavení vlaku při vjezdu nebo odjezdu z dané oblasti. V oblasti pod vlivem řízení UGTMS musí být dostupné všechny funkce v závislosti na daném stupni automatizace provozu. Jízdy vlaků, které nejsou vybaveny vlakovou částí

zařízení jsou provozovány náhradním způsobem, a řízeny jsou náhradním způsobem z hlediska interních předpisů provozovatele dráhy (7).

2.2.2 ZÁSADY ZAJIŠTĚNÍ BEZPEČNÉHO POHYBU VŠECH VLAKŮ PO SÍTI

Při využití systému UGTMS je možné automatické i manuální stavění jízdních cest. Jízdní cesty by se měly stavět s ohledem na trasování vlaků, případně na provozní potřeby dopravce. Aby byla zajištěna bezpečná jízdní cesta, je povolení k pohybu vydáno až v situaci, kdy je jízdní cesta postavena, a jsou provedeny veškeré závěry jízdní cesty. K rušení závěru jízdní cesty dochází samočinně nebo ručně po zjištění, že celý vlak opustil rozhodné prvky postavené jízdní cesty (7). Tato situace v provozu metra nastává především v koncových stanicích, kde jsou prováděny obraty souprav. Taktéž se využívá v nácestných stanicích při obratu souprav přes odstavně obratové koleje pro možnosti zavedení pásmového provozu v místech s vyšší poptávkou po dopravě. Další situací, při které se často manipuluje s výhybkami, je při omezení provozu v době traťových nebo staničních výluk, kdy jsou k obrátům využívány například kolejové, nebo protisměrné kolejové spojky. Poslední situací je využívání kolejových křížů při jízdě soupravy, pro zajištění nejvyšší možné přepravní kapacity v době provádění výlukové činnosti. Například při rekonstrukci stanice Muzeum (MU) na lince C, kdy vlaky ze stanice Florenc (FR/C) z 2. traťové koleje (TK) přejížděly přes kolejové křížení do 1. TK a pokračovaly do stanice Hlavní nádraží v protisměru s vypnutým vlakovým zabezpečovačem a zdvojenou vlakovou četou.

Dalším důležitým prvkem bezpečnosti pro zajištění bezpečného pohybu vlaků jsou návrhové a provozní hodnoty intervalů následných vlaků, které si určuje provozovatel dráhy. Návrhový interval je ovlivněn směrovým a výškovým uspořádáním stanic na trati, dobou pobytů, trakční charakteristikou vlaků, uspořádáním obratových a odstavně obratových stanic a reakční dobou strojvedoucího (u stupňů automatizace GoA0-GoA2). UGTMS potom zajišťuje bezpečný pohyb vlaků v síti ve stanoveném intervalu samostatně. Bezpečné rozestupy vlaků mohou být zajištěny pevnými nebo pohyblivými prostorovými oddíly. V tomto případě, je pro každý následný vlak na základě pozice konce vlaku předcházejícího, stanovena absolutní hranice povolení k pohybu (7). Opět pro příklad ze současné situace pražského metra můžeme přiblížit situaci, kdy na lince C vlakový zabezpečovač MATRA PA135 dovoluje následný interval mezi jízdami souprav 100 s, ale pro potřeby dopravního podniku postačuje následné mezidobí 115 s.

Zařízení na všech stupních automatizace kontrolují v první řadě dodržení bezpečné rychlosti, jejíž hranice se stanovují pomocí statického a dynamického rychlostního profilu. Statický rychlostní profil je tvořen maximální rychlostí a hranicí povolení k pohybu. Dynamický rychlostní profil je vypočten na základě statického výpočtu a modelu bezpečného brždění. Model bezpečného brždění musí zohledňovat veličiny, jako jsou nepřesnosti ve zjištění polohy, délka vlaku, odchylky měření rychlosti, reakční dobu a dobu reakce nouzové brzdy. Vlak pohybující se v řízené oblasti nesmí překročit stanovený dynamický rychlostní profil, kterým je zabezpečeno, že vlak nepřekročí stanovenou hranici povolení k pohybu (7).

V oblasti řízené systémem UGTMS lze provozovat i vlak, který není vybaven, nebo má nefunkční část vlakového zabezpečovacího systému. V omezeném režimu UGTMS musí být zajištěna bezpečnost provozu při co nejmenších závislostech na lidském činiteli a dodržení dopravních předpisů (7).

2.3 FUNKCE A BEZPEČNOSTNÍ POŽADAVKY PRO AUTOMATICKÝ PROVOZ VLAKU METRA

V této kapitole se autor zaměří na klíčové funkce a bezpečnostní požadavky vyplývající z automatického provozu ve stupních automatizace GoA3 a GoA4. Při těchto stupních automatizace zajišťuje odpovědnost za bezpečnost provozu systém UGTMS a vliv provozního personálu je v tomto ohledu minimální. Základní položku při automatickém provozu (především veškeré funkce a bezpečnostní prvky) zajišťuje v přímém provozu vlaková souprava.

Zajištění bezpečné jízdy vlaku

Hlavním bezpečnostním předpokladem k jízdě vlaku je správné postavení a zabezpečení budoucí jízdni cesty. Povolení k jízdě vlaku je vydáno pouze v tom případě, kdy je správně postavená vlaková cesta a je proveden závěr všech výměn. Nedílnou součástí automatizovaného provozu je zjišťování aktuální polohy vlaku ve sledovaných oblastech (vstup, výstup, pobyt ve sledované oblasti). Informace o poloze vlaku musí obsahovat polohu čela a konce vlaku, pokud tomu tak není je zapotřebí neprodleně zastavit provoz všech vlaků, které by mohly být ohroženy nedostatkem informací (příkladem je roztržení vlaku). Zastavení provozu by se týkalo celé oblasti mezi polohou zjištění nedostatečných informací a posledním místem, nebo stanicí s kolejovým rozvětvením, které umožňuje obrát soupravy. Systém UGTMS automaticky vygeneruje ochranné pásmo, do kterého není možno vpustit žádnou

vlakovou soupravu převážející osoby. V případě, že systém UGTMS má zřízen i záložní zdroj pro zjištění polohy vlaku, je organizace dopravy na těchto úsecích organizována za pomoci pevných prostorových oddílů. Pro zajištění daného oddílu musím být splněna úplná bloková podmínka. V situaci, kdy systém UGTMS nevykazuje žádnou funkci, a není možno ani za pomoci podpůrných zařízení zajistit volnost a bezpečnost jízdní cesty, přechází řízení provozu do organizace provozovatele dráhy. Systém musí být schopen rozpoznat nedovolený pohyb vlaku v jakékoliv části infrastruktury (ujetí vlaku), a v této situaci automaticky neprodleně spustit zařízení nouzové brzdy na daném vlaku. Automatické spuštění nouzové brzdy by dále mělo být spuštěno na vlacích, které by byly „ujetím“ ohrožené v jízdě.

Řízení vlaku

Automatické vlaky jsou řízeny za pomoci jízdního a rychlostního profilu, který je vytvořen s ohledem na přepravní potřebu a energetickou náročnost v dané oblasti. Zároveň musí platit jeho přizpůsobení k dynamickému rychlostnímu profilu trati. Jízdní rychlostní profil nevychází pouze z urbanistických specifikací lokality, ale je potřeba brát v potaz také kvalitu infrastruktury, parametry vozidel a kritické provozní parametry. Kritickými parametry se rozumí doba zastavení vlaku ve stanici, nebo pobyt vlaku na obrátové případně odstavně obrátové koleji. Je třeba zajistit automatické změny jízdního profilu při změně vstupních parametrů pro jeho výpočet tak, aby bylo zamezeno možnému vzniku kolizního bodu (7).

Pro každý vlak je samostatně vytvořena trasa vlaku se všemi místy zastavení, a veškerými polohovými a časovými informací o zastavení. Tato trasa může být operativně pozměně v průběhu jízdy. V této situaci se automaticky přepočítá i jízdní profil vlaku. Při jízdě vlaku po vytvořené trase musí vlak zastavit ve všech stanicích, a v případě umožnit i zdržení v jednotlivých stanicích na základě požadavků a pokynů příchozích od personálu OCC. To opět znamená automatické přepočítání jízdního profilu na vlaku

2.4 COMMUNICATIONS-BASED TRAIN CONTROL (CBTC)

Tato podkapitola se bude věnovat jednomu z nejmodernějších zabezpečovacích zařízení využívajících se v systémech automatizovaného provozu celosvětového měřítka. Toto zabezpečovací zařízení je v dnešní době na všech nově budovaných automatizovaných provozech (New York, Kodaň, Šanghaj...) ve veřejné osobní dopravě, a to především v subsystému metra. S nárůstem obyvatel v jednotlivých městských částech je nutno zajistit neustále narůstající poptávku po dopravě. Řešením se stal vývoj nového zabezpečovacího

zařízení, které svým postupným vývojem dokázalo snižovat následná mezidobí jednotlivých vlaků, zvyšování jejich traťové rychlosti. To vše za předpokladu, že nebudou sníženy nároky na bezpečnost dopravy. V dnešní době už je jisté, že vývoj tohoto systému splňuje všechny požadavky kladené na bezpečnost provozu a postupně standard navyšovat.

Systém CBTC je signalizační a zabezpečovací zařízení, zajišťující vzájemnou komunikaci mezi vlakem a segmenty trati. Informace o komunikaci mezi jednotlivými prvky následně předává do systému managementu a organizace dopravy. Systém CBTC zaznamenává přesnou polohu vlaku lépe než jiné konvenční systémy určující polohu na základě obsazených kolejových úseků. Tím, že tento systém pracuje na základě informací z každého vlaku, dokáže zvyšovat propustnost trati, a tím snižovat následná mezidobí mezi jednotlivými spoji. Zároveň přispívá i ke zvýšení bezpečnosti na infrastruktuře rychlejším přenosem a hodnotami informací o vzniklých komplikacích. Za pomoci nepřetržitého, a zároveň automatického využívání přesné polohy vlaku v kolejových segmentech, dochází k obousměrné datové komunikaci mezi vlakem a částmi infrastruktury ve směru jízdy. To přináší případnou implementaci funkce automatické ochrany vlaku (Automatic Train Protection – ATP), funkci automatické organizace jízdy vlaku (Automatic Train Operation – ATO), a funkce automatického dohledu nad jízdou vlaku (Automatic Train Supervision – ATS). (8)

Systém CBTC pracuje na základě tzv. pohyblivého bloku, kde není chráněn každý vlak staticky určeným kolejovým segmentem (s výjimkou technologie virtuálních bloků v provozu známých jako stále se pohybující pevný blok). To je zajišťováno neustálou obousměrnou komunikací o přesné poloze na trati v kooperaci s indukčními smyčkami, nebo radiovou komunikací. Tato technologie pracuje na frekvencích 2–6 GHz. Pro srovnání s „velkou“ železniční dopravou můžeme systém CBTC srovnávat s Evropským systémem řízení železniční dopravy, známého pod zkratkou ERTMS a jeho moderní verzí Level 3. (8)

Jak bylo v předchozím odstavci zmíněno, vlaky vybaveny zabezpečovacím zařízením CBTC nepřetržitě přepočítávají svůj jízdní profil a sdělují do traťového systému informace o aktuálním stavu jízdy. Tyto informace jsou transformovány na informace pro cestující, a to prostřednictvím informačních panelů na nástupištích nebo v dnešní moderní době za pomoci mobilní aplikace. Informace o stavu jízdy jsou především používány pro samotný provoz vlaku. Při výměně informací tak dochází k automatickému přepočtu jízdního profilu (úprava rychlosti pro zachování bezpečnosti a pohodlí cestujících). To v praxi znamená, že každý vlak na síti dostává aktuální informace o vlaku nacházející se před ním ve stejné koleji a za pomoci této informace upravuje svou bezpečnou vzdálenost odpovídajícím způsobem úpravy jízdního profilu. (8)

Pro lepší znázornění autor přidává znázorňující obrázek, jak systém CBTC pracuje v porovnání statických kolejových obvodů. Při pohledu na obrázek 6 je vidět, že při pohybu vlaku je obsazen celý jeden kolejový obvod a je zamezeno, vlaku následujícímu vjezd do stejného kolejového obvodu. Současně je zajištěna bezpečná vzdálenost minimálně jednoho kolejového obvodu, tak aby nedošlo ke koliznímu stavu. Nevýhodou tohoto systému je, že vlak následující má pouze zkrácenou informaci o poloze prvního vlaku, a tedy nemůže být plně využita potenciální kapacita trati (8).



Obrázek 6 Jízda s pevným obsazením kolejových obvodů

Zdroj: (8)

Funkce pohyblivého bloku v systému CBTC je znázorněna na obrázku 7. Vlaková poloha, rychlost, ale i následná brzdňá křivka se kontinuálně vypočítává na základě informací o poloze nejbližší překážky na trati. Tyto informace se předávají do traťového zařízení, které na základě vypočtených informací vytváří jednotlivé ochranné oblasti. Při výpočtech obsazenosti a informace o nejbližší překážce na trati musí výsledná hodnota obsahovat bezpečnostní rezervu. Tato bezpečnostní rezerva je důležitá při nepřesném určení polohy, nebo časové odchylce způsobené přenosem informací. Tato odchylka je na obrázku 7 znázorněna jako žlutý úsek před a za vlakovou soupravou a je připočítávána k samotné délce vlaku. Oba vlaky vytváří obsazený úsek nazývaný se stopa, který je využíván při tvorbě pohyblivého bloku a dovoluje snižovat bezpečnostní vzdálenost mezi následnými vlaky.



