

UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

BC. ERIK TISCHER

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Simulace automatického provozu na trase metra B

Bc. Erik Tischer

Diplomová práce

2017

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Erik Tischer**  
Osobní číslo: **D15446**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Technologie a řízení dopravy**  
Název tématu: **Simulace automatického provozu na trase metra B**  
Zadávající katedra: **Katedra technologie a řízení dopravy**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Úvod

1. Automatické provozy metra ve světě
2. Zabezpečovací systémy pro automatický provoz metra
3. SW OpenTrack
4. Parametry vozidel a tratí
5. Návrhy a simulace provozních konceptů

Závěr

Rozsah grafických prací: 4 - 5  
Rozsah pracovní zprávy: 40 - 50  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná  
Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN 62267. Drážní zařízení - Automatizovaná městská doprava s vyhrazenou vodící dráhou (AUGT) - Bezpečnostní požadavky. 1. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
2. ČSN EN 62290 - 1. Drážní zařízení - Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou - Část 1: Systémové principy a základní pojmy. 2. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
3. ČSN EN 62290 - 2. Drážní zařízení - Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou - Část 2: Specifikace funkčních požadavků. 2. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
4. FOJTÍK, Pavel. 30 let pražského metra. 2., rozš. vyd. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, 2004. ISBN 80-239-2704-3.

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

Datum zadání diplomové práce: 1. února 2017  
Termín odevzdání diplomové práce: 26. května 2017

  
doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.  
děkan

L.S.

  
doc. Ing. Jaromír Široký, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 3. února 2017

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., autorský zákon, 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. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 26. 5. 2017

Erik Tischer

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Nachtigallovi Ph. D. za vzorné vedení práce, za cenné připomínky a za morální a odbornou podporu při zpracovávání této diplomové práce.

## **ANOTACE**

Diplomová práce se věnuje problematice automatického provozu metra na trase pražského metra B. V práci jsou analyzovány možnosti a specifika automatické provozu, včetně konkrétních příkladů použití této technologie na sítích metra ve světě. Práce se také věnuje použitým zabezpečovacím systémům s důrazem na systém CBTC. V práci je využito simulačního modelování v softwaru OpenTrack, pomocí kterého jsou prověřeny možnosti automatického provozu na trase B.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

metro, automatizace, simulace, CBTC

## **TITLE**

Simulation of automatic operation on metro line B

## **ANNOTATION**

The diploma thesis deals with automated operation of metro on the Prague metro line B. The thesis analyzes the possibilities and specifics of automated operation, including particular examples of the use of this technology on metro networks in the world. The thesis focuses on applied interlocking systems with an emphasis on the CBTC system. Simulation modeling in the OpenTrack software, which examines the possibilities of automatic operation on route B, is used in the thesis.

## **KEYWORDS**

metro, automation, simulation, CBTC

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
SEZNAM ZKRATEK .....	11
ÚVOD .....	13
1 AUTOMATICKÝ PROVOZ METRA .....	14
1.1 Stupně automatizace.....	14
1.2 Obecná organizace provozu .....	16
1.2.1 Základní provozní pravidla.....	16
1.2.2 Zásady zajištění bezpečného pohybu všech vlaků v síti .....	17
1.3 Funkce a bezpečnostní požadavky pro automatický provoz metra.....	18
1.3.1 Funkce pro provoz vlaku .....	18
1.3.2 Funkce pro řízení a dohled nad provozem .....	20
1.4 Interoperabilita systému .....	21
1.5 Možnosti zavedení automatického provozu na trase B.....	22
2 AUTOMATICKÉ PROVOZY METRA VE SVĚTĚ.....	25
2.1 Automatické metro v Barceloně.....	26
2.2 Automatické metro v Budapešti.....	27
2.3 Automatické metro v Paříži .....	27
2.4 Automatické metro v Římě .....	28
2.5 Automatické metro Kodani .....	28
2.6 Automatické metro v Lyonu .....	29
2.7 Automatické metro v Miláně .....	30
2.8 Automatické metro v Norimberku .....	30
2.9 Automatické metro v Turíně .....	31
2.10 Systém VAL v Lille .....	31
2.11 Shrnutí automatických provozů metra .....	31
3 ZABEZPEČOVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO AUTOMATICKÉ METRO .....	33



3.1	Mezinárodní standardy pro systém CBTC .....	35
3.2	Základní komponenty komunikačního rozhraní CBTC .....	36
3.3	Typy zabezpečovacího zařízení CBTC .....	37
4	PARAMETRY VOZIDEL A TRATI .....	40
4.1	Trat' a stanice metra B .....	40
4.2	Souprava 81 – 71 M .....	44
4.3	Souprava M1 .....	48
4.4	Zabezpečovací zařízení na trase B .....	52
5	SIMULACE PROVOZNÍCH KONCEPTŮ .....	56
5.1	Software OpenTrack .....	56
5.2	Postup vytvoření simulačního modelu v softwaru OpenTrack .....	56
5.3	Ověřovací provozní koncept .....	59
5.3.1	Úprava modelu pro simulaci konvenčního provozu se zabezpečovacím zařízením ARS a možnosti konvenčního provozu .....	60
5.3.2	Analýza současného jízdního řádu .....	63
5.3.3	Simulace ověřovacího provozního konceptu.....	63
5.4	Automatický provoz.....	66
5.4.1	Úprava simulačního modelu pro automatický provoz a možnosti automatického provozu .....	66
5.4.2	Nultá varianta .....	71
5.4.3	Maximální varianta.....	73
5.4.4	Pásmový provoz .....	74
5.4.5	Směšený provoz .....	75
5.5	Shrnutí výsledků simulace .....	77
ZÁVĚR	.....	78
SEZNAM CITACÍ.....		79
SEZNAM PŘÍLOH.....		87

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma organizace provozu .....	16
Obrázek 2 Podíl délky tratí automatického metra ve světě .....	25
Obrázek 3 Délky linek podle kapacity souprav .....	26
Obrázek 4 Podíl výrobců CBTC podle délky linek .....	33
Obrázek 5 Schéma určení bezpečného rozestupu vlaků .....	34
Obrázek 6 Schéma linky B .....	40
Obrázek 7 Kolejové schéma stanice Zličín.....	42
Obrázek 8 Kolejové schéma stanice Nové Butovice .....	42
Obrázek 9 Kolejové schéma stanice Smíchovské nádraží.....	42
Obrázek 10 Kolejové schéma stanice Florenc B .....	43
Obrázek 11 Kolejové schéma stanice Českomoravská.....	43
Obrázek 12 Kolejové schéma stanice Černý Most .....	44
Obrázek 13 Řazení soupravy 81 - 71M .....	44
Obrázek 14 Řazení soupravy M1 .....	49
Obrázek 15 Lokomotivní návěstidlo ARS.....	54
Obrázek 16 Model stanice Černý Most obrat .....	58
Obrázek 17 Schéma mezistaničního úseku Luka – Lužiny .....	61
Obrázek 18 Příklad kódovací tabulky.....	61
Obrázek 19 Diagram obsazení prostorových oddílů (konvenční provoz) .....	62
Obrázek 20 Brzdné křivky .....	68
Obrázek 21 Upravený model bezpečného rozestupu vlaků.....	68
Obrázek 22 Diagram porovnání obsazování prostorových oddílů (pohyblivý/pevný blok) ....	69

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Výhody a nevýhody přechodu na automatický provoz .....	23
Tabulka 2 Jízdní doby a délky mezistaničních úseků.....	41
Tabulka 3 Základní parametry soupravy 81 - 71M .....	45
Tabulka 4 Hodnoty garantované trakční síly a zrychlení (81 – 71M) .....	46
Tabulka 5 Hodnoty garantované brzdné síly a zrychlení (81 – 71M) .....	47
Tabulka 6 Základní parametry soupravy M1 .....	49
Tabulka 7 Hodnoty garantované trakční síly a zrychlení (M1) .....	50
Tabulka 8 Hodnoty zrychlení pro provozní brzdu soupravy M1.....	51
Tabulka 9 Generování kmitočtů na základě požadované rychlosti .....	53
Tabulka 10 Význam vysílaných kmitočtů a návěsti lokomotivního návěstidla .....	55
Tabulka 11 Intervaly používané na trase B .....	63
Tabulka 12 Hodnoty zpoždění v jednotlivých stanicích.....	65
Tabulka 13 Vypočtené bezpečnostní vzdálenosti .....	69

## **SEZNAM ZKRATEK**

AN – Anděl

ARS – Avtomatičeskoje regulirovanie skorosti

ATO – Automatic Train Operation

ATP – Automatic Train Protection

ATS – Automatic Train Supervision

AUGT – Automated Urban Guided Transport

CBTC – Comunication Based Train Control

CE – Českomoravská

CEO – Českomoravská obrat

CM – Černý Most

CMO – Černý Most obrat

ČSN – Česká technická norma

DTO – Driverless Train Operation

ETCS – European Train Control System

FRB – Florenc B

FRBC – Florenc spojka B – C

GALS – Generátor automatické lokomotivní signalizace

GoA – Grade of automation

HL – Hloubětín

HMI – Human – Machine Interface

HU – Hůrka

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEC – International Electrotechnical Comission

IN - Invalidovna

Jl – Jinonice

KL - Kolbenova

KN – Karlovo náměstí  
KR - Křižíkova  
LK – Luka  
LZ – Lužiny  
MA – Movement Authority  
MSB – Můstek B  
MTR – Mass Transit Railway  
NA – Národní třída  
NB – Nové Butovice  
NBO – Nové Butovice obrat  
NR – Náměstí republiky  
OCC – Operations Control Centre  
PA – Palmovka  
RD – Radlická  
RZ – Rajská zahrada  
SD – Stodůlky  
SN – Smíchovské nádraží  
SNO – Smíchovské nádraží obrat  
SW - Software  
TMB – Transport Metropolitan de Barcelona  
UGTMS – Urban Guided Transport Management and Control System  
UTO – Unattended Train Operation  
VAL – Véhicule Automatique Léger  
VS – Vysočanská  
ZL – Zličín  
ZLO – Zličín obrat  
ZZ – Zabezpečovací zařízení

# ÚVOD

Automatizace dopravy, především metra a dalších městských a příměstských drah je v posledních dvou dekáдах celosvětovým trendem. Automatizace hraje nezastupitelnou roli ve zkvalitňování služeb, v úspoře provozního personálu a také ve spolehlivosti systémů. Automatické metro se v současné době stává novým standardem v systémech městské kolejové dopravy. Většina automatických linek metra vzniká jako novostavby, přesto ve světě existují automatické linky, které vznikly modernizací původních konvenčních provozů. Možnost modernizace linky pražského metra B, která je v současné době provozována konvenčním způsobem, je hlavním předmětem této práce.

Práce vychází z platných specifikací a technických norem pro automatický provoz, které jsou v práci komplexně zhodnoceny. Zmíněné specifikace a normy se věnují především zabezpečení a technologii provozu. Pro zabezpečení provozu se na 68 % z celkové délky tratí automatického metra používá zabezpečovací zařízení CBTC. Toto zabezpečovací zařízení představuje komplexní systém pro zabezpečení a provozování automatických linek městských a příměstských drah.

V práci je popsán simulační nástroj OpenTrack, pomocí kterého byl sestaven simulační model pro ověření možností automatického provozu. V softwaru OpenTrack byly vytvořeny celkem tři provozní koncepty pro zcela automatický provoz a jeden provozní koncept pro zjištění vlastností smíšeného provozu.