Obrázek 7 Jízda v režimu CBTC

Zdroj: 8

Zabezpečovací zařízení CBTC tedy zajišťuje až několikanásobné zvýšení kapacity trasy linky na segregovaných systémech veřejné osobní dopravy. Snižuje následná mezidobí následných jízd vlaku, ať už se jedná pouze o jednu linku, nebo při integraci více linek.

Současně dokáže pracovat i s bezpečnostní přírůžkou na změnu směru pohyblivé výměny a provedení závěru výměn (8).

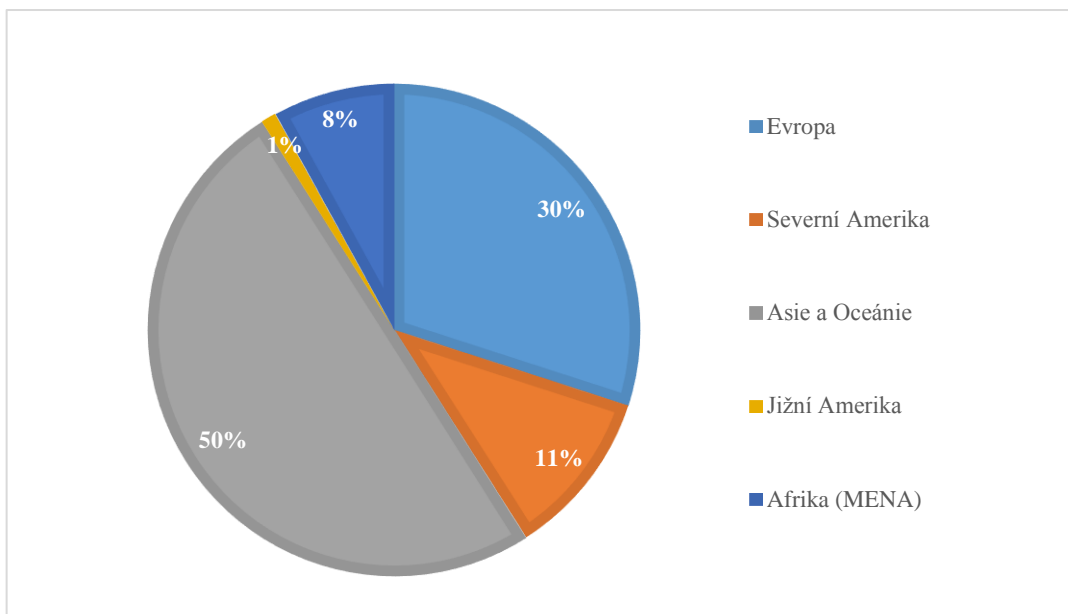
Automatické provozování metra ve světě

Automatizace městských drážních a rychlodrážních systémů je jeden z celosvětových trendů dopravy. Na základě tohoto faktu je vytvářena tato diplomová práce, která by měla přiblížit výhody automatického provozu na plánované trase metra D v Praze. V této podkapitole bude pozornost zaměřena na současný stav automatického provozu a budou popsány jednotlivé automatické provozování metra z hlediska zabezpečovacího zařízení.

V březnu roku 2018 byla dosažena hranice 1000 kilometrů tratí s automatickým provozem metra ve světě. V prosinci roku 2018 tak téměř čtvrtina systémů metra měla alespoň jednu linku v provozovaném systému, která je plně automatická. Celková hodnota je aktuálně 64 plně automatických linek metra na světě ve 42 městech. Od posledních statistických záznamů v roce 2016 tak do současnosti vzniklo 1026 plně automatických tratí, to znamená že došlo k navýšení plně automatizovaných kilometrů o 27,7%. Do roku 2023 existují predikce, že současný kilometrický stav by se měl navýšit až trojnásobně. Nejvyšší potenciál tohoto navýšení se čeká v Číně. Z grafu na obrázku 8 je vidět, že většina automatizovaného provozu je soustředěná v jihovýchodní Asii (50%), následováno Evropou a severní Amerikou. (9)

Z pohledu zemí s nejvyšším procentuálním zastoupením automatického provozu metra se na první příčce řadí Jižní Korea, následována Francií, Singapurem a Malaisií. Při pohledu na samostatná města pak dominuje Singapore (126 km), Kuala Lumpur (97 km) a Dubai (80 km). (9)

Automatický provoz byl v počátcích zaváděn na menších linkách s kapacitou jedné soupravy menší než 300 osob. Postupem času tato kapacita cestujících na soupravu přestala být dostačující, a tak se automatizace začala implementovat na provozování se střední kapacitou soupravy 300-700 osob/vlak a systémy s velkou kapacitou souprav (více než 700 osob/vlak). Od roku 2009 kdy byl automatizovaný provoz zaveden na všechny tři kapacity souprav mají nejvyšší kilometrický nárůst velkokapacitní soupravy (326 km), následovány soupravami se střední kapacitou (433 km) a nízkou kapacitní soupravy (267 km). (9)

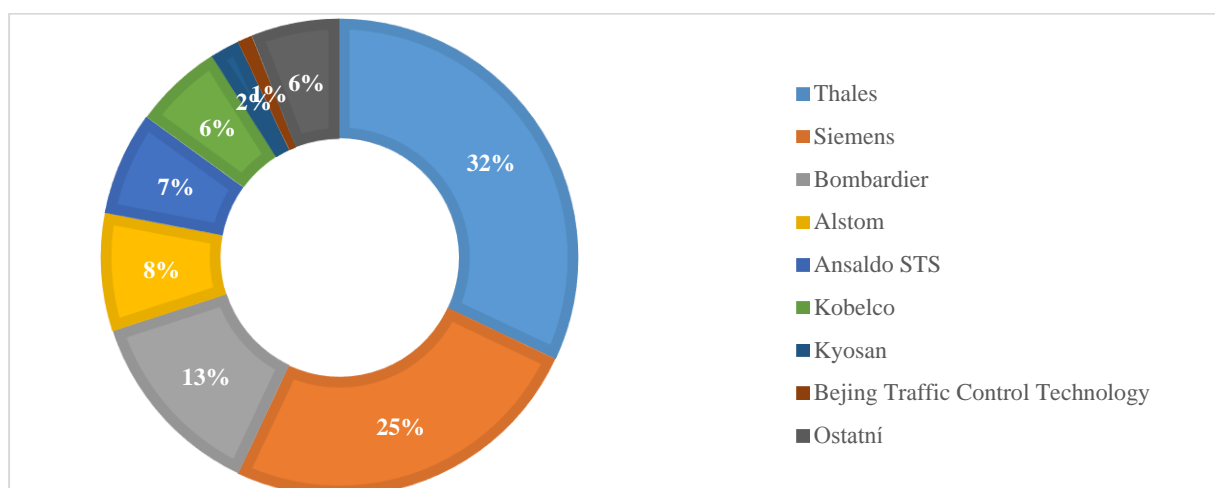


Obrázek 8 Podíl délky automatického provozu tratí ve světě

Zdroj: 9 s úpravou autora

2.5 ZABEZPEČOVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO AUTOMATICKÉ METRO

V současné době je nejpoužívanějším ZZ pro automatický provoz metra systém CBTC, kterým je zabezpečeno 72% celkové provozní délky. Od roku 2009 bylo v režimu CBTC zprovozněno 87% nově budovaných tratí. Hlavním dodavatelem systému CBTC je firma Thales, kterou následuje firma Siemens. Podíl jednotlivých firem spolupracujících na dodávání v závislosti na zprovozněných kilometrech systému je uveden v grafu na obrázku 9.



Obrázek 9 Podíl výrobců CBTC v závislosti na délku linek

Zdroj: (9) s úpravou autora

Systém CBTC byl vyvinut zejména pro vysokokapacitní drážní dopravu. Toto zařízení je velice efektivní na segregovaných tratích, obsluhovaných stejným, nebo velice podobným typem drážního vozidla. Na segregovaných tratích by nemělo docházet k riziku ohrožení dopravy v závislosti na vnějších vlivech (např. povětrnostní vlivy, pohyb neoprávněných osob). Z výše uvedených informací plyne, že vhodnost implementace systému je na tratích metra, kde jsou všechny tyto vlivy vyloučeny, případně na zcela segregovaných městských, nebo příměstských drah.

Typy zabezpečovacího zařízení

Tato kapitola si vzala za úkol popis ZZ typu CBTC od předních světových výrobců. Pro demonstraci bylo vybráno celkem čtyř nejvíce používaných typů ZZ v porovnání na délku tratí, kde je systém používán.

Bombardier CITYFLO

Společnost Bombardier nabízí pro své zákazníky hned dva systémy pro automatický provoz, a to produkt CITYFLO 450 a CITYFLO 650, přičemž zařízení CITYFLO 450 je základní a cenově přijatelná varianta pro segregovaný provoz. Systém CITYFLO 650 je pak plně vybavený systém pro automatický provoz na stupni automatizace GoA4 s vyvíjí do budoucna. (10)

Jako všechny systémy CBTC je systém CITYFLO sestaven na základní architektuře traťové a vozidlové části. Traťová část je rozdělena do jednotlivých traťových zón, které jsou následně rozdělovány do základních traťových segmentů dané traťové zóny. Při průjezdu daným segmentem je poloha zaznamenána a je určen bezpečný počet segmentů, do kterých vlak může pokračovat tak, aby nebyl narušen provoz a byla zajištěna bezpečná zábrzdna vzdálenost. Komunikace mezi vlakem a tratí je zajištěn snímači uloženými v celé délce kolejiště a snímačem umístěným na vozidle. Tato komunikace je prováděna na frekvenci 2,4 GHz mezi traťovým vysílačem a vozidlovým přijímačem. V případě poruch má systém záložní druh řízení, a to v podobě využívání kolejových obvodů a vhodných traťových návěstidel. Systém CITYFLO 650 může při maximálním provozu dosahovat teoretického intervalu následných jízd 75 s. Tato hodnota však ve sledovaných systémech není dosahována a nejčastěji je tento systém využíván při špičkových intervalech 100 až 110 s. (10)

Thales TSTCBTC 2,0

Vlajkovou lodí systému CBTC od firmy Thales je typ nesoucí název SelTrac S40, který je doposud ve světě nevíce zastoupen. V minulém roce přišla firma Thales s novým

druhem ZZ nesoucí název TSTCBTC 2,0 v současné době využíváno v asijských zemích. Tento systém umožňuje jak plně automatický provoz ve stupni GoA4, tak i s vlakovým doprovodem ve stupni GoA3. Tento systém má velmi podobnou základní architekturu jako systém od společnosti Bombardier. Systém pracuje na základě vlakové a traťové části. Traťová část je podobně jako u společnosti Bombardier rozdělena na zóny odpovědnosti, které jsou dále rozdělovány na jednotlivé segmenty. Tyto segmenty jsou v kolejišti určovány indukčními smyčkami nebo radiomajáky, které určují přesnou polohu vozidla na trati. V případě smyček je poloha odometricky dopočítávána, kdežto radiomajáky jsou zařazeny do rádiové sítě dle standardu IEEE 802.11, a mají přesně danou polohu na trati. Systém TSTCBTC 2,0 umožňuje dosažení teoretického minimálního intervalu 70 s. V konvenčním provozu se využívá pro špičkový interval hodnota 90 s. (11)

Siemens Trainguard MT

Systém CBTC od společnosti Siemens nese označení Tainguard MT. Tento systém jako jeden z mála umožňuje smíšený provoz na jedné trati pro vozidla vybavena systémem CBTC, tak například i pro vozidla vybavena systémem ETCS současně. Proto je tento systém vhodně volen pro drážní sítě, které přidávají tratě do stávajícího systému s možností následné modernizace sítě do režimu CBTC. Navíc tento systém je možné nainstalovat ve všech stupních automatizace GoA.(12)

Komunikace mezi traťovou a vlakovou částí CBTC je zprostředkovávána rádiovou sítí Airlink, které pracuje na frekvenci 2,4GHz, která data odesílá za pomoci WLAN. Poloha je v tomto systému zjišťována pomocí radaru a čidel, které za pomoci rychlosti a Dopplerova efektu určí polohu s přesností na 30 cm. Pro určování volnosti traťového oddílu jsou dále používány počítače náprav. Společnost Siemens dokáže řešit všechny přechody mezi jednotlivými stupni automatizace na požadovanou úroveň s možností smíšeného provozu. (12)

V komerčním provozu dosahuje systém špičkového intervalu nejčastěji 90 s. Teoretický minimální interval je 80 s, s možností jeho dalšího snížení, za předpokladu, že nebude umožněn smíšený provoz na jedné trati. (12)

Alstom URBALIS

Systém URBALIS je produktem od společnosti Alstom pro řešení automatických drážních systémů v režimu CBTC. Společnost Alstom nabízí hned několik verzí, ale základ tvoří verze pro plně automatický provoz ve stupni automatizace GoA4 a verze pro provoz souprav bez strojvedoucího, ale s vlakovým doprovodem ve stupni GoA3. Architektura systému je tvořena traťovou a vlakovou částí, která vzájemně komunikuje v rámci rádiové

komunikační síť. Komunikační síť je navržena dle standardu IEEE 802.11 a pracuje na frekvenci 2,4 nebo 5,8 GHz, dle stupně automatizace. (13)

Vlaková část ZZ určující přesnou polohu pracuje na základě komunikace s eurobalízy, které jsou umístěny po celé délce trati. Mezi jednotlivými balízami se následně poloha vlaku určuje za pomoci odometrických výpočetních čidel, která jsou umístěna na nápravách soupravy. Současně nabízí možnost jízdy vlaku nevybaveného tímto ZZ, nebo s poruchou CBTC za pomoci nouzového zabezpečení. Nouzové zabezpečení je tvořeno jednotlivými kolejovými obvody a běžně používaného návěstního systému. Systém URBALIS je schopen dosažení teoretického minimálního intervalu 80 s. V komerčním provozu je i v tomto případě využívána nejčastěji špičková hodnota intervalu 90 s. (13)

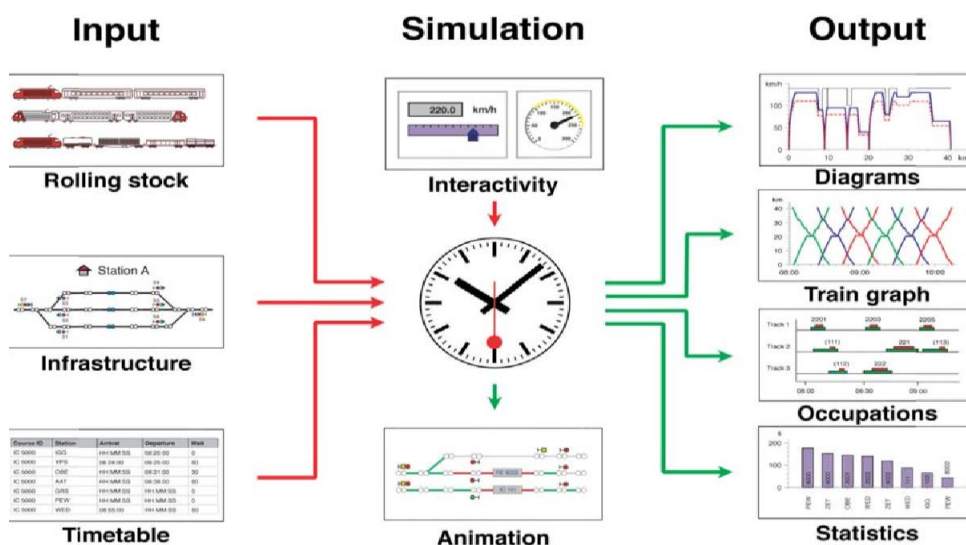
Pro nově budovanou trať metra D v Praze se autor po analýze hlavních dodavatelských firem ZZ CBTC přiklání ke společnosti Siemens. Společnost Siemens má v české republice dlouholeté zastoupení v drážní dopravě, a tedy i sama společnost měla mít zájem na rozšíření místního pole působnosti. Na této společnosti autora především zaujala kompatibilitnost přechodu mezi jednotlivými stupni automatizace a možnost použití tohoto ZZ i v režimu smíšeného provozu. Režim smíšeného provozu by tak mohl být zaveden pro postupnou modernizaci sítě metra v Praze, kde některé úseky tratí už nyní dosahují svých maximálních kapacit. Postupnou modernizací by tedy došlo k navýšení kapacit a možnost pro další zkvalitňování služeb v rámci městské hromadné dopravy v Praze.

3 PŘÍPRAVNÁ FÁZE SIMULACE A VÝBĚR PROVOZNÍHO KONCEPTU

Tato kapitola má za úkol představit si simulační SW OpenTrack ve zkrácené podobě, a následně se začít věnovat získávání potřebných údajů pro vytvoření simulace. Pro simulaci je podstatné sestavení zkoumané infrastruktury, včetně kilometrických poloh jednotlivých stanic, sklonové poměry, jízdní doby, doby obratu souprav a časy pobytu vlaku ve stanicích. Dále je potřeba zadat data o provozovaných soupravách a celkového propojení se ZZ. V poslední části této kapitoly budou představeny možné provozní koncepty budoucí trasy D.

3.1 SW OPENTRACK

Software OpenTrack je software umožňující simulace na železničních sítích vyvíjen prestižní technickou univerzitou ve švýcarském Zurichu Swiss Federal Institute of Technology - Institute for Transport Planning and Systems. Úkolem projektu při vývoji tohoto softwaru bylo objektivně vytvořit uživatelsky příjemný program pro simulaci na železničních sítích. Současně musí umět pracovat na různých platformách výpočetních zařízeních a napomáhat v mnoha otázkách železničního provozu. Systém na základě počátečních dat a informací může vytvořit nepřehledné množství výsledků viz obrázek 8. Mezi základní data patří informace o kolejových vozidlech, infrastruktura, jízdním řádu a ZZ. Výsledná data lze prezentovat v mnoha vizuálních formách, které lze upravit podle uživatelských potřeb. (14)



Obrázek 10 Proces simulace (14)

3.2 PŘÍPRAVA PRO VLASTNÍ SIMULACI

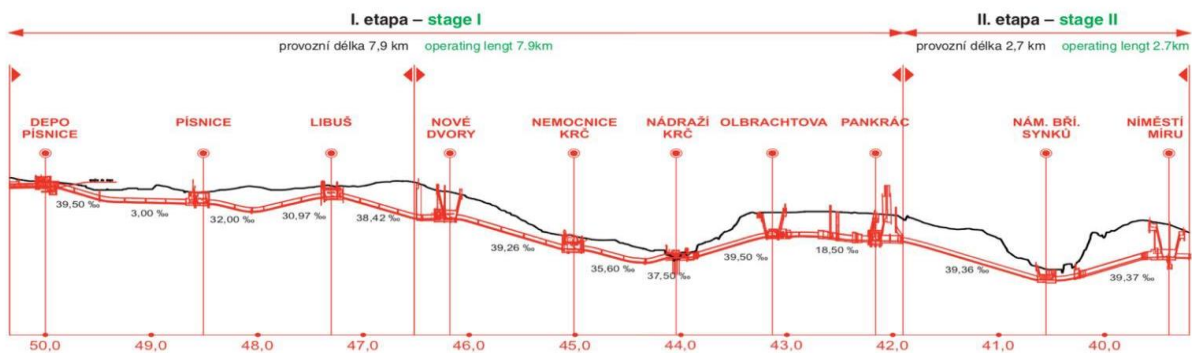
Pro potřeby samostatné simulace je její přípravná fáze ta ze všech nejdůležitější. Je potřeba získat informace o vozidlech, infrastruktuře, času a ZZ. Informace o vozidlech v současné době nejsou k dispozici z důvodu, že stále není jisté, která společnost a jaký druh drážního vozidla bude po nové trase D jezdit. Proto byla pro simulaci použita souprava M1 současně provozována na trase C. Data o vozidle pro simulaci byly získána z Tabulky garantovaných parametrů M1(10). Data o infrastruktuře byla vyvozena na základě Územního plánu a případové studie Institutu plánování a rozvoje a společnosti Metroprojekt a.s. Tyto data jsou uvedena v tabulce 1, která obsahuje i plánované sklonové poměry mezi jednotlivými stanicemi.

Tabulka 1 Vzdálenost a jízdní doba v mezistaničních úsecích

stanice	pobyt (s)	úsek	vzdálenost (m)	Jízdní doba (s)	
				PN-DP	DP-PN
Pankrác (PN)	30				
		PN/C-OL	1000	85	90
Olbrachtova (OL)	20				
		OL-NZ	900	75	80
Nádraží Krč (NZ)	20				
		NZ-NK	1000	75	75
Nemocnice Krč (NK)	20				
		NK-ND	1200	95	85
Nové Dvory (ND)	20				
		ND-LI	1100	85	80
Libuš (LI)	20				
		LI-PI	1200	85	85
Písnice (PI)	20				
		PI-DP	1500	100	100
Depo Písnice (DP)	30				

Zdroj: autor

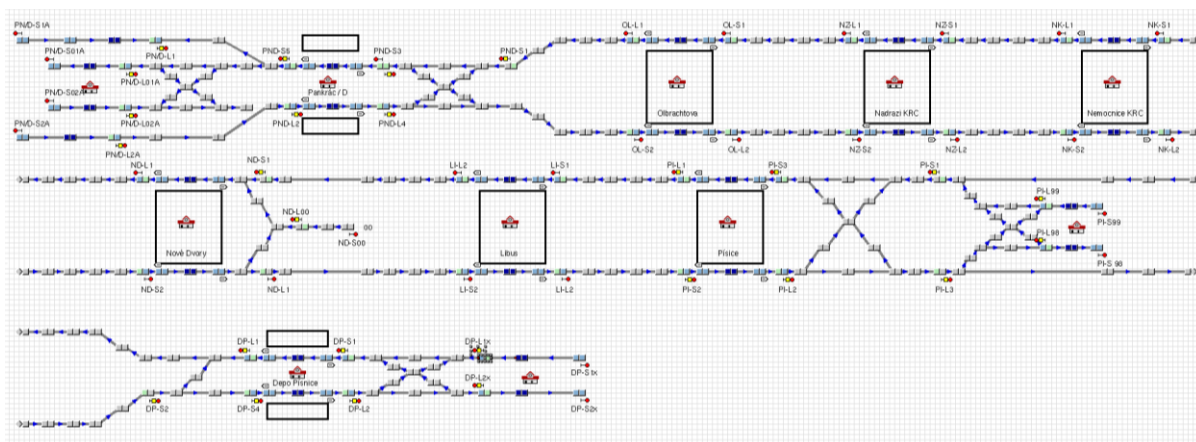
Magistrátem hlavního města Prahy ve spolupráci s DPP bylo rozhodnuto, že minimální délka nástupiště musí být 100 m (standardizovaná míra pražského metra). Sklonové poměry ve stoupání/klesání nesmí přesáhnout 40 ‰ v mezistaničních úsecích a 3 ‰ ve stanici bez protisklonů (tato hodnota je použita i pro odstavně obrátové koleje).



Obrázek 11 Podélný řez trasy D

Zdroj: (15)

Na základě těchto údajů se autor rozhodl počítat vzdálenosti mezi jednotlivými stanicemi vždy na osu nástupiště. Sklonové poměry ve stanicích budou řešeny tak, aby sklon byl vždy ve směru spádu navazujícího mezistaničního úseku. Zadávání dat pro vytvoření funkčního modelu je velice časově náročná činnost. Pro plné využití potenciálu SW OpenTrack je zapotřebí zpracovat a vložit všechna data o infrastruktuře, vozidlech, zabezpečovacím zařízení a jízdních cestách.



Obrázek 12 Infrastruktura trasy D

Zdroj: autor

3.2.1 VYTVOŘENÍ INFRASTRUKTURY PRO SIMULACI

Všechny prvky infrastruktury se postupně vkládají na jednotlivé pracovní listy. Základním prvkem tvorby infrastruktury je tzv. dvoubod (Vertex), který reprezentuje kilometrickou polohu daného místa na trati, odděluje změny parametrů na trati a současně se na tento bod vážou rozhodné prvky infrastruktury. V případě, že se v tomto bodě nemění hodnota sklonu trati, poloměr oblouku, nebo parametry ovlivňující jízdu vlaku, stačí zadat pouze

kilometrickou polohu dvoubodu. Vložení dvoubodu se také používá při vkládání výhybek, námezníků výhybek a umístění rozhodného prvku. Jednotlivé stanice se později vkládají za využití nástroje *Stations*. V každé stanici v každé koleji musí být vložen speciální dvoubod (*Station Vertex*), který reprezentuje kilometrickou polohu dané stanice v každé staniční koleji. Všechny dvoubody je zapotřebí spojit hranou (*Edges*), která reprezentuje kolej v jednotlivých místech. Do těchto hran se následně vkládají informace o sklonových a směrových podmínkách na trati.

Tímto byla vytvořena síť bodů a hran, a je potřeba přiřadit vybrané body k jednotlivým stanicím (*Station Area*), vznikne nám obvod stanice (dvoubody změni barvu na světle modrou).

3.2.2 ZADÁNÍ PARAMETRŮ SOUPRAV

Pro správné zadání parametrů souprav je potřeba postupovat ve dvou krocích. V Prvním kroku se zadávají parametry hnacího vozidla, a v následujícím parametry celého vlaku jako soupravy. Pro potřeby simulace byly vloženy dvě soupravy typu M1, a to pro soupravu plně loženou (8 osob/m²) a souprava prázdná, která sloužila převážně k ověřování a vyvrácení hypotéz o proveditelnosti. Konkrétními parametry, které je potřeba vložit do editoru hnacích vozidel jsou: název hnacího vozidla, hmotnost, adhezní hmotnost, délka hnacího vozidla, maximální rychlost, trakční výkon, napájecí soustava a druh vlakového zabezpečovače. Tyto hodnoty byly autorem zadány na základě garantovaných parametrů pro soupravu typu M1. V druhém kroku je potřeba doplnit parametry vlaku. Tyto parametry se zadávají v editoru pro vlak, kde je každému vlaku přiřazeno hnací vozidlo. Další parametry, které budou zadány pro vlak jsou: název typ a kategorie vlaku, hodnota maximální akcelerace, doba zpoždění náběhu trakce, brzdné charakteristiky a součinitele odporu.

3.2.3 VLOŽENÍ JÍZDNÍCH CEST

Po kompletním zadání výše uvedených hodnot je potřeba stanovit jízdní cesty, které bude model při simulaci využívat. Postup stanovení jízdních cest se skládá ze tří částí. První částí jsou tzv. *Routes* sloužící k přiřazení všech uvažovaných jízdních cest k jednotlivým hlavním návěstidlům. SW OpenTrack umožňuje tyto cesty vyhledat automaticky, ale pro správnost modelu je vhodnější vybrat pouze ty jízdní cesty, které jsou v souladu se závěrovou tabulkou. V druhé části jde o vytvoření konkrétních jízdních cest tzv. *Paths*, které jsou sestaveny z jednotlivých částí *Routes*. V poslední části je potřeba sestavení tzv. *Itineraries*, itinerářů jízdy, které se skládají z jednotlivých částí *Paths*.