**Cílem práce je komplexní analýza a zhodnocení automatického provozu metra a ověření možnosti zavedení automatického provozu na trase B s využitím simulačního softwaru OpenTrack.**

# 1 AUTOMATICKÝ PROVOZ METRA

Tato kapitola se zabývá definováním automatického provozu metra, začleňováním do jednotlivých stupňů automatizace a specifikacemi funkcí pro automatický provoz metra. Automatický provoz je definován jako systém provozu vlaků s vlastním pohonem po vyhrazené vodící dráze bez strojvedoucího nebo zcela bezobslužně. Provoz vlaků bez strojvedoucího (*Driverless Train Operation (DTO)*) je takový druh provozu, při kterém jsou ve vlaku přítomní zaměstnanci, kteří nejsou zodpovědní 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 (*Unattended Train Operation (UTO)*) je takový druh provozu, při kterém není ve vlaku přítomen žádný personál a za všechny požadované funkce zodpovídá technické zařízení (1, s. 11 – 12).

## 1.1 Stupně automatizace

V systémech městských drah se rozlišuje celkem pět stupňů automatizace (*Grade of Automation (GoA)*). Jednotlivé stupně přesně definují, které základní funkce plní provozní personál a které systém řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou (*Urban Guided Transport Management and Control System (UGTMS)*). Tabulkové vyjádření základních funkcí pro jednotlivé stupně automatizace je uvedeno v příloze A. 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 dopravce (2, s. 18 – 19). Systémy se stupněm automatizace GoA0 – GoA2 se z hlediska členění v této práci považují za konvenční systémy provozu a stupně GoA3 – GoA4 se považují za automatické systémy provozu.

### ***Provoz vlaku podle rozhledu – GoA0***

Při řízení vlaku podle rozhledu má strojvedoucí plnou odpovědnost za bezpečnou jízdu vlaku. Strojvedoucí není kontrolován žádným technickým zařízením. Za bezpečnost a plynulost provozování dráhy a drážní dopravy odpovídá provozní personál. U tohoto stupně automatizace provozu může být zřízeno vlakové, staniční a traťové zabezpečovací zařízení (ZZ), ale není to podmínkou (2, s. 19 – 20).

### ***Neautomatizovaný provoz vlaku – GoA1***

Při neautomatizovaném provozu vlaku je strojvedoucí v přední části vozidla a sleduje trať před vlakem. Zrychlování a brzdění vlaku provádí strojvedoucí, který řídí vlak podle návěstí viditelných návěstidel, případně podle návěstí předávaných na stanoviště

strojvedoucího. Strojvedoucí vede vlak pod dohledem vlakového zabezpečovače. Tento vlakový zabezpečovač může být bodový, liniový nebo semi – liniový a provádí dohled v rozsahu své specifikace. Jedná se o dohled v oblasti kontroly bdělosti, kontroly rychlosti vlaku a kontroly dodržování návěstí. Za bezpečný odjezd vlaku ze stanice v tomto případě odpovídá v plném rozsahu provozní personál a to včetně zavírání dveří vlaku (2, s. 19 – 20).

#### ***Poloautomatizovaný provoz vlaku – GoA2***

Při poloautomatizovaném provozu vykonává strojvedoucí pouze dohled nad bezpečnou jízdou vlaku. Strojvedoucí sleduje trať před sebou a může vlak zastavit v případě hrozícího nebezpečí. Zrychlování a brzdění je prováděno automatizovaně, stejně jako dohled nad povolenou rychlostí vlaku. Za bezpečný odjezd vlaku ze stanice je odpovědný provozní personál. Za bezpečné zavírání dveří může být odpovědný provozní personál nebo probíhá automatizovaně. (2, s. 19 – 20).

#### ***Provoz vlaku bez strojvedoucího – GoA3***

U tohoto stupně automatizace není v přední části vlaku přítomen žádný zaměstnanec, který by pohledem kontroloval trať a v případě nebezpečí vlak zastavil. Bezpečná 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 závislosti 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 však zejména odpovědný za řešení nouzových situací při mimořádnostech a případných poruchách systému (2, s. 19 – 20).

#### ***Bezobslužný provoz vlaku – GoA4***

U tohoto stupně automatizace jsou na rozdíl od stupně GoA3 vyžadována další opatření, protože ve vlaku není přítomen žádný provozní personál. Celý systém musí být proto vybaven bezpečnou detekční funkcí pro ohlášení nebezpečných podmínek a nouzových situacích. Při vzniku nebezpečné situace, která vyžaduje zásah provozního personálu, musí být tento personál automaticky informován a následně učinit opatření k nápravě tohoto stavu (2, s. 19-20).

#### ***Postupné zavádění jednotlivých stupňů automatizace***

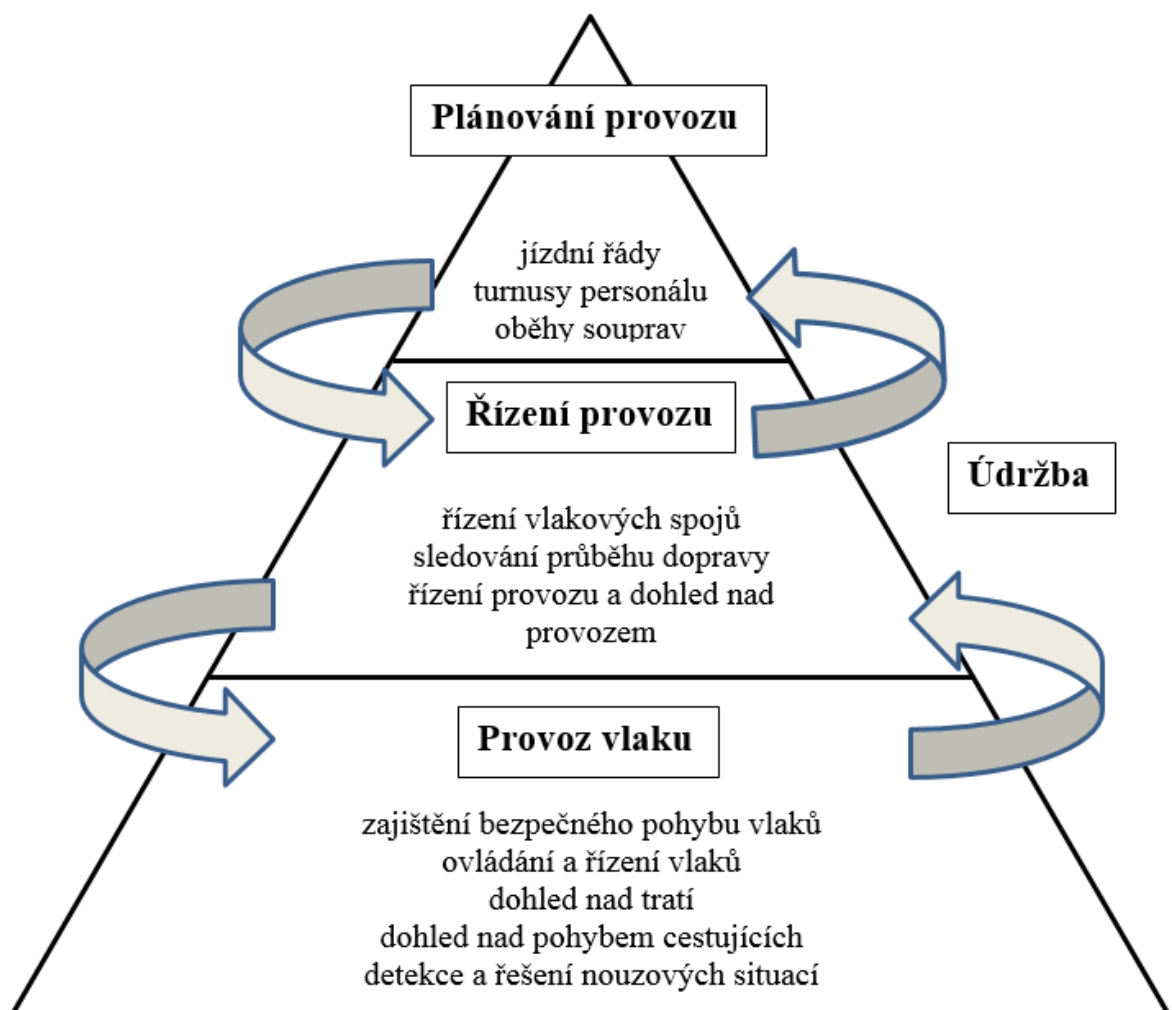
Z hlediska vybavení tratě není nutné, aby všechny její části byly vybaveny zařízením, která mají shodný stupeň automatizace. Rozsah zabezpečení však musí být vždy na nejvyšším možném stupni z pohledu vzájemného vybavení tratí a vozidel. Zařízení s rozdílným stupněm



automatizace, která jsou použita v rámci jednoho systému, musí být vzájemně zcela kompatibilní (2, s. 20).

## 1.2 Obecná organizace provozu

Pro provoz městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou, tedy i metra obecně platí základní hierarchie. Tato hierarchie určuje jednotlivé stupně organizace provozu a je znázorněna na obrázku 1. Na jednotlivé části systému jsou specifikovány volitelné a povinné 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)*). Funkce OCC z hlediska bezpečnosti jsou uvedeny v příloze B.



Obrázek 1 Schéma organizace provozu

Zdroj: (3, s. 10), autor

### 1.2.1 Základní provozní pravidla

Pro automatizovaný provoz je nezbytné mít přesně definovanou oblast spadající do řízení UGTMS. Na hranicích této oblasti nebo přímo v oblasti musí mít zařízení možnost kontroly vlakového zařízení tak, aby před začátkem provozu vlaku byla dostupná informace

o bezchybném fungování vlakové části zařízení. Toto testování musí být realizováno tak, aby nebylo nutné zastavení vlaku při vjezdu nebo výjezdu z oblasti. V oblasti řízené UGTMS už musí být dostupné všechny funkce v závislosti na daném stupni automatizace. Jízdy vlaků nevybavených vlakovou částí zařízení jsou provozovány náhradním způsobem a řídí se vnitřními předpisy provozovatele dráhy (3, s. 10 – 11).

### **1.2.2 Zásady zajištění bezpečného pohybu všech vlaků v síti**

Pro systémy UGTMS je přípustné automatické i manuální stavění jízdních cest. Jízdní cesty se staví s ohledem na trasování vlaků nebo provozní potřeby. Aby byla zajištěna bezpečná jízdní cesta, musí být povolení k pohybu vlaku vydáno až po postavení jízdní cesty a provedení závěru jízdní cesty. K rušení závěru jízdní cesty dochází samočinně nebo ručně po zjištění, že celý vlak opustil rozhodné prvky postavené jízdní cesty (3, s. 11).

Dalším důležitým prvkem bezpečnosti pro zajištění bezpečného pohybu vlaků jsou návrhové a provozní hodnoty intervalů následných vlaků, které určuje provozovatel dráhy. Návrhový interval je ovlivněn směrovým a výškovým uspořádáním stanic a tratí, dobou pobytů, trakční charakteristikou vlaků, uspořádáním obrátových stanic a reakční dobou strojvedoucího (u stupňů automatizace GoA0 – GoA2). UGTMS potom zajišťuje bezpečný pohyb vlaků v síti ve stanoveném intervalu. Bezpečné rozestupy vlaků mohou být zajištěny pevnými nebo pohyblivými prostorovými oddíly. Pro každý následný vlak je na základě pozice konce předcházejícího vlaku stanovena absolutní hranice povolení k pohybu (3, s. 11).

Zařízení na všech stupních automatizace kontrolují dodržení bezpečné rychlosti. Hranice bezpečné rychlosti se stanovují pomocí statického a dynamického rychlostního profilu. Statický rychlostní profil tvoří maximální rychlost a hranice povolení k pohybu. Dynamický rychlostní profil je vypočten na základě statického rychlostního profilu a modelu bezpečného brzdění. Model bezpečného brzdění musí zohledňovat veličiny, jako jsou nepřesnost zjištění polohy, délka vlaku, odchylku měření rychlosti, reakční dobu a dobu reakce nouzové brzdy. Vlak pohybující se v řízené oblasti nesmí překročit stanovený dynamický rychlostní profil, čímž je zabezpečeno, že vlak nepřekročí stanovenou hranici povolení k pohybu (3, s. 12).

V oblasti řízené UGTMS lze provozovat i vlak, který není vybaven, popřípadě má nefunkční vlakovou část systému. V omezeném režimu však UGTMS musí zajistit bezpečnost provozu při co nejmenší závislosti na lidském činiteli a dodržování dopravních předpisů (3, s. 12).

### **1.3 Funkce a bezpečnostní požadavky pro automatický provoz metra**

Tato kapitola je souhrnem klíčových funkcí a bezpečnostních požadavků pro automatický provoz vlaků na stupních GoA3 a GoA4, kde odpovědnost za bezpečnou jízdu vlaku přechází z provozního personálu na systém UGTMS.

#### **1.3.1 Funkce pro provoz vlaku**

V této kapitole jsou popsány funkce, které se vztahují k provozu vlaku a jeho bezpečnému pohybu po síti provozované v automatickém režimu.

##### ***Zajištění bezpečné jízdy vlaku***

Základním předpokladem pro bezpečný pohyb vlaku je postavení a zabezpečení požadované jízdni cesty. Musí být proveden její závěr a následně vydáno povolení k pohybu vlaku. Důležitým specifikem, z hlediska provozování vlaku je především nutnost automatického zjištění polohy vlaku při jeho vstupu do oblasti nebo při jeho aktivaci na provozované síti. Dále musí být známa orientace vlaku, poloha čela a konce vlaku. Pokud nejsou tyto informace k dispozici z důvodu poruchy systému, musí dojít k zastavení provozu na dotčeném úseku nouzovým zabrzděním ohrožených vlaků. Systém v těchto případech automaticky vytváří ochranný úsek, do kterého nesmí být vpuštěn žádný vlak. Vlak může být lokalizován i pomocí záložního systému (pokud je zřízen), v tomto případě se jízda organizuje v pevných prostorových oddílech, kdy pro zajištění volnosti oddílu musí být splněna úplná bloková podmínka. Pokud není dostupná žádná funkce UGTMS, ani nelze jiným technickým zařízením zajistit volnost a správné postavení jízdni cesty, musí být provoz organizován podle dopravních předpisů provozovatele dráhy. Systém musí být dále schopen rozpoznat nedovolenou jízdu vlaku (např. ujetí vlaku). V případě jakékoliv takové události musí být systémem neprodleně spuštěna nouzová brzda dotčeného vlaku (3, s. 13 – 24).

##### ***Řízení vlaku***

Automatické vlaky jsou řízeny pomocí jízdniho rychlostního profilu. Tento profil je vytvořen s ohledem na kulturu cestování a energetickou zátěž, vždy však platí, že musí být přizpůsoben dynamickému rychlostnímu profilu. Jízdni rychlostní profil dále vychází z dat o infrastruktuře, o parametrech vozidel a kritických provozních parametrech. Kritické provozní parametry se vztahují k pobytu vlaku ve stanicích a na manipulačních kolejích. Jízdni profil se musí automaticky měnit při změně vstupních parametrů výpočtu (3, s. 24 – 26).

Pro každý vlak musí být vytvořena trasa vlaku, která obsahuje i všechny údaje o zastavení. Tato trasa se však může operativně měnit a jízdni profil se tomu musí přizpůsobit.

Vlak musí zastavit ve všech určených stanicích a musí být zřízena možnost jeho zadržení ve stanici na základě pokynu personálu OCC (3, s. 26 – 27).

### ***Dohled nad vodící dráhou***

Zařízení na trati nebo na vozidlech musí zajistit, aby nemohlo dojít ke střetu vlaku s překážkami, tj. s předměty nebo s osobami v průjezdném průřezu. Pokud zařízení zaznamená překážku v průjezdném průřezu, musí být v okolí této překážky vytvořen ochranný úsek. Dále je tuto informaci nutné zobrazit v OCC. Takový ochranný úsek lze zrušit pouze bezpečným povelům personálu po zjištění, že trať je volná. Zároveň, pokud vlakové zařízení zjistí výskyt překážky, musí být vlak automaticky zastaven a může být uveden do pohybu až po bezpečném pokynu obsluhy z OCC (3, s. 27 – 28).

Jestliže je systém vybaven prvky s žádostí o nouzové zastavení vlaku cestujícími nebo provozním personálem, musí být stanice vybaveny zařízením pro aktivaci nouzového zastavení. Kromě zastavení vlaku rovněž dojde k vytvoření ochranného úseku do doby jeho bezpečného zrušení personálem OCC (B, s. 28 – 31). Dohled nad nástupištními kolejemi může být proveden pomocí čidel, která detekují překážku v kolejišti. Ve většině případů se však u systémů automatizované městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou (*Automated Urban Guided Transport* (AUGT)) používají nástupištní stěny. V takovém případě musí být pro bezpečný vjezd vlaku do stanice kontrolováno uzavření a zajištění těchto dveří. Pokud dojde k narušení systému a neautorizovanému otevření dveří (včetně dveří, které nejsou určeny pro cestující), musí dojít k zastavení vlaku vjíždějícího do oblasti a k vytvoření ochranného úseku, který může být zrušen pouze bezpečným povelům z OCC (3, s. 33 – 37).

Pokud probíhá údržba infrastruktury, popřípadě jiné práce v provozované koleji, musí systém umožňovat vytvoření tzv. bezpečného pracovního úseku. Tento pracovní úsek se do systému vkládá manuálně prostřednictvím pracovníka OCC, který je také oprávněn, po uvolnění kolejiště, tento pracovní úsek zrušit. Vjezd vlaku do pracovního úseku může být povolen pouze bezpečným povelům z OCC a to pro každý případ zvlášť (3, s. 31).

### ***Dohled nad pohybem cestujících***

Požadavek na dohled nad pohybem cestujících musí být splněn minimálně při nástupu a výstupu cestujících, kde zároveň hrozí největší riziko ohrožení bezpečnosti. Pro bezpečný výstup a nástup cestujících je nutné splnění bezpečnostních podmínek. Základní podmínkou je zajištění bezpečného zastavení a zajištění vlaku proti pohybu na určeném místě. Dále musí být otevřeny dveře pouze na správné straně vlaku. Pokud je systém vybaven nástupištními dveřmi, musí být zaručeno, že se tyto dveře otevřou až po bezpečném zastavení a zajištění vlaku. Jestliže

je délka vlaku menší než délka nástupiště, musí být otevřeny pouze ty dveře, které umožňují nástup do vozidla. K zavírání dveří dochází podle stanového jízdního řádu nebo podle minimální stanovené délky pobytu ve stanici. Pokud nastane čas odjezdu, systém vydá požadavek na zavření dveří. Toto zavírání dveří může být volitelně doplněno akustickou nebo optickou signalizací. Zavírání dveří vlaku a nástupištních dveří, musí být synchronizováno tak, aby byl všem cestujícím umožněn bezpečný nástup a výstup z vozidla. Pokud je zabezpečení realizováno pomocí detekčních prvků, nesmí být indikováno vniknutí osoby do bezpečného pásma (3, s. 31 – 34).

Pokud jsou dveře uzavřeny a není žádný požadavek, který by nedovolil odjezd vlaku, může vlak ze stanice odjet v čase daném jízdním řádem. U stupně automatizace GoA3 může povel k odjezdu vydat přímo provozní pracovník, u stupně GoA4 je pokyn odjezdu vlaku vydáván automaticky (B, s. 34 – 35).

### **1.3.2 Funkce pro řízení a dohled nad provozem**

Tato kapitola popisuje funkce systému, které jsou nezbytné pro bezpečné a plynulé provozování dráhy a drážní dopravy v automatickém režimu. Pro řízení provozu je nezbytné zajistit komplexní přehled personálu v OCC nad všemi rozhodnými funkcemi systému.

#### ***Řízení vlakových spojů***

Systémy UGTMS, v závislosti na stupni automatizace, požadují funkce pro řízení jednotlivých vlakových spojů tak, aby byla splněna uvažovaná přepravní poptávka. Systém musí být vytvořen tak, aby minimalizoval odchylky od běžného provozu, a to i v případě provozních mimořádností. Pro stupně GoA3 a GoA4 je nutná implementace funkce systémového vytváření tras vlaků v souladu s jízdním řádem a správné přiřazení trasy konkrétnímu spoji v závislosti na jeho dispozicích. Konkrétní přiřazení spoje k trase může být provedeno pomocí ručního zadání z OCC nebo automaticky. Každý vlak s přiřazenou trasou musí mít jedinečné identifikační číslo. Systém musí umožňovat ruční úpravu všech parametrů trasy v případě nutnosti (3, s. 44 – 46).

Každá trasa se skládá z množiny jízdních cest. Tyto jízdní cesty jsou pro automatický provoz stavěny zcela automaticky. Obsluha v OCC však musí mít vždy možnost postavit jízdní cestu ručně. Jízdní cesta musí být postavena v dostatečném časovém předstihu, aby nedošlo k narušení trasy vlaku a případným zpožděním. Postavení jízdní cesty je systémem vyvoláno na základě údajů, jež jsou obsaženy v trase vlaku. Systém musí vnitřní logikou bránit postavení takové cesty, při které by došlo k vzájemnému blokování vlaků. V případě nedostupnosti vybrané jízdní cesty musí být jízda vlaku řešena jeho odklonem (3, s. 46 – 47).

### ***Dohled nad provozováním drážní dopravy***

System musí umožňovat nepřetržitý dohled nad všemi vlaky v provozované oblasti a musí být schopen předávat informace obsluhujícímu personálu. Základní informací jsou informace o poloze komunikujících vlaků. Při použití náhradního systému řízení pomocí traťových oddílů musí systém informovat o jejich obsazení nekomunikujícím vlakem. UGTMS musí vést automatickou dopravní dokumentaci o průběhu řízení drážní dopravy. Všechna vlaková a traťová zabezpečovací zařízení, jejichž funkce má vliv na bezpečnost a plynulost provozování drážní dopravy musí být pod dohledem systému a musí být detekován jejich okamžitý stav. Informace o poruchách a mimořádnostech musí být přednostně předána provoznímu personálu pomocí definovaného rozhraní člověk – stroj (*Human – Machine Interface* (HMI)). Při předávání informací musí být jednoznačně stanovena důležitost informace tak, aby byla přednostně zobrazena informace s vyšší závažností (3, s. 49 – 50).