3.2.4 VKLÁDÁNÍ JÍZDNÍCH ŘÁDŮ

Následujícím bodem je vytvoření konkrétních vlaků a jejich jízdního řádu. Toto vkládání se provádí v položce *Courses and Services*. V této záložce se konkrétnímu vlaku přiřadí jeho konkrétní číslo, jeho kategorie a způsob obsazování na trati. Pro každý konkrétní vlak je potřeba určit jeho vlastní itinerář (viz. tabulka 2) a určit jeho preferenci v závislosti na dalších vlacích. Nyní je možnost přistoupit k nastavení určitého jízdního řádu, který bude simulace ověřovat. Po prvotní simulaci daného vlaku je možné data o jízdním řádu vhodně upravit podle výsledků průběhu simulace. Pro zjednodušení vkládání vlaků v periodickém intervalu SW umožňuje vkládat následné vlaky ve zvolené periodě následných jízd vůči původnímu jízdnímu řádu.

Tabulka 2 Seznam použitých itinerářů

Itinerář	kolej	počáteční stanice	kolej	cílová stanice
(OI) DP 1001	01	DP	02	PN
(OII) DP 3001	02	DP	01	PN
(OI) DP 5001	01	DP	01	PN
(OII) DP 7001	02	DP	02	PN
(OI) DP 9001	01	DP	1	PN
(OI) DP 901	01	DP	2	PN
(OII) DP 101	02	DP	1	PN
(OII) PN 2002	02	PN	01	DP
(OI) PN 4002	01	PN	02	DP
(OI) PN 6002	01	PN	01	DP
(OII) PN 8002	02	PN	02	DP
(I) PN 8902	1	PN	1	DP
(II) PN 6902	2	PN	02	DP
(OI) PI 7901	99	PI	01	PN
(OI) PI 9901	99	PI	02	PN
(OI) PN 7900	01	PN	98	PI
(OII) PN 9900	02	PN	98	PI

Zdroj: autor

3.2.5 VKLÁDÁNÍ PARAMETRŮ ZABEZPEČOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Zde nastal při vkládání dat pro simulaci menší zádrhel. Bylo zjištěno, že SW OpenTrack ve verzi 1,3, sice umožňuje simulaci v režimu CBTC, ale kvalita simulace neodpovídá předpokladům. Proto byl SW nastaven na provoz CBTC a zároveň pro zabezpečovací zařízení European Train Control Systém (ETCS) L3, které jízdu v pohyblivých prostorových oddílech umožňuje. Funkci referenčních bodů tak plní balízy, které jsou umístěny

v poloze vjezdových návěstidel a mají přesně danou polohu. V modelu není nastavena rádiová síť dle evropského standardu IEEE 802.11, ale je nahrazena rádiovou sítí GSM-R pokrývající kompletní infrastrukturu. Tato rádiová síť zabezpečuje bezpečnou a kvalitativně vhodnou komunikaci mezi drážním vozidlem a řídicím střediskem, které má na starosti řízení provozu na dané trati.

V tuto chvíli máme veškerá potřebná data k infrastruktuře, a připravené itineráře pro samotnou simulaci. Nyní je potřeba vypočítat jízdní doby. Jízdní dobu budeme počítat pro jednotlivé mezistaniční úseky, a současně od zahájení pohybu v jednom směru až po jeho ukončení. Pro výpočet jízdních dob postupujeme dle následujících vzorců, kde v prvním vzorci vypočítáme dobu zrychlení k dosažení maximální rychlosti.

$$t_r = \frac{v_{max}}{a_1} \quad [s] \quad (1)$$

kde:

t_r – čas pro dosažení maximální povolené rychlosti [s]

v_{max} – maximální povolená rychlost [m. s⁻¹]

a_1 – konstanta zrychlení soupravy [m. s⁻²]

(Zdroj: autor)

Dále je nutno zjistit dráhu, kterou dané vozidlo za t_r urazí pro výpočet jeho zábrzdě vzdálenosti a doby jízdy do následující stanice.

$$S_{rozjezdu} = \frac{1}{2} * a_1 * t_r^2 \quad [m] \quad (2)$$

kde:

$S_{rozjezdu}$ – dráha, kterou vozidlo urazí za čas rozjezdu na maximální povolenou rychlost [m]

a_1 – konstanta zrychlení soupravy [m. s⁻²]

t_r – čas pro dosažení maximální povolené rychlosti [s]

(Zdroj: autor)

Analogicky je doložitelný čas a dráha potřebná pro zastavení soupravy do stanice (t_b – čas potřebný pro zastavení (3), $S_{zastavení}$ – dráha pro zastavení soupravy (4)). Další faktor, který zde bude hrát roli je změna konstanty a_1 na konstantu a_2 , která nám udává konstantu „zpomalení“.

Pro případ volného úseku jízdy maximální rychlostí využijeme vzorec rovnoměrného pohybu pro zjištění doby jízdy plnou traťovou rychlostí, která je ve všech mezistaničních úsecích stanovena na 80 km/h. Tato rychlost se mění pouze v místech, kde vlak projíždí kolejovým křížením za účelem změny traťové, nebo staniční koleje a při najíždění a odjezdu z odstavných a odstavně obratových kolejí. V těchto úsecích je maximální povolená rychlost 40 km/h.

$$t_{jízdy} = \frac{s}{v_{max}} \quad [s] \quad (5)$$

kde:

$t_{jízdy}$ – doba jízdy maximální dovolenou rychlostí [s]

s – dráha využitelná pro jízdu maximální povolenou rychlostí [m]

v_{max} – maximální povolená rychlost [m. s⁻¹]

(Zdroj: autor)

Výslednou dobu jízdy posléze dostaneme součtem všech výše vypočtených časových hodnot podle vzorce

$$\sum T = t_r + t_{zastavení} + t_{jízdy} \quad [s] \quad (6)$$

(Zdroj: autor)

Doba zastavení je nastavena podle současných standardů Pražského metra, a to na 30 s na konečných stanicích Pankrác a Depo Písnice pro nástup i výstup cestujících. Doba zastavení je 30 s také při jízdě z Písnice (pokud zde vlak začíná svou jízdu), a také pokud v této stanici svou jízdu končí. Pro zbytek stanic (Olbrachtova-Písnice) je počítáno s dobou zastavení 20 s. Výsledné doby jízdy jsou uvedeny v tabulce 1.

Pro model simulovaný v režimu CBTC bylo zapotřebí vypočítat hodnotu bezpečného rozestupu vlaků, a to pro případy, kde vlak druhý vjíždí do stanice, kde vlak první aktuálně stojí nebo odjíždí. Pro výpočet bezpečného rozestupu jsou zásadní dvě informace, a to bezpečná zábrzdňá vzdálenost a nejistota určit polohu následných vlaků. Bezpečná zábrzdňá vzdálenost je pro všechny vlaky vzhledem jednotnosti vozového parku stejná s parametrem decelerace 0,94 m.s⁻². Podle vzorce (4) zjistíme, že vzdálenost pro zastavení vlaku při použití nouzové brzdy je 262,7m. Bezpečný rozestup se následně vypočítá podle rovnice (7).

$$S_{brv} = S_{bzv} + S_{nup} \quad [m] \quad (7)$$

kde:

S_{brv} – bezpečný rozestup vlaků [m]

S_{bzv} – bezpečná zábrzdňá vzdálenost [m]

S_{nup} – nejistota určení polohy vlaků [m]

Nejistota určení polohy vlaků potom vychází z maximálního rozestupu referenčních bodů, která jsou stanoveny jako začátek a konec nástupiště a v delších mezistaničních úsecích jako polovina jízdní dráhy. Není radno zapomenout na připočítání odchylky měření z důvodu stále nevybudované jízdní dráhy, která bude tvořit 5% hodnotu. Takto zjistíme maximální nejistotu určení polohy pro každý vlak, která je 31,5 m. V rámci bezpečnosti je zapotřebí tuto nejistotu uvažovat u prvního i druhého vlaku, celkem tedy 63 m. Nyní po dosazení do vzorce (6) získáváme hodnotu bezpečného rozestupu souprav 325,7 m.

Pro správné fungování simulačního modelu je potřeba dosadit i hodnotu bezpečnostní vzdálenosti, která je doplněna o zábrzdnou vzdálenost pouze při provozním brzdění. Ta je určena podle vzorce 8.

$$S_{bezp} = (S_{bzv} - S_{prov}) + S_{nup}, \quad [m] \quad (8)$$

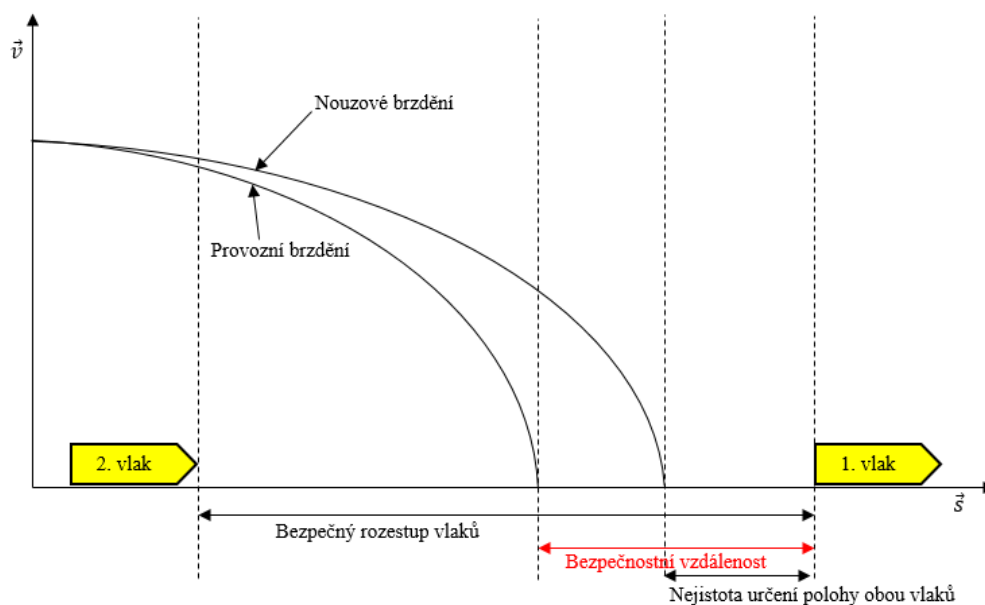
kde:

S_{bezp} – bezpečnostní vzdálenost [m]

S_{nup} – nejistota určení polohy vlaků [m]

S_{bzv} – bezpečná zábrzdná vzdálenost [m]

S_{prov} – zábrzdná vzdálenost při provozním brzdění [m]



Obrázek 13 Model bezpečného rozestupu vlaku

Zdroj: (16)

Na první pohled je samozřejmé, že se obě vzdálenosti budou od sebe lišit z důvodu změny brzdění soupravy. Dalším faktorem bude, zda-li jede souprava prázdná (manipulační

jízdy), nebo naopak obsazená se zátěží v běžném provozu. Výsledné hodnoty ze vzorce 8 jsou uvedeny v tabulce 3, a to pro prázdnou i plnou soupravu, a graficky znázorněny na obrázku 13.

Tabulka 3 Výpočet bezpečnostní vzdálenosti

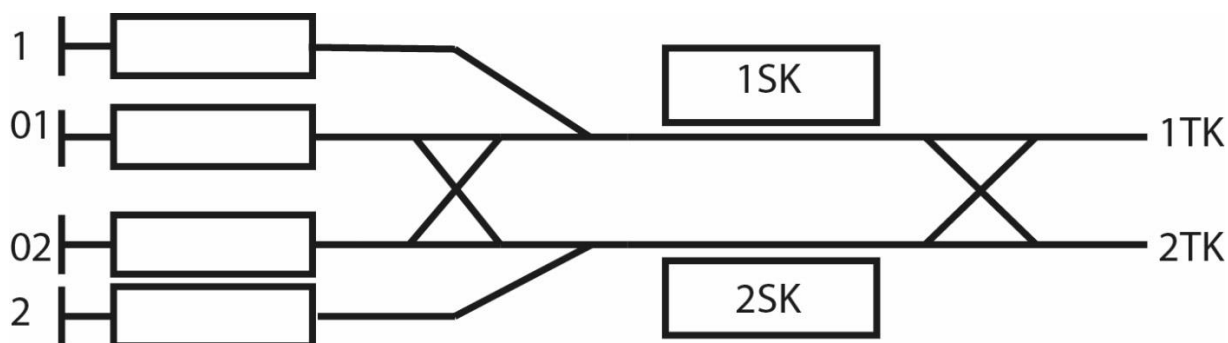
Souprava	Zábrzdná vzdálenost	Bezpečnostní vzdálenost
M1 (0 os · m ⁻²)	197,1 m	128,6 m
M1 (8 os · m ⁻²)	198,1 m	127,6 m

Zdroj: autor

3.3 STANOVENÍ MINIMÁLNÍHO INTERVALU A MINIMÁLNÍ DOBY OBRATU

Několika provedenými simulacemi, bez použití obrátů ve stanicích Pankrác a Depo Písnice bylo dosaženo minimálního intervalu 70 s. Tohoto intervalu v reálném provozu prakticky téměř nelze dosáhnout tak, aby nedocházelo ke konfliktům prvního a druhého vlaku v obratových kolejích. Tato skutečnost již byla předpokládána po analýze firem dodávajících ZZ CBTC. Firmy zde garantují minimální interval cca 80 s, ale při použití v konvenčním provozu je nejčastěji používán špičkový interval 90 s.

Na tomto místě je vhodné popsat technologii obratu v koncových, nebo nácestných obratových stanicích. Postup obratu bude korespondovat s obrázkem 14 ve stanici Pankrác/D v době intervalu dvou po sobě jedoucích vlaků. První vlak vjíždí do stanice PN/D po 1TK a zastavuje na pozici zastavení v 1SK. První vlak na 1SK setrvá po dobu nezbytně nutnou pro výstup cestujících v konečné stanici (předpokládaná hodnota 30 s). Od této chvíle se začíná počítat doba obratu a současně dochází k uvolnění staniční koleje pro druhý vlak. Následuje jízda do odstavně obratové koleje (01 nebo 02), tato jízda za snížené rychlosti by podle předpokladů měla trvat 30 s, stejně tak jako doba jízdy z odstavně obratové koleje zpět na 2SK. Mezi jednotlivými jízdami na a z odstavně obratové koleje je potřeba započítat minimální rezervu pro změnu směru v automatickém systému (předpoklad 10 s). V době opouštění odstavně obratových kolejí již může druhý vlak vjíždět do stanice PN/D a zahájit výstup cestujících. Po příjezdu prvního vlaku do 2SK nastává postup uvolnění a rušení vlakové cesty (pro tuto dobu zvolena hodnota 10 s). V součtu časových hodnot mezi odjezdem prvního vlaku z 1.SK a příjezdem do 2.SK uplyne doba 80 s. Tato situace je identicky matematicky řešena ve vzorci 9.



Obrázek 14 Kolejové schéma stanice Pankrác/D

Zdroj: autor

Doba obratu lze vypočítat jako provozní interval obratu za pomoci vzorce (9). Využijeme zde statických hodnot používaných pražským dopravním podnikem pro jízdu na a z obratové koleje 30 s.

$$t_{OB} = t_{zm} + t_{jn+jz} + t_{uv} \quad [s], \quad (9)$$

(Zdroj: autor)

kde:

t_{ob} – doba obratu [s]

t_{zm} – doba potřebná pro změnu směru automatického systému [cca 10 s]

t_{jn+jz} – doba jízdy na a z obratu [cca 60 s]

t_{uv} – doba uvolnění výměň po průjezdu vlaku a příprava vlakové cesty [cca 10 s]

Ze vzorce byla nejnižší doba obratu stanovena na 80 s. Pro možnost eliminace nepříznivých vlivů ze vzniku potencionálního zpoždění bývá tato doba navýšena o 10 % a zaokrouhlena vždy na hodnotu násobku 5vteřin. Nejnižší provozní interval je tedy 90 s mezi jednotlivými vlaky. Tato hodnota je použita při tvorbě simulace maximálního provozu v dopravní špičce.

3.4 PROVOZNÍ KONCEPT

Tato podkapitola se bude věnovat provozním konceptům nově navrhované linky metra D, v průběhu historie navrhování koncepcí linky metra D. Jak již bylo v úvodu zmíněno má trasa D ve své první fázi spojit stanice Depo Písnice a stanici současné trasy C Pankrác. Existuje několik návrhů: a to segregovaná trať pro vozidla lehkého metra, propojený systém těžkého metra s kolejovou spojkou a zaústěním do stávající linky C, a segregovaná trať pouze pro systém těžkého metra.

První dvě provozní části ve výstavbě (I.D) zahrnují výstavbu trati včetně 8 stanic (Depo Písnice, Písnice, Libuš, Nové Dvory, Nemocnice Krč, Nádraží Krč, Olbrachtova a Pankrác), o provozní délce 7,9 km. Tyto stanice by měly být mezi stanicemi Pankrác a Depo Písnice provázány kolejovou spojkou do DKV Písnice se samostatným prostorem a budovou depa, podobně jako DKV Kačerov. Stanice Písnice z hlediska předběžných plánů obsahovat úvratňovou kolejovou spojkou před stanicí Libuš (stejně jako je tomu dnes ve stanici Pražského Povstání na lince C). Ve stanici Nové Dvory je počítáno s kolejovým větvením pro odstavně obratovou kolej.

Segregovaný systém lehkého metra

Segregovaný systém v podání tzv. lehkého metra na pneumatikách je v dnešní době ve světě velmi populární, a proto není divu, že i v návrhu budované trasy D objevil. Vlaky tohoto segregovaného provozu by bylo možno využívat pouze na trase D. Lehké metro přináší největší přínos nízkými náklady na budování a při využívání automatického provozu nižší zátěž pro životní prostředí. V této variantě stejně jako u dvou níže zmíněných variantách se bude nacházet kolejová spojka před stanicí Pankrác ze směru Budějovická. Tato kolejová spojka by měla být zaústěna v trase D mezi stanicemi Olbrachtova a Pankrác, s návazností na jednoduchý kolejový rošt, který by v budoucí trase D umožňoval pohyb manipulačních a servisních vozů. Tyto vozy jsou velmi finančně náročné a jejich pořízení pro samostatnou segregovanou linku by bylo finančně nerozumné v prvních fázích výstavby. Samostatný segregovaný provoz přinese velký přínos pro pražskou veřejnou dopravu až ve chvíli dokončení provozního úseku III.D procházející stanice Náměstí bratří Synků, Náměstí Míru. Stejně prodloužení je uvažováno u všech provozních konceptů. O této koncepci provozu pražského metra bylo hlasováním v roce 2017 rozhodnuto jako o realizovatelném s nejvyšší prioritou, a to především díky nejnižším nákladům na výstavbu, provoz a nákladům na údržbu.

Propojený systém těžkého metra s kolejovou spojkou ve stanici Pankrác

Tento provozní koncept vznikl již v 90. letech minulého století, kdy se počítalo se zaústěním linky D do současné stanice Pankrác. V navrhované koncepci by vlaky ze stanice Písnice/Depo Písnice pokračovaly kolejovou spojkou ze stanice Olbrachtova do stanice Pankrác na trase C, a odtud jako součást provozu až do stanice Nádraží Holešovice. Současně v této variantě bylo počítáno se zachováním pásmového provozu mezi stanice Ládví a Háje. Mezi stanicemi Letňany a Nádraží Holešovice by vznik samostatný nepravidelný interval, který by doplňoval provoz na lince C, a to buď v poměru 1:1 (vlak přejíždějící na trasu linky D: vlak pokračující do stanice Kačerov/Háje), nebo v poměru 1:2. To by znamenalo bez segregovaného pásmového provozu mezi stanicemi Letňany – Ládví nárůst následných mezidobí mezi jednotlivými vlaky v odpoledním sedle až na neúnosný interval 18 minut. Stejně tak by došlo k navýšení intervalu mezi stanice Pankrác – Háje. Z tohoto důvodu a také z důvodu složitosti řešení souprav vlaků a komunikace dvou zabezpečovacích zařízení byla tato varianta zamítnuta. Dalším důvodem k zamítnutí této varianty byla již v současné době téměř naplněná kapacita infrastruktury. To by vedlo k vysokému nárůstu kolizních bodů.

Segregovaný systém těžkého metra

Segregovaný systém těžkého metra byl brán v potaz z důvodu sjednocování vozového parku a snadnější možnosti interoperability mezi jednotlivým linkami a zabezpečovacími zařízeními. Důvodem, proč tento systém provozu nebyl dále v provozních návrzích řešen, je velká počáteční investice do budování infrastruktury pro vysoké rychlosti v rámci systému metra. Finančně nákladné jsou současně vysoké nároky na snížení nežádoucích vlivů (především otřesy a vibrace). Otřesy jsou jednou z nejhorších potíží při budování těžkého metra v malých hloubkách pod zemí (příkladem je dnešní stanice Střížkov (přejezd kolejových vozidel po kolejovém křížení v úseku mezi stanicemi Střížkov a Prosek způsobuje otřesy a vibrace v bytové zástavbě nad tímto úsekem)). To by znamenalo v místech, kde by se tyto nepříznivé vlivy projevovaly snížení maximální rychlosti, a tím k celkovému snižování propustnosti trati.

Podkapitola provozních konceptů byla stručně zaměřena na problematiku a územní položení navrhované linky D a zhodnotila původní koncepční návrhy provozu linky. Z těchto návrhu jako i v jiných státech napříč všemi kontinenty vyplývá koncept automatizovaného provozu metra finančně nejméně náročný systém VAL na pneumatikách, které přináší

počáteční finanční úsporu 6,3–15,6 %. Pro rozvoj infrastruktury metra by však autor doporučil vybudování systému těžkého metra s kolejovou spojkou ve stanici Pankrác s předpokladem, že i přes kolejové napojení na trasu C bude provoz na trase D segregovaný. Tento systém v budoucnu mohl umožnit snížení nákladů na vybudování nového depa kolejových vozidel ve stanici Písnice. Současně bude schopen napomoci postupné obnově zabezpečovacího zařízení a vozového parku na trase C, a posléze na celé síti metra.

4 SIMULACE AUTOMATIZOVANÉHO PROVOZU

Poslední kapitola diplomové práce se bude zabývat samotnými simulacemi provozu. Pro tuto diplomovou práci byly vybrány dvě simulace, a to konvenční provoz a maximální varianta. Konvenční simulace bude představovat standardní stav, ke kterému by se mělo metro D při segregovaném provozu dostat pro dosažení uspokojení přepravní poptávky. Konvenční provoz bude dosahovat minimálního špičkového intervalu následných jízd 3 minuty. Varianta maximálního provozu bude simulována ve špičkovém intervalu následných jízd 1,5 minuty. Tato simulace by měla obsahovat vstupní informace pro rozvoj infrastruktury provozní částí III.D. V úseku III.D vy při vhodném použití nastaven pásmový provoz Nové Dvory a připravované stanice Náměstí Míru.

Každá část dne z hlediska simulace bude současně porovnána s trasou metra C z hlediska přepravní nabídky a poptávky. Trasa C byla vybrána z důvodu napojení trasy D ve stanici Pankrác, ale také z důvodu podobné spádové oblasti. Vedení trasy D by mělo ulehčit provozu autobusových linek v této části Prahy a tím i celému silničnímu provozu. Grafy srovnání přepravní nabídky a poptávky jsou kapacitně nastaveny na obsazení 1000 osob/vlak v jednom směru, s časovými rozestupy 15 minut.

4.1 POČET POTŘEBNÝCH SOUPRAV

Pro účely simulace a návrhu grafikonu vlakové dopravy spojené s návrhem grafikonu oběhu souprav je na začátku určeno kolik souprav bude pro provoz potřeba. Tento počet se určuje na základě údajů maximálního provozu pro dané období. Simulace pro diplomovou práci je koncipována na běžný pracovní den v rozsahu 24 hodin. Počet potřebných souprav vypočítáme podle vzorce

$$N_{svmin} = \frac{t_{jDP-PN} + t_{jPN-DP} + 2 * t_{obMIN}}{I_{pr}} \quad [\text{souprav}] \quad (9)$$

(Zdroj: autor)

kde:

N_{svmin} – minimální počet potřebných souprav [souprav]

t_{jDP-PN} – doba jízdy mezi stanicemi DP – PN včetně pobytů ve stanicích [s]

t_{jPN-DP} – doba jízdy mezi stanicemi PN – DP včetně pobytů ve stanicích [s]

t_{obMIN} – minimální doba obratu v koncových stanicích [s]

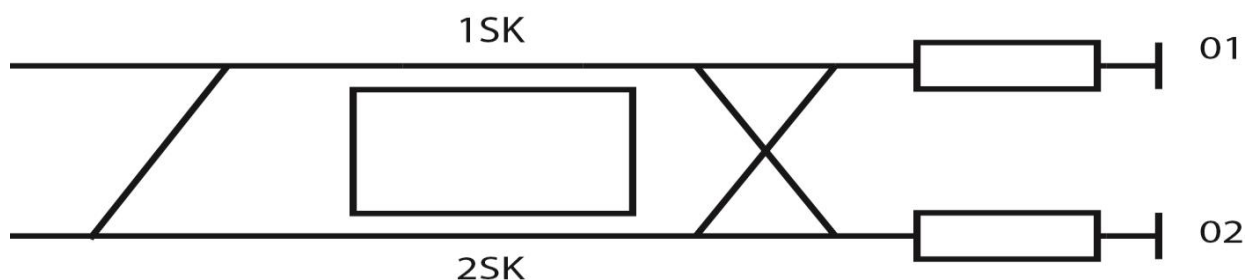
I_{pr} – interval provozu souprav v mezistaničních úsecích [s]

Při variantě konvenčního provozu bylo dosaženo hodnoty 9,6 soupravy. Po zaokrouhlení bude potřeba pro provoz ve špičkovém intervalu konvenčního provozu 10 souprav. Tuto hodnotu je pro reálný provoz potřeba navýšit minimálně o jednu záložní soupravu, která bude umístěna na odstavně obratové koleji 00 ve stanici Nové Dvory. Pro variantu maximálního provozu bylo dosaženo výsledného počtu 17 souprav bez soupravy záložní, která bude opět umístěna ve stanici Nové Dvory.