### ***Funkce pro rozhraní HMI***

System musí zajišťovat bezpečnou komunikaci mezi provozem v řízené oblasti a OCC. Personál v OCC musí mít přehled nad stavem všech prvků zapojených do systému UGTMS, které přímo souvisí s bezpečností a plynulostí provozu. Z tohoto přehledu mohou být vynechány pouze funkce související s údržbou systému, jejichž činnost je kontrolována na místní úrovni. System musí být schopen bezpečně zpracovat a předat všechny povely vydané řídicím personálem z OCC (3, s. 51 – 52).

### ***Informační systémy pro cestující a dohled nad cestujícími***

System UGTMS může být vybaven hlasovým nebo audiovizuálním informačním systémem. Z hlediska bezpečnosti cestujících musí být zařízení schopné zprostředkovat hlasový hovor mezi cestujícími a personálem OCC pomocí nouzových komunikačních zařízení (ve vlaku, na nástupišti). Pokud je UGTMS propojeno s vnějším systémem monitorování cestujících, musí být tento systém vybaven tak, aby v případě detekce nebezpečné situace zobrazil v OCC záběr z kamer umístěných v dotčeném místě (3, s. 52 – 53).

## **1.4 Interoperabilita systému**

Interoperabilita v rámci daného stupně automatizace musí umožňovat bezproblémové a bezpečné fungování vlakových i traťových zařízení bez ohledu na jejich výrobce. To znamená, že vlaky dodané jedním dodavatelem mohou být provozovány na trati vybavené zařízeními jiného dodavatele. V rámci některých dopravních systémů dochází také ke vzájemnému spojování vlaků, které musí být rovněž bezproblémové a to i za předpokladu,

že vozidla byla dodána různými výrobci. Pokud je trať vybavena zařízením od několika dodavatelů, musí být možné ovládat jí z jediného OCC. Sousední traťové úseky vybavené různým zabezpečovacím zařízením musí umožňovat zabezpečený průjezd vlaku tak, aby nedocházelo k žádným technickým ani provozním poruchám (2, s. 21 – 22).

Jestliže bude trať vybavena zabezpečovacími zařízeními s různými stupni automatizace, musí být systém schopný vždy pracovat na nejvyšším vzájemném dosažitelném stupni automatizace. Není zde přitom rozhodující, na kterém stupni automatizace je vybavena vlaková část a na kterém stupni automatizace část traťová. Zároveň musí systém umožňovat smíšený provoz vlaků, pokud je požadován. V takovém případě nesmí zabezpečovací zařízení negativně ovlivňovat jízdu nevybaveného vlaku. Systém musí být však doplněn rozhraním, které umožňuje bezpečný provoz všech vlaků, bez ohledu na to, zda jsou vybaveny UGTMS nebo ne. Proto musí být při dodání nového UGTMS na nevybavenou trať zajištěna kompatibilita se stávajícím systémem a to minimálně do doby, kdy budou všechny vlaky provozovány na stejném stupni automatizace. Vzájemná interoperabilita musí být zároveň zaručena i mezi sousedními dopravními sítěmi vybavenými UGTMS (2, s. 21- 23).

## **1.5 Možnosti zavedení automatického provozu na trase B**

Zavedení automatického provozu na již provozované trase je komplikovaný problém. Jedná se o strategické rozhodnutí, které vyžaduje komplexní změnu organizace řízení provozu. Musí být zpracována podrobná rozhodovací analýza, kde budou zhodnoceny všechny výhody a nevýhody modernizace ZZ. Dále musí být zpracována analýza rizik, kde budou zhodnocena všechna rizika vyplývající ze změny stupně automatizace a z toho plynoucího přechodu části odpovědnosti z provozního personálu na technické zařízení.

Trasa B je v současné době vybavena kolejovými obvody a vlakovým ZZ ARS (*avtomatičeskoje regulirovanie skorosti*), které nepřetržitě kontroluje rychlost vlaku. Linka B je tedy vybavena zařízením, které splňuje kritéria pro stupeň automatizace GoA1. Přechod na automatizovaný provoz by znamenal rozsáhlou úpravu staničního, traťového i vlakového ZZ. Zároveň by musela být provedena úprava dispečerského pracoviště tak, aby z něj bylo možné kontrolovat všechny požadované funkce pro automatizovaný provoz.

### ***Výhody a nevýhody přechodu na automatický provoz***

Přechod na automatizovaný provoz vlaků na trase B by si vyžádal mnoho změn oproti současnému konceptu provozu. V tabulce 1 je uveden základní přehled předpokládaných výhod a nevýhod spojených s tímto přechodem. Ověření parametrů, které se týkají možnosti navýšení

přepavní kapacity a minimalizace provozních intervalů jsou jedním z předmětů simulace, která je popsána v kapitole 5.

**Tabulka 1 Výhody a nevýhody přechodu na automatický provoz**

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zvýšení přesnosti spojů,</li> <li>• zvýšení bezpečnosti provozu vyloučením nebo omezením rizika pochybení lidského činitele,</li> <li>• zvýšení flexibility systému,</li> <li>• zvýšení cestovního komfortu,</li> <li>• možnost navýšení přepravní kapacity,</li> <li>• minimalizace provozních intervalů,</li> <li>• snížení spotřeby trakční energie,</li> <li>• úspora provozního personálu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investiční náklady,</li> <li>• nutnost modernizace technického zařízení tratě i vlaků,</li> <li>• komplikované zajištění normálního provozu v přechodové fázi,</li> <li>• nutnost úpravy právních norem (zákon o dráhách),</li> <li>• nutnost změn v provozních předpisech provozovatele dráhy.</li> </ul>

Zdroj: autor

### **Požadavky pro přechod na automatizovaný provoz**

Základním předpokladem pro přechod na automatizovaný provoz je spolehlivé nahrazení úlohy strojvedoucího, případně dalších provozních zaměstnanců, technickým zařízením. Na stupni automatizace GoA1 se technické zařízení omezuje na ZZ, které kontroluje bezpečnost a volnost vodící dráhy, na zajištění bezpečné rychlosti a bezpečného rozestupu vlaků. Za bezpečnost vedení vlaku, provoz vlaku, sledování pohybu cestujících a řešení nouzových situací je však odpovědný provozní personál. Při změně stupně automatizace na GoA4 dochází k přechodu těchto funkcí na technické zařízení.

Pro funkci stavění jízdních cest a sekundární detekci volnosti a neporušenosti koleje lze využít i stávající technické zařízení, které je však zcela nutné zapojit do systému UGTMS. Další funkce pro zajištění automatického provozu je však nutné řešit zcela novým technickým zařízením. Technické zařízení musí obsahovat funkce pro řízení vlaku, jeho bezpečné zrychlování a brzdění a také funkce pro sledování volnosti a sjízdnosti jízdní dráhy. Významným prvkem vzhledem k bezpečnosti cestujících jsou funkce, které zajišťují jejich bezpečný pohyb. Jsou to funkce, které zajišťují bezpečné otevírání a zavírání dveří a zařízení pro detekci pádu cestujících do prostoru mezi vozy a nástupiště a funkce, které dovolí odjezd vlaku ze stanice, až když je bezpečně ukončen výstup a nástup cestujících. Z hlediska provozování vlaku je nutné zajistit jeho automatické uvádění do provozu a odstavování



z provozu a neustálá kontrola stavu vlaku a všech jeho funkčních technických celků nezbytných pro bezpečnost a plynulost provozu. Pro celkovou bezpečnost provozu jsou nepostradatelné detekční systémy, které zajišťují bezpečné zjištění jakékoliv nebezpečné situace. Podle povahy situace musí systém umožňovat buď její vyřešení na dálku z OCC nebo alespoň předání informace o nutnosti zásahu provozního personálu. Podrobný přehled funkcí pro automatický provoz je uveden v kapitole 1.3.

### ***Popis přechodového procesu při zavádění automatického provozu***

Trasa B je jednou z páteřních linek městské hromadné dopravy v Praze. Z toho vyplývá, že její vyloučení z provozu po dobu přechodu na automatický provoz by přineslo řadu komplikací pro celý dopravní systém. Existují tři základní možnosti řešení přechodového stavu při modernizaci stávající tratě (1, s. 49):

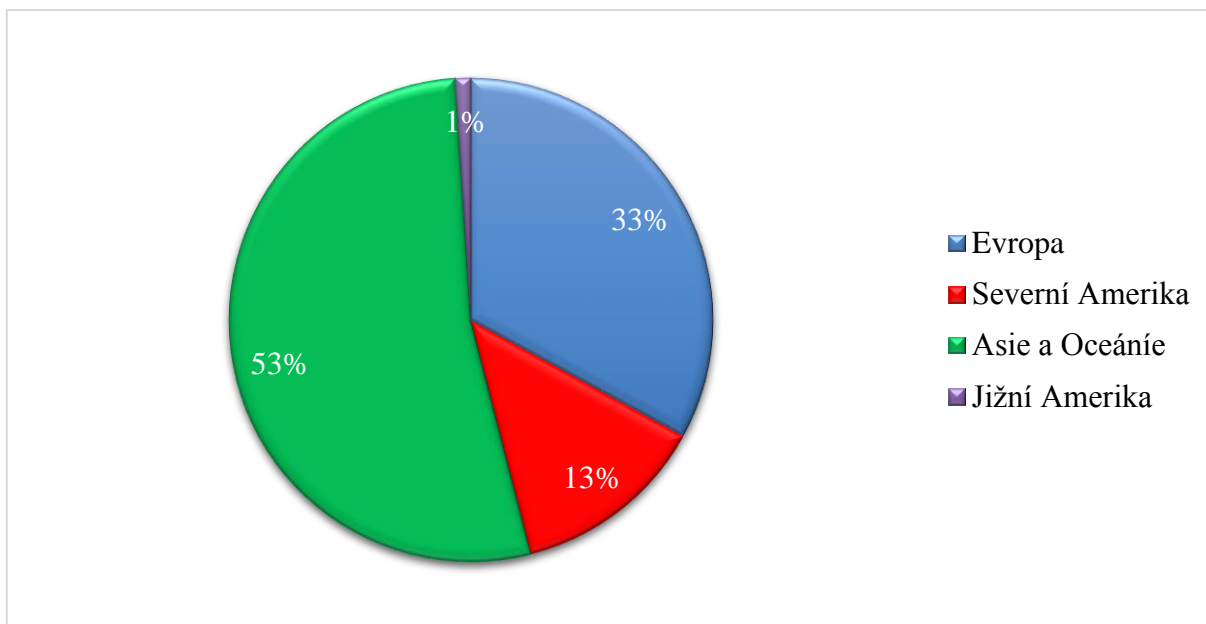
- 1) Kompletní uzavření stávající tratě a její znovuotevření až po dokončení přestavby.
- 2) Pokračování provozu s cestujícími se stávajícím zařízením během prací na novém zařízení. Testovací jízdy by byly vykonávány mimo provozní dobu nebo v oblastech s vyloučeným provozem pro přepravu cestujících.
- 3) Pokračování provozu s cestujícími se stávajícím zařízením během prací na novém zařízení. Testovací jízdy by byly vykonávány za provozu tak, aby byl co nejméně omezen rozsah provozu (např. ve vlakových přestávkách).