Návrh grafikonu vlakové dopravy bude vycházet ze současného jízdního řádu pro trasu C. Tento jízdní řád nám dává informace o postupném zkracování a navyšování provozních intervalů v průběhu zkoumaného období.

4.2 ZAČÁTEK PROVOZU, RANNÍ SEDLO

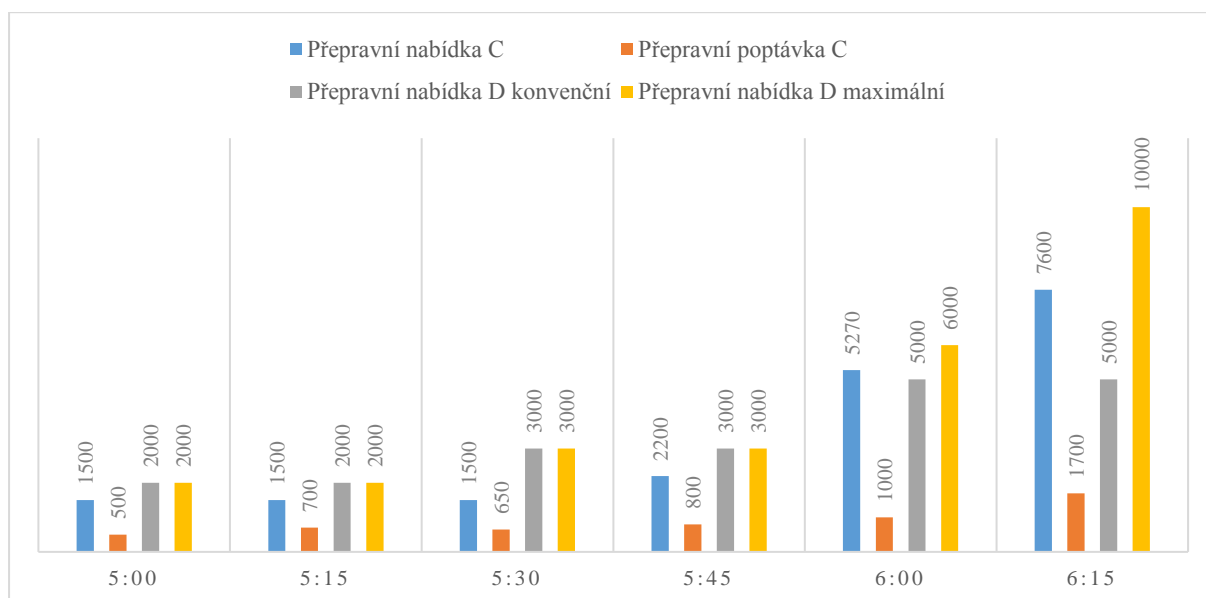
Začátek provozu je v současné době na trasách pražského metra prováděn kontrolním vlakem. Tento vlak jezdí rychlostí 40 km/h v plně osvětleném tunelu se zapnutým zabezpečovačem a zdvojenou vlakovou četou. Tato povinnost odpadá při využití automatického provozu, pokud v době noční odstávky provozu nebyla v tunelu prováděna údržba. To je zajištěno za pomoci stěny na nástupní hraně s automatickými dveřmi, které zabrání vstupu nepovolaným osobám. Pro konvenční i maximální provoz začíná provoz ve 4:40 vyjetím prvního vlaku z 01 koleje ve stanici Depo Písnice a ve stejném čase z koleje 02 ve stanici Pankrác. Následný provoz pokračuje v intervalu 600 s, přičemž po prvních vlcích následuje odjezd vlaků z 02 koleje Depo Písnice a z koleje 01 Pankrác. Provoz v intervalu 600 s pokračuje až do času 5:25, kdy se interval následných jízd zkracuje na 300 s prvním vytažením soupravy z DKV ve stanici Písnice a v čase 5:35 vytažení druhé posilové soupravy.



Obrázek 15 Základní stav stanice Depo Písnice při konvenčním provozu (autor)

Při zahájení provozu se dostáváme na kapacitu nabídky v jednom směru na hodnotu 2000 osob (viz. obrázek 11). Při porovnání s trasou C je na trase D navýšení kapacity o 500 cestujících. Z grafu je patrné, že při porovnání nabídky trasy D a poptávky trasy C, je nabídka kapacity dostatečná až do časového období 6:15. Nutno brát v potaz, že v této době dochází k velkému přesunu osob do zaměstnání a školních zařízení. V čase 6:15 tak dochází při

porovnání nabídky trasy C a trasy D v konvenčním provozu k vyšší nabídce na trase C. Z pohledu autora je tato skutečnost oprávněna z důvodu většího urbanismu větve trasy C od stanice Pankrác do stanice Háje, kde trasa C protíná hned čtyři vysokokapacitní sídliště Prahy.



Obrázek 16 Graf přepravní nabídky a poptávky - zahájení provozu

Zdroj: (17) s úpravou autora

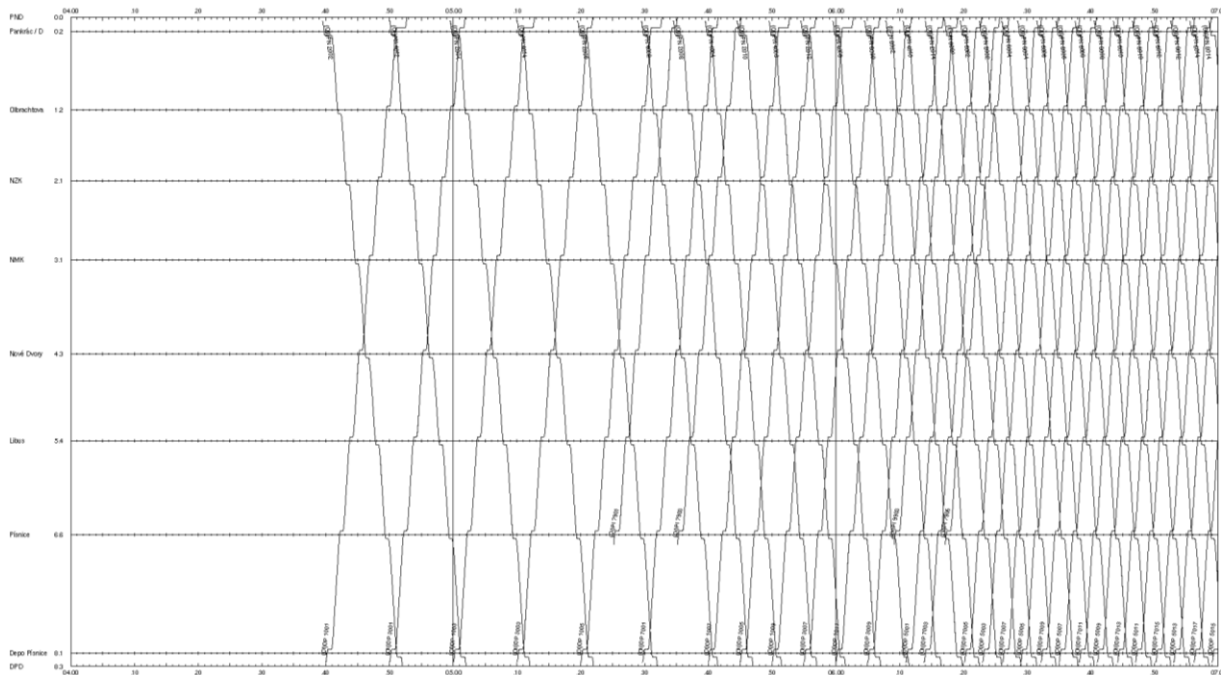
4.3 NÁVOZ PRO RANNÍ ŠPIČKU A JEJÍ PROVOZ

Ranní špička začíná u obou variant v 6:00, kdy se provozní interval mezi jednotlivými soupravami opět zkracuje na interval 180 s. Do 6 hodiny jsou tedy oba provozy teoreticky identické.

4.3.1 RANNÍ ŠPIČKA KONVENČNÍ PROVOZ

Při konvenčním provozu dochází k vytažení dalších dvou souprav z DKV v čase 6:08 a 6:17. Ve stejných časech vyjíždějí také dva vlaky ze stanice Pankrác, které jsou deponovány na 1. a 2. odstavně obrátové koleji. V 6:08 vyjíždí vlak z 1. koleje, který svou jízdu zahajuje do 1SK PN/D, po uplynutí doby zastavení pokračuje průjezdem křížové spojky před stanicí Pankrác do 2TK. Následuje pokračování v jízdě dle běžného provozu v intervalu 180 s. Konec ranní špičky začíná v 9:23 odstupem souprav z 1TK na odstavně obrátovou kolej 1 ve stanici Pankrác a v 2TK odstupem vlaku do DKV. V čase 9:32 dojde opět k odstupu dvou souprav v obou traťových kolejích. Následuje provoz v dopoledním sedle, který se vrací k intervalu

300 s a pokračuje do 14:30, kdy dochází ke zkrácení provozního intervalu a nástup odpolední špičky.

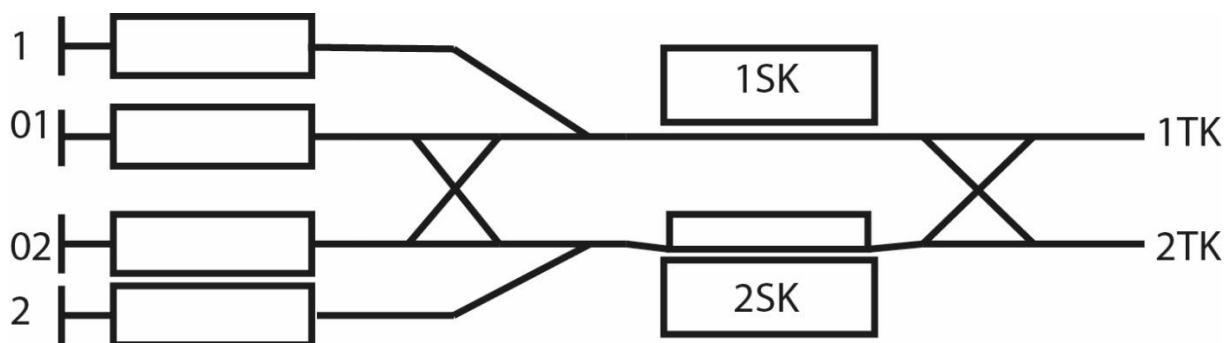


Obrázek 17 Zahájení provozu a nástup ranní špičky konvenčního provozu

Zdroj: autor

4.3.2 RANNÍ ŠPIČKA MAXIMÁLNÍ PROVOZ

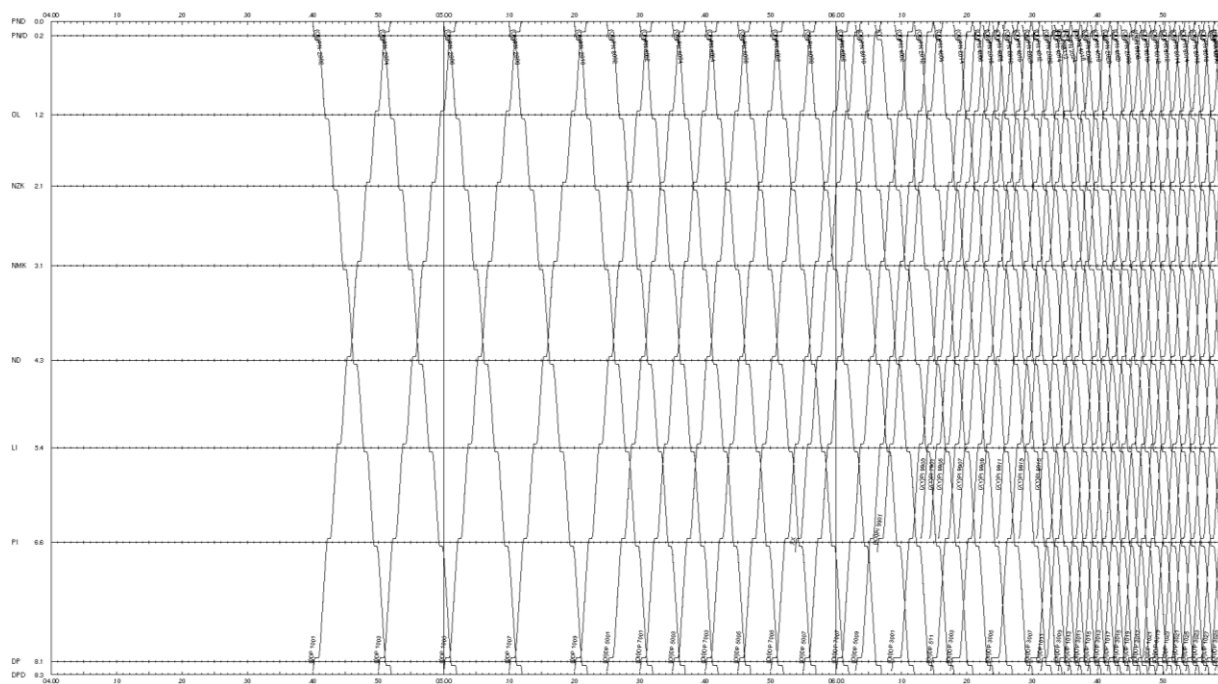
Jak již bylo výše zmíněno, tak oba provozu i simulace jsou do času 6:00 identické. I v simulaci maximálního provozu je uveden do provozu interval 180 s. Tento interval je provozu ve stanici Depo Písnice až do času 6:30. Interval 180 s je však ve stanici Písnice narušen od času 6:07, kdy dochází k začátku navážení souprav pro ranní špičku s intervalem ze stanice Písnice 90 s. Postupně je vytaženo do provozu hned devět souprav tak, aby od času 6:21 byl zahájen provoz ze stanice Pankrác ve špičkovém intervalu 90 s. Stejně jako v konvenční variantě simulace tak i v té maximální je pro odlehčení 1TK při návozu souprav do provozu využito souprav deponovaných mimo špičkový provoz na 1. a 2. odstavné koleji ve stanici Pankrác.



Obrázek 18 Počáteční stav stanice Pankrác pro maximální variantu

Zdroj: autor

Interval 90 s je ze stanice Depo Písnice v plném provozu od času 6:34 a pokračuje až do 9:10, kdy vyjíždí první vlak ze stanice Pankrác, který zahájí odstup souprav zpět do DKV v Písnicích. V 9:30 začíná provoz v prodlouženém intervalu 180 s, při kterém nadále dochází k postupnému odstupu souprav do DKV a dvou souprav do odstavných kolejí (1 a 2) ve stanici Pankrác. Postupným odstavováním souprav se simulace dostává do času 10:00, kdy začíná dopolední sedlo a prodloužení intervalu na 300 s.

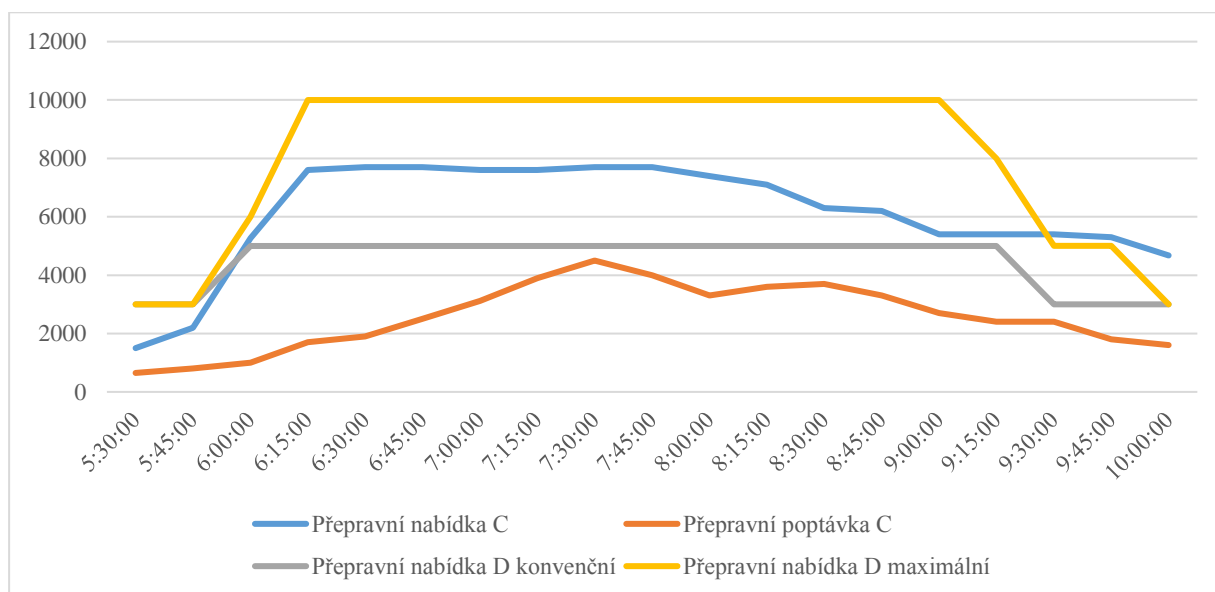


Obrázek 19 Zahájení provozu a nástup ranní špičky maximálního provozu

Zdroj: autor

Ranní špička v Praze začíná přibližně v 6:00. To je patrné jak z grafikonu provozu na obrázku 13, tak na kapacitním grafu (obrázek 14). Z grafu je patrné, že navýšení kapacity na interval 90 s je výrazně skokové, kde dochází navážení vlaků z DKV vždy mezi dva vlaky

jedoucí v 1TK v intervalu 180 s. V tomto bodě tedy dochází k ostrému přechodu intervalu ze 180 na 90 s. Z hlediska kapacity je trasa D schopna uspokojit poptávku po dopravě (trasy C) i v režimu konvenčního provozu. Situace, která autorovi navozuje obavy je příchod cestujících z trasy D na trasu C ve stanici Pankrác. Graf ovšem ukazuje, že po modernizaci stávajícího ZZ Matra PA 135 na systém CBTC na trase C nastane možnost snížení intervalu a tím navýšení nabídky kapacity. V současné době je minimální špičkový interval na trase C 115 s. Modernizace stávajícího systému by mohla umožnit minimální špičkový interval na 90 s. V reálném provozu to znamená, že v intervalu 15 minut se stihne nasadit o dvě soupravy do provozu více.



Obrázek 20 Graf nabídky a poptávky - ranní špička

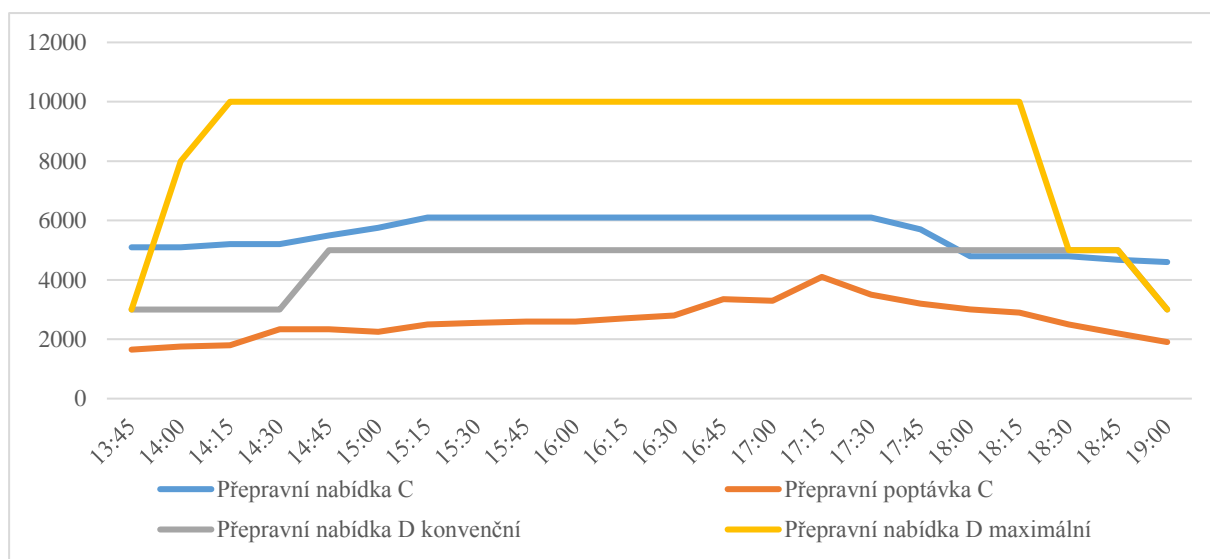
Zdroj: (17) s úpravou autora

4.4 NÁVOZ SOUPRAV A ODPOLEDNÍ ŠPIČKA

Dopolední sedlový provoz v intervalu 300 s je v obou variantách naplánován až do času 14:00. V konvenční variantě začíná opětovným návozem dvou souprav z 1. a 2. koleje ve stanici Pankrác a dvou souprav z DKV v Písnicích. Následuje odpolední provoz v rámci špičkového intervalu 180 s až do 19:00. V časech 18:51 a 18:57 dochází k opětovnému zatažení souprav na odstavné koleje ve stanici Pankrác a do DKV. Při simulaci maximálního provozu je taktéž provoz v intervalu 180 s zahájena ve 14:00. Stejně jako při nástupu souprav na ranní špičku je brzo narušen ve stanici Písnice, kde začínají najíždět soupravy z DKV. Soupravy z DKV vyjíždějí v intervalu 180 s, přičemž odjíždí v intervalu 90 s mezi soupravami,

kteří zahajují svou jízdu již ve stanici Depo Písnice. Odpolední špička je zahájena ve stanici Pankrác v čase 14:15. Odstup souprav a opětovné navýšení provozního intervalu na 180 s začíná v simulaci maximálního provozu v 18:30, a další navýšení provozního intervalu na 300 s. V 19:00, a následuje večerní sedlo a odstup vozidel pro noční provoz.

Z hlediska nabídky a poptávky po kapacitě dopravy se zde odehrává podobný scénář jako v případě ranní špičky. Na grafu je vidět, že poptávka po dopravě na trase C dosahuje svého maxima v maximální hodnotě 4100 osob, a ani nabídka přepravy nedosahuje příliš vysokých hodnot. Z hlediska nabídky po dopravě při maximálním provozu na trase D dochází k pozvolnějšímu navázení souprav do systému. V průběhu odpolední špičky je při maximálním provozu dosahováno téměř dvojnásobné kapacity oproti trase C, která z pohledu autora nebude na trase D využita. Na konci odpolední špičky naopak dochází ke skokovému odstupu souprav jízdou do DKV, kde zrcadlově dochází k odstupu každého druhého vlaku ve stanici Písnice a tím zvýšení intervalu na 180 s. Po stabilizaci intervalu na 180 s opět dochází ke snižování počtu souprav a zvýšení intervalu na hodnotu 300 s, a 3000 osob za 15 minut.



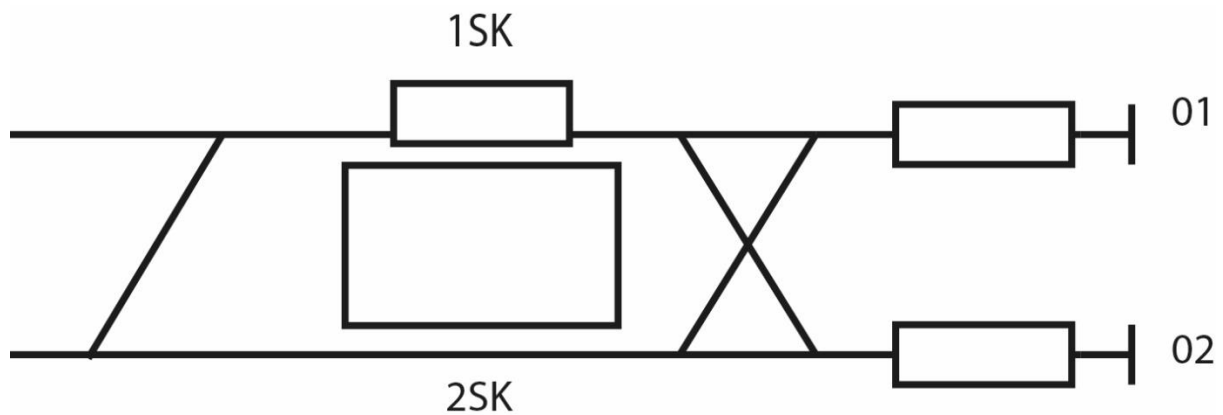
Obrázek 21 Graf nabídky a poptávky - odpolední špička

Zdroj: (17) s úpravou autora

4.5 VEČERNÍ SEDLO A Odstup souprav

Časem 19:00 v simulaci oficiálně začíná večerní sedlo a odstup zbývajících dvou souprav před ukončením provozu do DKV. V simulaci konvenčního provozu k odstupu souprav do DKV dochází v časech 20:10 a 20:20. V simulaci maximálního provozu dochází

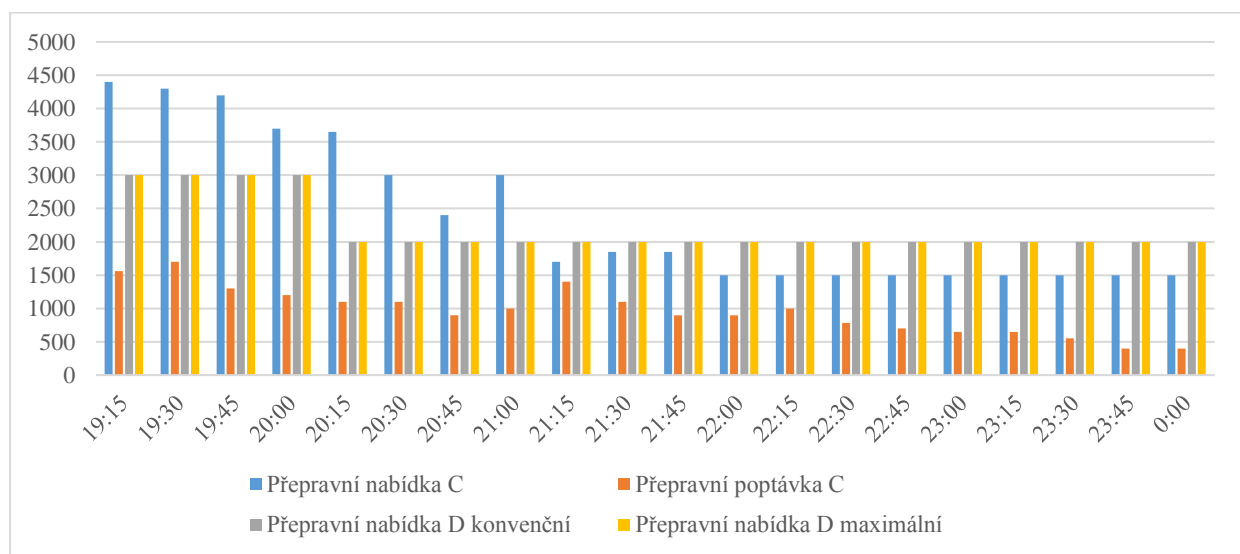
k odstavu zbylých souprav v čase 20:30, kdy vlak jedoucí po 1.TK ukončí svou jízdu ve stanici Pankrác, a vlak v 2.TK končí svou jízdu ve stanici Depo Písnice na koleji 02.