Harmonogram prací a podmínky pro přechodový proces musí být odsouhlaseny dodavatelem zařízení, provozovatelem dráhy a orgánem pro otázky bezpečnosti (Dražním úřadem). Musí být bezpodmínečně zajištěno, aby zkušební jízdy vlaků provozovaných v automatickém režimu bez konečného schválení neohrozily probíhající provoz s cestujícími. Z těchto důvodů musí být provedena analýza rizik zahrnující všechny uvažované nebezpečné situace, které mohou nastat v rámci přechodového procesu. Práce provozního personálu musí být rovněž specifikována pro každý krok přestavby. Zároveň mohou být provoznímu personálu svěřeny dočasná bezpečnostní opatření, která budou platná pouze pro vybrané fáze přechodového procesu.

## 2 AUTOMATICKÉ PROVOZY METRA VE SVĚTĚ

Automatizace městských rychlodrah je jednoznačně celosvětovým trendem. Vzhledem k tomuto faktu je tato kapitola věnována trendu automatizace metra ve světě, včetně konkrétních příkladů jejího použití. V kapitole jsou popsány jednotlivé provozy automatického metra s důrazem na základní parametry tratí, zabezpečovací zařízení a provozované soupravy.

V červnu roku 2016 bylo ve světě v provozu celkem 55 linek automatického metra ve 37 městech. Vlastní síť metra má celkem 157 měst, z čehož vyplývá, že alespoň jednu linku automatického metra můžeme najít ve 23 % měst provozujících metro. Celková délka tratí automatického metra je 803 km, což znamená nárůst o 14,2 % oproti roku 2014. Podle projektů má být do roku 2025 v provozu 2300 km tratí automatického metra. Největší podíl linek s automatickým provozem můžeme najít v Severní Americe, v Evropě a jihovýchodní Asii, jak můžeme vidět na obrázku 2 (4).

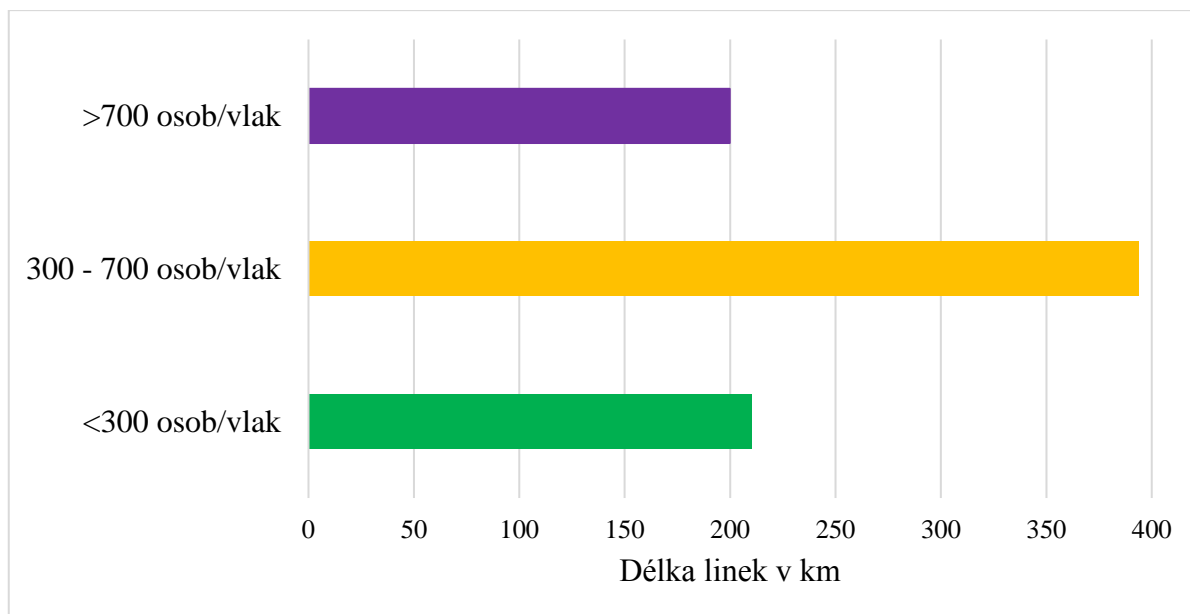


Obrázek 2 Podíl délky tratí automatického metra ve světě

Zdroj: (4), autor

Mezi země s největším podílem automatických linek metra patří Francie, Jižní Korea, Singapur a Spojené arabské emiráty. Města s největší délkou automatizovaných linek metra jsou: Singapur (93 km), Dubaj (80 km) a Vancouver (63 km) (4).

Automatický provoz byl nejdříve prověřen na tratích metra s kapacitou jednoho vlaku menší než 300 osob. První automatické metro bylo otevřeno ve francouzském Lille v roce 1983 (5). Postupně se začal tento systém uplatňovat i v systémech metra se střední kapacitou souprav (300 – 700 osob) a v systémech s velkou kapacitou souprav (vyšší než 700 osob). Zastoupení linek metra podle kapacity souprav je znázorněno na obrázku 3.



**Obrázek 3** Délky linek podle kapacity souprav

**Zdroj: (4), autor**

Po více než třiceti letech od zahájení provozu první linky automatického metra dochází v poslední dekádě k výraznému nárůstu podílu automatických linek metra ve světě. K nejmasivnějšímu rozvoji této technologie dochází zejména v Evropě a střední a jihovýchodní Asii. Největší množství projektů automatického metra se v současné době plánuje v Číně.

V této kapitole jsou dále popsány vybrané evropské linky automatického metra, o kterých existuje dostatek relevantních informačních zdrojů pro jejich podrobné popsání. Důraz je kladen především na provozní ukazatele, použitá vozidla a typ ZZ. Ostatní systémy automatického metra ve světě jsou stručně popsány v příloze C.

## 2.1 Automatické metro v Barceloně

Barcelonské metro má v současné době deset linek, z čehož tři jsou provozovány v automatickém režimu. Konkrétně se jedná o linky L9, L10 a L11. Provozovatelem všech linek je společnost *Transports Metropolitans de Barcelona* (TMB) (6). Linka L11 byla uvedena do provozu v roce 2003 a stala se první automatizovanou linkou v síti barcelonského metra. Linka L9 byla otevřena v roce 2009 a linka L10 v roce 2010 (7).

Linka L9 má plánovanou délku 47,8 km a v konečném stavu má obsluhovat 52 stanic. V současné době je v provozu 31,1 km linky a 24 stanic (7). Na linkách L9 jsou provozovány vlaky *Metropolis* řady S9000 od společnosti Alstom. Kapacita jedné soupravy je 875 cestujících (6). Soupravy jsou napájeny napětím 1500 V stejnosměrných, za pomoci vrchního sběrače. Z důvodu složitých geologických poměrů je tato linka vedena v hloubce až 75 m. Jako ZZ zde slouží *Communication Based Train Control* (CBTC) Trainguard

MT od společnosti Siemens. Pro bezpečnost nástupu a výstupu cestujících je každá stanice vybavena skleněnými ochrannými dveřmi. Vlaky jsou na této lince provozovány ve čtyř až sedmiminutovém intervalu (8).

Linka L 10 má v současné době 5,6 km a obsluhuje celkem 6 stanic (7). Tato linka používá stejné jednotky i ZZ jako linka L9. Linky L9 a L10 spolu sdílejí centrální část trasy, ale nesdílejí spolu kolejiště (8).

První automatizovanou linkou se stala linka L11, která má délku 2,15 km a celkem pět stanic. Na této lince jsou provozovány soupravy s označením TMB série 500 (9). Tyto soupravy jsou pouze dvouvozové a jejich délka je 40 m. Délce souprav je přizpůsobena i délka nástupišť, která je rovněž 40 m. Trať této linky je pouze jednokolejná s výhybnou v centrální části a pohybují se na ní pouze dvě soupravy metra. Špičkový interval na této lince je 5,5 minuty (10).

## **2.2 Automatické metro v Budapešti**

Síť budapešťského metra má celkem čtyři linky. Nejstarší linkou v síti je linka M1. Tato linka je dlouhá 4,4 km a obsluhuje celkem 11 stanic. Linka M2 je dlouhá 10 km a obsluhuje rovněž 11 stanic. Nejdelší linkou metra je linka M3, které má celkem 17,3 km a obsluhuje 20 stanic. (11). Poslední linkou v síti budapešťského metra je linka M4, která je plně automatizovaná (12).

Linka M4 byla otevřena v roce 2014. Délka linky 7,4 km a obsluhuje celkem 10 stanic. Nejmenší podélný sklon v tunelech linky M4 je 3 ‰ a největší podélný sklon 36,3 ‰ (12). Na lince jsou provozovány čtyřvozové soupravy Alstom Metropolis o délce 80 m. Kapacita těchto jednotek je 810 cestujících a maximální rychlost je  $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Špičkový interval na této lince je 2 – 3 minuty, což umožňuje přepravit až 20 100 cestujících za hodinu. Zabezpečovací zařízení použité na této lince je typu CBTC Siemens Trainguard MT, které je použito i na řadě dalších evropských linek automatizovaného metra. Zajímavostí v zabezpečení je, že na rozdíl od většiny systémů automatického metra nejsou v budapešťském metru instalovány bezpečnostní dveře na nástupištích. Příjezd vlaku je oznamován cestujícím pomocí svítícího LED pásku integrovaného v hraně nástupiště (13).

## **2.3 Automatické metro v Paříži**

Pařížské metro má celkem 14 linek metra o celkové délce 216, 3 km. V této rozsáhlé síti jsou v automatickém režimu provozovány dvě linky. Jedná se o linko číslo 1 a o linku číslo 14 (14).

Linka číslo 1, otevřená již v roce 1900, je dlouhá 17 km a obsluhuje 25 stanic. Každý den přepraví 725 000 cestujících. Linka byla od roku 2010 do roku 2012 provozována se smíšeným provozem, to znamená, že zde stále byly v provozu vlaky řízené strojvedoucím spolu s vlaky vedenými v automatickém režimu. Od roku 2012 jsou všechny soupravy přizpůsobeny provozu v automatickém režimu (15). Jedná se o soupravy Alstom MP 05 o kapacitě 1014 cestujících (16). Provoz na lince 1 je zabezpečen pomocí ZZ CBTC Siemens Trainguard MT. Díky instalaci zabezpečovacího zařízení bylo dosaženo zkrácení intervalů mezi vlaky ze 105 s na 85 s, což umožnilo zvýšit přepravní kapacitu linky o 20 % (15).

Druhou automatickou linku v síti pařížského metra je linka číslo 14, která nese název: *Metro Est-Ouest Rapide* (METEOR). Jedná se o linku lehkého metra na pneumatikách. Linka má být zprovozněna v celé délce až v roce 2019. V roce 2013 bylo v provozu 8,6 km linky a 9 stanic. Přepravní kapacita linky je 450 000 cestujících denně. Zabezpečovací zařízení je rovněž typu CBTC Siemens Trainguard MT, které umožňuje provoz vlaků v intervalu 85 s. Na lince METEOR jsou provozovány šestivozové soupravy typu MP 89. Tyto soupravy mají délku 90 m a přepravní kapacitu 720 cestujících (17)(16). Pro tuto linku je plánován provoz zcela nových osmivozových souprav Alstom MP 14, což povede k navýšení přepravní kapacity a úspoře trakční energie. Dodávka souprav je plánována na rok 2019 (18).

## 2.4 Automatické metro v Římě

Síť metra v Římě má celkem tři linky. *Linea A* má 18,4 km a obsluhuje 27 stanic. *Linea B* je dlouhá 23,7 km a obsluhuje 26 stanic. V automatické režimu je provozována nejnovější linka metra *Linea C* (19).

*Linea C* je stále ve výstavbě a zatím je v provozu pouze 17,9 km trati a 21 stanic. Po dostavbě by měla být linka dlouhá 26 km (20)(18). Na lince jsou provozovány šestivozové vlaky od firmy AnsaldoBreda. Po úplném dokončení linky, by mělo být provozováno 30 těchto souprav. Stejně jako u linky L9 a L10 v Barceloně je zde použit svrchní odběr trakční energie o napětí 1500 V. Systém používá zabezpečovací technologii Ansaldo Driverless Metro od společnosti AnsaldoBreda. Nejedná se o systém CBTC, ale o typizovanou technologii využívající pro zjišťování polohy vlaku kolejové obvody. Výrobce udává, že toto zařízení umožňuje provoz v minimálním teoretickém intervalu 75 s (20).

## 2.5 Automatické metro Kodani

Kodaňské metro má v současné době dvě linky, které spolu sdílejí část tratě v centru města. Obě jsou provozovány v automatickém režimu již od svého otevření. První linka byla otevřena v roce 2002 a v roce 2003 byla uvedena do provozu i druhá linka. Celková délka

linek je 21 km. Linky obsluhují 22 stanic, z nichž 9 leží na společném úseku (21). Další linka metra, má být otevřena v roce 2018. Jedná se o tzv. City Ring, který má být dlouhý 17 km a obsluhovat 17 stanic (22).

Soupravy pro obě linky dodala společnost Ansaldo STS a je jich celkem 34. Jedná se o třívozové jednotky o délce 39 m, šířce 2,65 m a hmotnosti 52 t. Jednotky jsou osazeny šesti dvoukřídlými dveřmi a jejich kapacita je 300 cestujících. Maximální rychlost jednotek je  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a využívají trakční napájení třetí kolejnicí o napětí 750 V (22). Zabezpečovací zařízení dodala společnost Ansaldo STS. Jedná se o stejný systém jako v případě metra v Římě, který umožňuje provoz vlaků v minimálním intervalu 75 s. Pro novou linku City Ring je plánována dodávka ZZ od stejného výrobce, ale mělo by se již jednat o systém CBTC (21). Pro řízení celého systému metra byla vybudováno operační středisko OCC. Pro systém kodaňského metra se však požívá místní označení tohoto střediska: *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA), který dozoruje celý provoz metra. Je do něj zapojen například kamerový systém, systémy požární ochrany, ventilace a systém napájení celého metra (22).

Systém zabezpečení nástupišť využívá dva základní principy. Prvním je zabezpečení nástupišť pomocí nástupištních stěn. Takto jsou zabezpečena nástupiště ve všech podzemních stanicích, kterých je 9. V nadzemních stanicích jsou využívána čidla, která sledují volnost koleje v prostoru stanice. Pokud by byla na kolejích detekována překážka, vlak by byl samočinně zabrzděn ještě před vjezdem do stanice (22).

## 2.6 Automatické metro v Lyonu

Lyonské metro má 4 linky, které nesou označení A, B, C a D. Provozovatelem všech linek je společnost Keolis Lyon. Celková délka všech linek je 30,3 km. Tyto linky obsluhují 44 stanic. Jediná linka provozovaná ve zcela automatickém režimu je linka D (23).

Linka D byla uvedena do provozu v roce 1991. Tato linka je dlouhá 12,5 km a obsluhuje 15 stanic. Její oficiální název je *Maggaly (Métro automatique à grand gabarit de l'agglomération lyonnaise)*. Na lince D jezdí pouze 36 dvouvozových souprav, které je však možné spojit a vytvořit tak čtyřvozový vlak (23). V době vzniku této linky se jednalo o první systém tzv. těžkého metra v Evropě, které bylo provozováno v automatickém režimu. Zabezpečovací zařízení vyvinula firma Siemens. Toto zařízení je typu CBTC a umožňuje provoz v pohyblivých prostorových oddílech. Výrobce udává špičkový minimální interval 90 s (24).

Do roku 2023 se plánuje modernizace ZZ na lince B a D. Na obou linkách má být instalováno nové ZZ typu CBTC od firmy Alstom. Mělo by se jednat o ZZ nové generace typu Urbalis 400 (25).

## **2.7 Automatické metro v Miláně**

Milánské metro má celkem 4 linky a pátá je ve výstavbě. Celková délka linek je 91,5 km a obsluhují 113 stanic. Linka M 5 je provozována v automatickém režimu. Tato linka má délku 12,8 km a obsluhuje 19 stanic (26).

Zabezpečovací zařízení dodala firma AnsaldoSTS, ale nejedná se o zařízení CBTC, protože používá kolejové obvody a neumožňuje provoz v pohyblivých prostorových oddílech mimo úseky v okolí stanic. Jedná se o stejný typ ZZ, který je použit u metra v Římě nebo v Kodani. Zabezpečení nástupišť je zajištěno kamerovým systémem, který kontroluje volnost nástupištních kolejí. Systém samočinně zastaví vlaky v případě, že by byla v kolejišti detekována překážka (27).

Vozový park tvoří třívozové jednotky od firmy AnsaldoBreda, které mají kapacitu 300 cestujících. Maximální rychlost těchto jednotek je  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , ale na lince M5 dosahují cestovní rychlosti pouze  $29 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (27).

## **2.8 Automatické metro v Norimberku**

Norimberské metro má tři linky metra. Jedná se o linky U1, U2 a U3, jejichž celková délka je 39 km a obsluhují 46 stanic (28). Linka U3 otevřená v roce 2008 je provozována v automatickém režimu a má společný úsek s linkou U2, kde jsou vlaky provozovány konvenčním způsobem. Společný úsek je smíšený a jezdí zde vlaky se strojvedoucím i vlaky automatické. Nevýhodou tohoto řešení je nemožnost plného využití potenciálu automatického systému provozu (29).

Zabezpečovací zařízení je typu CBTC Trainguard MT od společnosti Siemens. Toto zařízení umožňuje provoz vlaků v intervalu 100 s. Nástupiště nejsou osazena nástupištními stěnami, ale ochranu zajišťuje kamerový systém, který v případě výskytu překážky v kolejišti vlaky automaticky zastaví (29).

Pro linky U2 a U3 byly dodány nové vozy umožňující automatický provoz. Jedná se o 30 jednotek typu DT3 a DT3 – F. Jedná se o dvouvozové jednotky o délce 35,5 m. Jednotky jsou napájeny napájecí kolejnici s napětím 750 V. Jejich maximální rychlost je  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Kapacita jednotky DT3, která je určena pro zcela bezobslužný provoz na stupni GoA4 je 238 cestujících. Jednotka DT3 – F umožňuje i konvenční způsob provozu a proto je vybavena dvěma stanovišti strojvedoucího. Kapacita této jednotky je pouze 216 cestujících (30).

## 2.9 Automatické metro v Turíně

První linka metra v italském Turíně byla otevřena v roce 2006. V roce 2011 byla otevřena nová část této linky. Linka číslo 1 turínského metra měří 13,2 km a obsluhuje 21 stanic. Po dokončení zbývajících úseků má být linka prodloužena na celkovou délku 27,5 km. Jedná se o systém lehkého metra na pneumatikách (31).

Na lince číslo 1 jsou provozovány čtyřvozové jednotky typu *Véhicule Automatique Léger* (VAL) 208 od společnosti Siemens. Jednotka je dlouhá 52 m a má kapacitu 440 cestujících. Maximální rychlost je  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Pro napájení jednotek je využívána postranní kolejnice s trakčním napájecím systémem 750 V stejnosměrných (31).

Zabezpečovací zařízení je typu CBTC Siemens Trainguard MT. Pro bezpečnost cestujících jsou nástupiště osazena bezpečnostními skleněnými dveřmi. Prostory stanic jsou pro vyšší bezpečnost snímány kamerovým systémem (31).

## 2.10 Systém VAL v Lille

Metro ve francouzském Lille má dvě linky systému VAL, tedy lehkého metra na pneumatikách. Linka číslo 1 je dlouhá 13,5 km a má 17 stanic. Tato linka byla otevřena již v roce 1984 a už od svého vzniku byla plně automatizovaná. Linka číslo 2 je dlouhá 32 km a obsluhuje 43 stanic. V plné délce byla zprovozněna v roce 2000 a je rovněž od začátku provozována jako zcela automatická (32).

Vozový park obou linek tvoří jednotky dodané společností Matra. Původní jednotky VAL 206 byly nahrazeny jednotkami VAL 208. Jedná se o dvouvozové jednotky o délce 26 m. Na lince číslo 1 mohou být z důvodu krátkých nástupišť (26 m) provozovány pouze jednotlivě, na lince číslo 2 mohou jezdit dvě jednotky spřažené do jednoho vlaku. Maximální kapacita jednotky je 245 cestujících v závislosti na konfiguraci. Napájení jednotek je realizováno třetí kolejničí a má trakční napětí 750 V (32).

Zabezpečovací zařízení obou linek je zcela automatické a dodala jej společnost Matra. Zabezpečovací zařízení umožňuje špičkový interval 60 s. Zabezpečení nástupišť je provedeno nástupištními stěnami a prostory stanic jsou monitorovány kamerovým systémem (32).

## 2.11 Shrnutí automatických provozů metra

Zavádění automatického provozu je typické především pro nově zřizované linky. Přestavba konvenčního systému metra na automatický provoz se sebou nese problémy a rizika popsaná v kapitole 1.5. Pokud dojde ke změně provozu z konvenčního na automatický, je to především z kapacitních důvodů. Zabezpečovací zařízení CBTC umožňuje provoz vlaků v intervalu od 60 s do 100 s v závislosti na povaze linky. Zároveň implementace bezobslužného



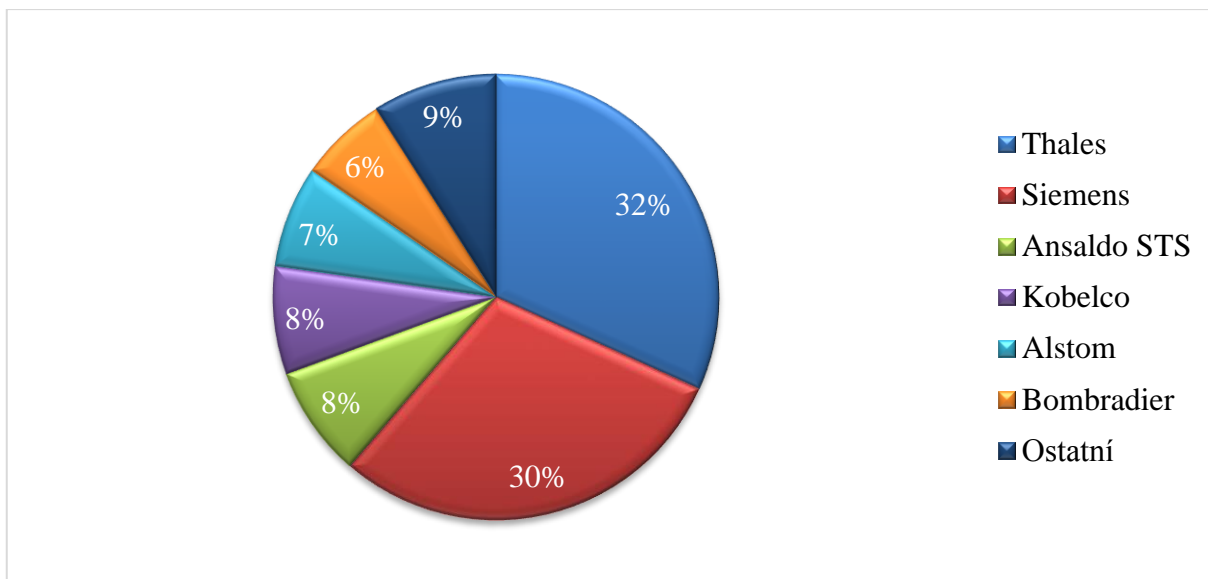
provozu umožňuje navýšení kapacity souprav, kde už nemusí být prostory pro strojvedoucí. Zástupcem linky, která byla zmodernizována pro automatický provoz, je například linka číslo 1 pařížského metra. Pro tuto linku byly kromě nového ZZ dodány i nové soupravy, což ve výsledku umožnilo navýšení její kapacity o 20 %.