Obrázek 22 Konečný stav maximální simulace ve stanici Depo Písnice

Zdroj: autor

Večer z pohledu nabídky a poptávky se dostáváme do zrcadlově totožné situace jako ráno. Tato situace je jiná v nabídce kapacity na trase C, která je až třikrát vyšší než poptávka po samotné dopravě. Současně je vyšší i v porovnání nabídky přepravní kapacity na trase D, kde poptávka po dopravě bude podle předpokladu autora poloviční v porovnání s trasou C. Při nočním provozu je patrný již minimální zájem o přepravu, který klesá pod hranici 500 osob za 15 minut. Přepravní nabídka by v těchto hodinách mohla být snížena prodloužením intervalu na 12000 s. V tom to případě by tak došlo by k nerentabilitě provozu. Takto vysoký interval by již nebyl při rozhodování o druhu přepravy řazen mezi preferované.



Obrázek 23 Graf nabídky a poptávky - noční provoz

Zdroj (17) s úpravou autora

Po provedení simulací a grafického zobrazení přepravní nabídky a poptávky, je zřejmé, že nabídka výrazně převyšuje poptávku. Tato situaci je možné řešit navyšováním provozního intervalu, který během dne bude využíván pro danou trasu. Vzhledem k situaci geografického uspořádání v okolí trasy není potřeba držet minimální špičkový interval na hodnotě 90 s, který nebude rentabilní. Z dostupných dat přepravních průzkumů je vhodnější ponechat minimální špičkový interval 180 s. Při intervalu 180 s je trasa D schopna uspokojit poptávku až 32300 osob za hodinu při maximální obsazenosti 8 osob/m² (viz. tabulka 4). Hodnota 6 osob/m² takřka odpovídá současné poptávce na trase metra C v jednom směru při průměrném obsazení soupravy.

Tabulka 4 Kapacita přepravy v závislosti na intervalu následných jízd

Interval (s)	90		120		180		240		300	
Obsazení souprav (os/m ²)	6	8	6	8	6	8	6	8	6	8
Kapacita osob/h	48450	64600	32328	43024	24225	32300	16164	21512	12123	16134
Interval (s)	360		420		480		540		600	
Obsazení souprav (os/m ²)	6	8	6	8	6	8	6	8	6	8
Kapacita osob/h	8082	10756	6062	8067	4041	5378	3031	4034	2021	2689

Zdroj: autor

Po zjištění aktuálních dat o poptávce na nově vybudované trase D tabulka 4 naznačí potřebný interval následných jízd. Jelikož simulace byla prováděna s identickou soupravou typu M1, která je v současné době v provozu na trase C, jsou tyto předběžné výpočty využitelné i na tuto trasu. V rámci následné modernizace by pak bylo vhodné zvážit zavedení intervalu 90 s na trase C, tak aby byla uspokojeno navýšení poptávky po dopravě připojením trasy D do sítě pražského metra.

V tabulce 5 jsou znázorněny požadavky na provozní charakteristiky stanovené Magistrátem hlavního města Prahy. Požadavky na infrastrukturu byly splněny bez obtíží, ale do budoucna při dostavbě úseku III.D nejspíš vyvstane problém s podélným sklonem trati mezi stanicemi Pankrác a Náměstí bratří Synků. Z hlediska počtu vozů zatím není určený konkrétní dodavatel souprav, proto byla pro simulaci zvolena jednotka M1, která je aktuálně v provozu na trase C. Minimálního provozního intervalu bylo dosaženo pouze v maximální variantě z důvodu odlišnosti simulačních modelů. Minimálního technického intervalu (70 s) bylo dosaženo v obou simulacích za použití ostrých obrátů v koncových stanicích. Předpoklad standardního obsazení soupravy byl pro simulaci navýšen na hodnotu 8 osob/m². Tímto navýšením bylo dosaženo hodnoty 64600 osob/hodinu oproti předpokládaným 21000 osob/m².

Nutno podotknout, že navýšením obsazenosti nedochází k žádným vlivům při jízdě soupravy. Požadavek zabývající se počtem inventarizovaných vozových souprav je splněn pouze pro konvenční variantu (10+1 záložní souprava), pro maximální počet bude zapotřebí množství souprav navýšit alespoň na hodnotu 20 souprav. Tedy shrnuto všechny základní požadavky byly v obou simulacích splněny a v maximální variantě bylo dosaženo násobně vyšších hodnot.

Tabulka 5 Požadavky na provoz a jejich splnění

Oblast zaměření:	Požadavek MHMP	Konvenční simulace	Maximální simulace
Délka nástupišť (m)	100	splněno	splněno
Rychlost (km/h)	80	splněno	splněno
Max. podélný sklon (‰)	40	splněno	splněno
Sklon trati ve stanicích (‰)	3	splněno	splněno
Počet vozů v soupravě	5	Souprava M1	Souprava M1
Minimální provozní interval (s)	90	180	90
Minimální technický interval (s)	70-75	splněno	splněno
Standardní obsazení osob (os/m ²)	2,6	8	8
Provozní interval pro špičkové zatížení (s)	180	180	90
Počet vozových souprav (inventární)	15	11	18
Maximální přepravní kapacita při intervalu 90s (os/h)	21000	nezkoumáno	64600

Zdroj: autor

Provedená simulace může na první pohled vypadat jako monotónní a lehce předvídatelná. Z této vize byl autor vyveden při nutnosti dopočítávání časových hodnot při navážení souprav do oběhu a mnoha nesčetných komplikací pro správný chod simulace. V rámci konvenčního provozu byla sestavena simulace provozu (04:00-01:00) celého přepravního dne. Během této simulace bylo využito tří intervalů (600 s, 300 s, 180 s) a zkonstruováno celkem 544 jízd vlaku. Proběh vlakových souprav v této simulaci tak tvořil 4292 kilometrů. V simulaci maximálního provozu ve stejném časovém rozmezí, bylo využito čtyř intervalů (600 s, 300 s, 180 s, 90 s) a vytvořeno 866 jízd vlaku v daném období. Denní proběh vlakových souprav se v daném časovém období dostal na hodnotu 6799 kilometrů. Simulace zároveň potvrdila, že bude docházet k řádnému plnění GVD, a to i po připočtení střední hodnoty zpoždění v intervalu 90 s. Toto průměrné zpoždění bude možno eliminovat možností rychlejšího obratu v konečných stanicích, případně doplněním provozu záložní soupravou ze stanice Nové Dvory. S příliš zpožděnými soupravami bude následně operativně manipulováno pro zajištění bezpečného provozu na trati, nebo doplnění pozice záložní soupravy. Tyto kroky vedou k narušení GOS, a tak i plynulého provozu na trase D. Všechny tyto varianty narušení je potom možno v provedených simulacích provádět a pozorovat jejich dopady.

ZÁVĚR

Tato práce se v první kapitole zaměřila na obsáhlou historii zatím stále nevybudované trasy D, na jejímž budování se v polovině roku 2019 konečně začalo prvními výkopovými pracemi. Dále byla provedena analýza současného urbanistického stavu dotčené oblasti navrhovaného trasování linky metra D, a to včetně možností návazností veřejné osobní dopravy na takto nově vzniklý páteří systém. Analýzou bylo zjištěno, že množství obyvatel žijící v této oblasti si zaslouží zkvalitnění přepravních služeb a zkrácení jízdních dob směrem do centra. Při pohledu na současný stav dopravní infrastruktury a současného množství poptávky po dopravě dochází k velmi častým kongescím. Pro autobusy především v ranní špičce směrem do centra a v odpolední špičce obousměrně.

V druhé kapitole byly prozkoumány základní prvky a funkce v odvětví automatizovaného provozu, kde je potřeba v řádně rozlišovat jednotlivé stupně automatizace. Pro jednotlivé stupně automatizace je pak zapotřebí vývoje jednotlivých systémů zabezpečovacích zařízení. Téma vývoje bylo obecně shrnuto z hlediska vývojářských firem. V poslední části této kapitoly jsem se zaměřil na plně automatizovaný provoz pod hlavičkou CBTC a na to, jak tento zabezpečovací systém pracuje v reálném provozu. Je vhodné mít na paměti, že plně automatizovaný provoz je jednou z nejbezpečnějších forem provozu a bude i nadále rozšiřován do všech systémů segregovaných drah.

Kapitola provozního konceptu byla stručně zaměřena na problematiku a územní položení navrhované linky D a zhodnotila původní koncepční návrhy provozu linky. Byly zjištěny základní informace pro simulační model v SW Opentrack a spočítané jízdní doby. Následně byly zadána potřebná data o infrastruktuře, vozidlech, jízdním řádu a ZZ pro správný chod SW. V závěru kapitoly byl vybrán provozní koncept, který by měl být pro rozvoj sítě metra nejoptimálnější z dlouhodobého hlediska.

Závěrečná kapitola už se věnuje pouze problematice simulace ve dvou úrovních provozu, které jsou i na takto krátkém úseku zcela možné. Pro porovnání byl graficky znázorněn poměr nabídky a poptávky na trase C s možnou nabídkou přepravy, která vznikne na nové trase D.

Na závěr by autor rád upozornil, že první z navrhovaných úseku I.D nemá přímou vazbu s centrem města, tudíž dopravě v centru města prakticky vůbec neulehčí. Trasa D bude nést své opodstatnění (ulevení přetíženému systému MHD v Praze) až po dokončení výstavby úseku mezi stanicemi Pankrác a Náměstí Míru. Největší úlevu systému MHD přinese trasa D až s dokončením zatím posledního navrhovaného úseku z Náměstí Míru přes Hlavní

nádraží na Náměstí republiky. Dokončení posledního navrhovaného úseku je v současné době v nedohlednu. Úsek zkoumaný v této diplomové práci by měl být dokončen v roce 2028.

SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

1. FOJTÍK, P. *30 let pražského metra*. 2. vydání. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, 2004. ISBN 80-239-2704-3.
2. *Metroweb.cz* [online]. [cit. 2019-09-05]
Dostupné z <http://www.metroweb.cz>
3. *Trasa D metra v Praze* [online]. [cit. 2019-11-22]
Dostupné z https://www.iprpraha.cz/uploads/assets/dokumenty/infr/textova_cast_2016_04_26_m.pdf
4. *Sociodemografická studie* [online]. [cit. 2019-11-29]
Dostupné z http://www.praha12.cz/assets/File.ashx?id_org=80112&id_dokumenty=45977&fbclid=IwAR3OrmDcwP4WC6LeTNbOe6cMAQ6867uiXBrT8SeJlpTHcdJj4BmoCTt3VFY
5. *Trasa D pražského metra* [online]. [cit. 2019-12-03]
Dostupné z http://strategieprojekty.dpp.cz/images/MetroD_2011_12.pdf
6. ČSN EN 62290–1. *Drážní zařízení - Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou - Část 1: Systémové principy a základní pojmy*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
7. ČSN EN 62290–2. *Drážní zařízení - Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou - Část 2: Specifikace funkčních požadavků*. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
8. *Railsystem* [online]. [cit. 2019-12-09] Dostupné z <http://www.railsystem.net/communications-based-train-control-cbtc/>
9. *Statistics Brief Metro automation final*. [online]. [cit. 2020-12-09]
Dostupné z https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/Statistics-Brief-Metro-automation_final_web03.pdf
10. *Communications-based train control (CBTC)*. [online]. [cit. 2020-12-09]
Dostupné z <https://rail.bombardier.com/en/solutions-and-technologies/signalling-and-infrastructure/communications-based-train-control.html>
11. *Train control / CBTC*. [online]. [cit. 2020-12-09]
Dostupné z https://www.thalesgroup.com/en/train-control-cbtc?fbclid=IwAR2WjESkrkNZAAUyCaD9cB13uOk_ogSsjLj8aV5U5w9KuzT9GW8uuOmadfo

12. *Trainguard MT CBTC*. [online]. [cit. 2020-12-09]
Dostupné z <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ab68c904-08fd-416c-8e28-60a18f8012af/smocbtctrainguardmten.pdf>
13. *Urban signalling: Urbalis CBTC range*. [online]. [cit. 2020-12-09]
Dostupné z <https://www.alstom.com/our-solutions/signalling/urbalis-cbtc-range-future-signalling-systems>
14. HUERLIMANN, D. a A. B. NASH. *Opentrack. Simulation of Railway Networks. Version 1.3*.
15. Tabulka garantovaných parametrů soupravy M1.
16. CHEN, R. a J. GUO. *Development of the new CBTC system simulation and performance analysis* [online]. [cit. 2019-11-28] Dostupné z <https://www.witpress.com/elibRARY/wit-transactionS-on-the-built-environment/114/21448>.
17. Komplexní přepravní průzkum metra 2015. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, a. s. a ROPID, CHAPS spol. s. r. o., listopad 2015.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Grafikon oběhu souprav konvenčního provozu

Příloha B – Grafikon oběhu souprav maximálního provozu

Příloha C – Grafikon vlakové dopravy konvenčního provozu

Příloha D – Grafikon vlakové dopravy maximálního provozu

Příloha E – Struktura infrastruktury