Nově vznikající linky se však v současnosti projektují zejména pro možnost automatického provozu. Pro zabezpečení automatického provozu metra je využíváno hlavně ZZ typu CBTC, které je popsáno v kapitole 3. Toto zařízení umožňuje zajistit vyšší bezpečnost provozu, vysokou přesnost provozu, vysoký jízdní komfort a také vysokou flexibilitu při reakci na mimořádné situace a nárazové změny poptávky cestujících. V porovnání s konvenčním provozem umožňují tyto systémy také větší flexibilitu při nasazování různých souprav, případně při jejich spojování do jednoho vlaku v závislosti na poptávce po přepravě. Důležitým specifickým v rámci automatického provozu je dohled na pohybem cestujících. Z popisu jednotlivých systémů metra vyplývá, že nejčastějším řešením (především u velmi vytížených linek) tohoto problému jsou nástupištní stěny, které zcela zamezují vniknutí osob do průjezdného průřezu mimo dobu nástupu a výstupu z vozidla. Tímto opatřením se předchází nežádoucímu ohrožení cestujících a následnému přerušení provozu.

V následujících letech se předpokládá další rozmach technologie automatického metra ve všech vyspělých zemích (4). Kromě nových staveb plánují některá města i modernizaci stávajících linek na automatický provoz (např. Hong Kong). V budoucnu by mělo být automatizované ZZ typu CBTC instalováno i v pražském metru. Instalace tohoto zařízení se předpokládá na nové trase D.

### 3 ZABEZPEČOVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO AUTOMATICKÉ METRO

Nejpoužívanějším zařízením pro automatický provoz metra je v současnosti ZZ typu CBTC, kterým je zabezpečeno přibližně 68 % z celkové délky linek automatického metra ve světě. Největším dodavatelem CBTC je firma Thales, kterou těsně následuje firma Siemens (4). Podíl jednotlivých výrobců CBTC podle délky linek, pro které bylo ZZ dodáno je znázorněno v grafu na obrázku 4.



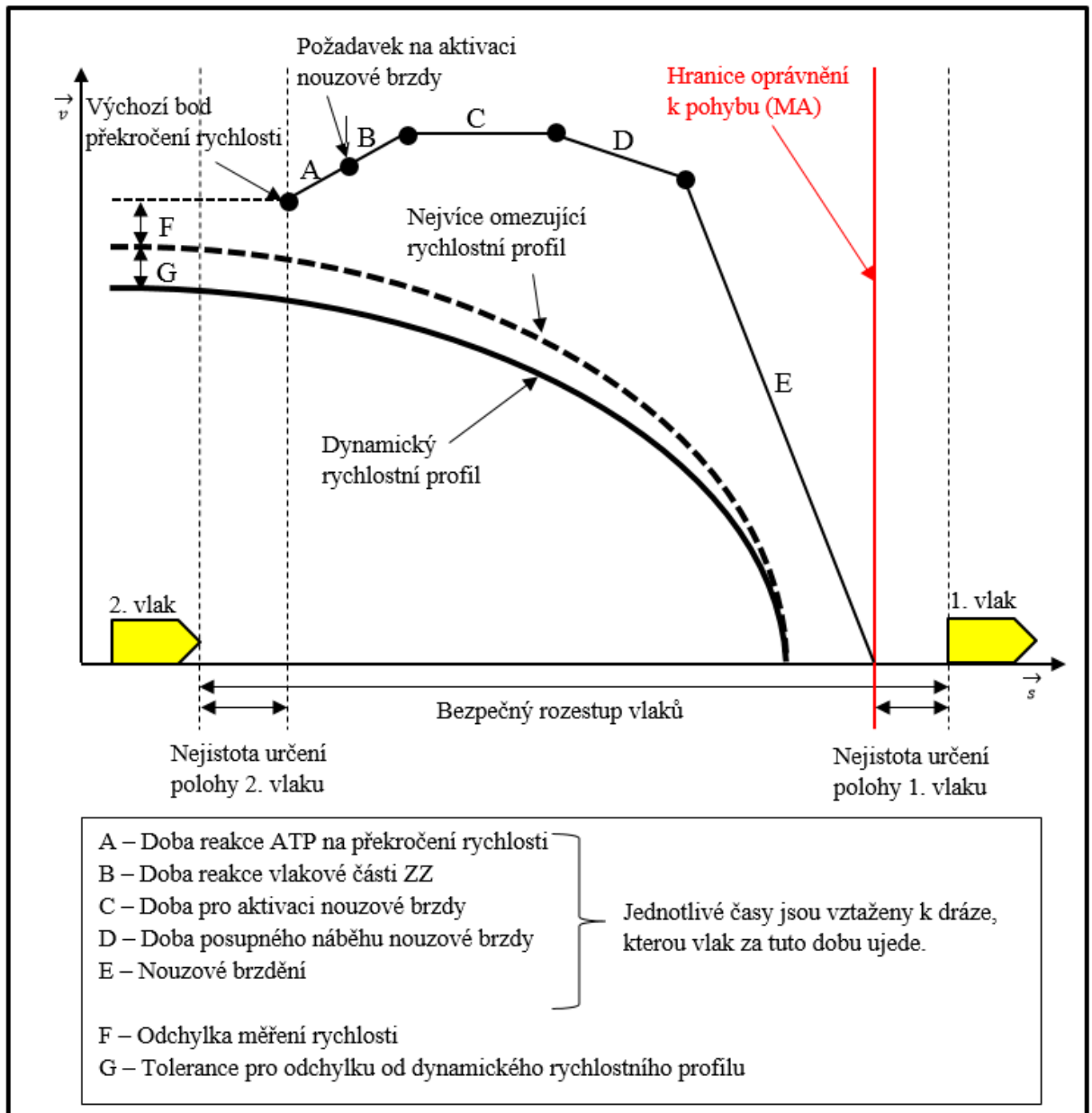
Obrázek 4 Podíl výrobců CBTC podle délky linek

Zdroj: (4)

Zařízení CBTC bylo vyvinuto především pro vysokokapacitní kolejovou dopravu. Toto zařízení je velmi vhodné pro segregované tratě, po kterých jezdí vlaky se stejnými nebo velmi podobnými parametry a pro tratě, kde je nízké riziko ohrožení dopravy vnějšími vlivy (např. povětrnostními podmínkami, nedovoleným pohybem osob, atd.). Z výše uvedeného je patrné, že mezi vhodné tratě pro implementaci CBTC patří tratě metra, popřípadě tratě jiných segregovaných městských a příměstských drah.

Systém CBTC se odlišuje od konvenčních zabezpečovacích systémů především možností provozu vlaků v pohyblivých prostorových oddílech. Konvenční zabezpečovací systémy používají pro řízení dopravy návěstní systém s traťovými nebo lokomotivními návěstidly a pro detekci polohy vlaku kolejové obvody nebo počítače náprav. Z tohoto důvodu u nich není možný provoz v pohyblivých prostorových oddílech, ale pouze v pevných prostorových oddílech vymezených návěstidly nebo jednotlivými kolejovými úseky. Systém CBTC tento problém řeší přímou komunikací mezi vlakovou a traťovou částí zabezpečovacího zařízení. Palubní část CBTC dokáže s vysokou přesností určit přesnou polohu vlaku na trati

a zároveň poskytnout podrobná data o stavu vlaku. Systémy CBTC proto mohou umožňovat provoz v pohyblivých prostorových oddílech, čímž snižují vzdálenost mezi následnými vlaky na trati. Vzdálenost mezi následnými vlaky se u těchto systémů určuje podle polohy konce předcházejícího vlaku, zábrzdné vzdálenosti následujícího vlaku a bezpečnostní rezervy. Pro takto vypočtenou vzdálenost systém udělí tzv. oprávnění k jízdě (*movement authority* (MA)) (33). Obecné schéma pro určování vzdálenosti mezi následnými vlaky je uvedeno na obrázku 5.



Obrázek 5 Schéma určení bezpečného rozestupu vlaků

Zdroj: (34), autor

Kontrolní systém CBTC má vždy přesnou informaci o poloze a rychlosti vlaku. Na základě těchto informací palubní část zabezpečovacího zařízení vypočte dynamický rychlostní profil s cílem zajistit bezpečný rozestup vlaků. Část zabezpečovacího zařízení, která

je zodpovědná za výpočet této křivky a za to, že vlak vypočtenou rychlostní křivku nepřekročí, se nazývá automatická ochrana vlaku – *automatic train protection* (ATP) (33).

Z hlediska architektury systému jsou systémy CBTC rozděleny na dvě hlavní části: mobilní část umístěnou přímo na vlaku a traťovou část umístěnou na trati a ve stanicích. Systém CBTC musí kontrolovat stav vlaku tak, jako by ho kontroloval a řídil strojvedoucí. O tuto činnost se stará subsystém automatického provozu vlaku – *automatic train operation* (ATO) a subsystém automatického dohledu nad vlaky – *automatic train supervision* (ATS). Subsystém ATS kontroluje všechny vlaky v síti, kontroluje dodržování rychlostních omezení, jízdních řádů a funkci informačních systémů. Systém CBTC může kontrolovat i funkce dalších přidružených systémů jako funkci kolejových obvodů, trakčních zařízení a dalších částí infrastruktury (33).

Systém CBTC může fungovat se dvěma základními systémy vzájemného přenosu dat mezi vlakovou a traťovou částí zabezpečovacího zařízení. První možností je instalace rádiové sítě nebo indukčních smyček po celé délce trati. Ekonomičtější variantou je umístování komunikačních prvků v izolovaných bodech okolo trati, které neustále sledují provoz vlaků (34).

### **3.1 Mezinárodní standardy pro systém CBTC**

Pro systém CBTC jsou definovány dva základní mezinárodní standardy. Jedná se o standard *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 1474.1 a IEC 62290.

Norma IEEE 1474.1 byla schválena v roce 2004. Týká se funkčních a výkonnostních požadavků na systémy CBTC. Norma se zabývá především vlastním vlakovým zabezpečovacím zařízením, tedy subsystémem ATP. Funkce ATO a ATS jsou standardem definovány jako volitelné. Norma stanovuje i hlavní bezpečnostní požadavky na systém. Norma se netýká pouze systémů metra, ale i dalších systémů městské drážní dopravy.

Další normy IEEE, které se vztahují k CBTC jsou normy: IEEE 1474.2, která definuje standardy uživatelského rozhraní CBTC a IEEE 1474.3 a IEEE 1474.4, které definují standardy pro testování CBTC.

Norma IEC 62290 byla schválena v roce 2007. V této normě jsou uvedeny základní pojmy, všeobecné požadavky a popis funkcí kontrolních a řídicích subsystémů CBTC. Zároveň norma definuje čtyři základní stupně automatizace GoA1 až GoA4.

V českých technických normách jsou tyto normy uvedeny jako ČSN EN 62267 (Drážní zařízení – automatizovaná městská doprava s vyhrazenou vodící dráhou – Bezpečnostní požadavky), ČSN EN 62290 – 1 (Drážní zařízení - Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou

vodicí dráhou - Část 1: Systémové principy a základní pojmy) a ČSN EN 62290 – 2 (Drážní zařízení - Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodicí dráhou a příkazové/kontrolní systémy - Část 2: Specifikace funkčních požadavků).

### **3.2 Základní komponenty komunikačního rozhraní CBTC**

Základním pevným prvkem komunikační sítě jsou optické kabely, které mají dostatečnou kapacitu pro přenos veškerých potřebných dat. V případě potřeby mohou mít až 96 optických vláken. Konstrukce kabelů musí vykazovat odolnost vůči vnějším vlivům, kam zejména patří: odolnost proti požáru, odolnost proti vlhkosti, odolnost proti kyselinám a alkaloidům a odolnost proti mechanickému poškození. V technických místnostech a kabelových ústřednách, musí být jednotlivé kabely uspořádány podle toho, k jaké funkční skupině patří. Toto opatření je důležité zejména pro snadnější zjišťování závad a poškození a pro snadnější údržbu (35).

Komponenty rádiové sítě jsou další klíčovou součástí tohoto ZZ. Systém CBTC implementuje protokol IEEE 802.11 a/g/p/n (používá se i v běžných sítích WiFi/WLAN). Výhodou tohoto řešení je, že se jedná o otevřený a běžně používaný standard, což umožňuje používat různá technická řešení rádiové sítě, při zachování vzájemné kompatibility. Rádiová síť CBTC pracuje s kmitočty 2,4 GHz nebo 5,8 GHz. Obě tyto frekvence vykazují dobré vlastnosti a potřebný dosah pro provoz v tunelech metra (35).

Pokud je rádiová síť vytvořena prostřednictvím radiomajáků rozmístěných na určených bodech podél trati, komunikuje systém s vlakem pomocí vozidlové antény. Vlaková jednotka si nepřetržitě předává zprávy s traťovou částí. Pokud dojde ke ztrátě signálu nebo k jiné poruše (například nesrozumitelnost zprávy) vlaková jednotka okamžitě zavede rychločinné brzdění. Protože se jedná o ZZ, jsou komunikační větve vedeny po celé délce tratě zdvojeně, přičemž aktivní může být vždy pouze jedna z těchto větví. Kromě redundance jednotlivých částí ZZ jsou tyto části chráněny před přírodními vlivy a mechanickým poškozením (35).

Traťová část zabezpečovacího zařízení se skládá z radiomajáků rozmístěných podle trati ve vzdálenosti od několika desítek metrů do několika stovek metrů tak, aby byla pokryta všechna místa na trati. Vzdálenost radiomajáku je ovlivněna především místními poměry jako například směrové vedení trati a parametry tunelu. Radiomajáky mohou být upevněny na samostatných sloupcích, případně i na jiných vhodných částech vybavení trati (35).

Radiomajáky jsou vzájemně propojeny pomocí zdvojené sítě optických kabelů. Obvykle se používají dvanácti až čtrnácti vláknové optické kabely. Velkou výhodou jejich použití je, vedle velké kapacity, jejich odolnost proti vlivům elektromagnetismu. Další

důležitou částí komunikační sítě jsou propojovací konektory s robustní a odolnou konstrukcí. Obvykle se používají typy IP 67/68. Vzájemné uzly komunikační sítě jsou obvykle umístěny v technických místnostech ve stanicích. Radiomajáky jsou kromě portů pro optické kabely vybaveny i přípojkou elektrické energie pro napájení vlastní antény. Anténa radiomajáku musí být dostatečně odolná proti vnějším vlivům, jako jsou: vibrace, požár, tlakové vlny, elektrický výboj, vlhkost, změna teploty a vandalismus (35).

Vlaková část ZZ má stejně jako traťová část redundanci klíčových prvků. Antény vlakové části zabezpečovacího zařízení jsou zdvojené a jsou připojeny k modemu, který předává nebo přijímá data od vlakového zabezpečovače. Vlakový zabezpečovač včetně kabelů musí být odolný proti veškerým předpokládaným vnějším vlivům (35).

### **3.3 Typy zabezpečovacího zařízení CBTC**

V této kapitole jsou popsána ZZ typu CBTC od předních světových výrobců. Bylo vybráno celkem 7 nejvíce používaných typů ZZ.

#### ***Bombardier CITYFLO***

System CBTC vyráběný společností Bombardier se nazývá CITYFLO. V provozu jsou dvě verze systému a to CITYFLO 450 a CITYFLO 650. Verze CITYFLO 650 je nejmodernější ze systémů CBTC od této společnosti. Tato verze umožňuje zcela bezobslužný provoz ve stupni automatizace GoA4. Jako všechny systémy CBTC má CITYFLO stejnou základní architekturu, která se skládá z traťové a vozidlové části. Zařízení traťové části jsou rozdělena do zón, ve kterých jsou monitorovány a řízeny vlaky. Tyto zóny mají přesně definované hranice tak, aby vlak mohl být řízen vždy pouze z jedné zóny odpovědnosti. Zóny jsou rozděleny na segmenty. Každý segment a každá zóna má své identifikační číslo. Podle toho, ve které zóně se vlak nachází, systém jednoznačně určí polohu vlaku (33).

Komunikace mezi traťovou a vozidlovou částí je realizována rádiovou sítí, která používá frekvenci 2,4 GHz. Data jsou přenášena z antén umístěných podél koleje na anténu umístěnou na vozidle (33).

V případě poruchy systému je k dispozici záložní systém řízení, který využívá kolejové obvody a klasická traťová návěstidla. Bombardier CITYFLO 650 dosahuje teoretického intervalu 75 s. V komerční provozu se však využívá špičkový interval od 101 do 111 s (33).

#### ***Alstom URBALIS***

Produkt URBALIS je řešením CBTC od společnosti Alstom. Je možné používat verzi jak pro zcela bezobslužné vlakové soupravy (GoA4), tak pro soupravy bez strojvedoucího, ale

s vlakovým doprovodem (GoA3). Vlaková a traťová část jsou spojeny pomocí rádiové komunikační sítě. Tato komunikační síť je založena na standardu IEEE 802.11 g/a na frekvenci 2,4 nebo 5,8 GHz (33).

Vlaková část ZZ používá pro přesné určení polohy vlaku eurobalízy, které jsou rozmístěny na trati. V částech tratě mezi balízami se poloha vlaku určuje pomocí odometrických čidel umístěných na nápravách vlaku. Pro možnost jízdy vlaku nevybaveného palubní části CBTC nebo pro případ poruchy je zřízeno sekundární zabezpečení. Toto sekundární zabezpečení pracuje na principu kolejových obvodů a klasického návěstního systému. Systém CITYFLO 650 dosahuje teoretické hodnoty minimálního intervalu méně než 85 s. V komerčním provozu se však využívá špičková hodnota intervalu 90 s (33).

### ***Thales SelTrac***

Systém CBTC od firmy Thales se nazývá SelTrac. Poslední verze SelTrac S40 podporuje oba způsoby automatického provozu, tedy zcela bezobslužné (GoA4) a provoz s vlakovým doprovodem (GoA3). Systém SelTrac má podobnou architekturu jako systém URBALIS. Trať je tedy rozdělena na zóny odpovědnosti a tyto zóny jsou rozděleny na segmenty pro zjištění polohy vlaku. Segmenty mohou být realizovány pomocí indukčních smyček nebo může být využívána rádiová síť dle standardu IEEE 802.11 (33).

Pokud jsou segmenty zón realizovány indukčními smyčkami, je dána jejich přesná poloha a výpočet polohy vlaku mezi nimi probíhá odometricky. V případě využití rádiové sítě se pro určení polohy vlaků používají radiomajáky s přesně danou polohou. Systém SelTrac S40 umožňuje dosáhnout teoretického minimálního intervalu méně než 60 s. V komerčním provozu se však využívá špičkový interval 90 s (33).

### ***Invensys Rail Group SIRIUS***

Systém SIRIUS byl navržen společností Invensys Rail Group. Tento systém nemá žádný záložní systém a pro detekci vzniku poruchy používá komparaci výsledků mezi nezávislými větvemi ZZ. Přesněji se jedná o logiku dva ze tří. Pro komunikaci mezi vlakovou a traťovou částí zabezpečovacího zařízení se používá rádiové spojení. Poloha vlaku se určuje pomocí pasivních balíz, které mají přesně definovanou polohu. Poloha vlaku mezi balízami se určuje pomocí čidel a Dopplerova radaru. Tento systém dosahuje teoretického intervalu 80 s (33).

### ***Ansaldo STS***

Systém CBTC dodávaný firmou Ansaldo STS nemá žádný jiný obchodní název jako u ostatních výrobců CBTC. Tento systém rovněž využívá ke komunikaci mezi vlakovou

a traťovou částí zabezpečovacího zařízení rádiovou sítí dle standardu IEEE 802.11. Zjišťování polohy vlaku probíhá pomocí fixních balíků a odometrických čidel na vlaku. Pro případ poruchy nebo pro případ jízdy nevybaveného vlaku se k přibližnému určení polohy využívá kolejových obvodů. Systém dosahuje teoretického minimálního intervalu mezi vlaky o hodnotě méně než 60 s. V provozu se však používá špičkový interval minimálně 90 s (33).

### ***Siemens Trainguard MT***

Zabezpečovací zařízení dodávané společností Siemens se nazývá Trainguard MT. Toto ZZ umožňuje smíšený provoz vlaků. To znamená, že po tratích vybavených tímto systémem se mohou pohybovat soupravy vybavené palubní částí CBTC, ale i soupravy tímto zařízením nevybavené. Komunikaci mezi traťovou a palubní částí CBTC zprostředkovává subsystém Airlink, který umožňuje obousměrnou datovou komunikaci. Tento subsystém využívá frekvenci 2,4 GHz (33).

Pro určení polohy a rychlosti vlaku se zde používá palubního Dopplerova radaru a odometrických čidel. Navíc systém Trainguard MT používá počítačů náprav pro bezpečnou detekci volnosti traťových oddílů. V komerčním provozu tento systém dosahuje špičkového minimálního intervalu 80 s (33).

### ***Hitachi CBTC***

Dalším dodavatelem ZZ je japonská společnost Hitachi. Toto ZZ umožňuje zcela bezobslužný provoz vlaků (GoA4). Komunikace mezi traťovou a vlakovou částí je zprostředkována pomocí rádiové sítě na frekvenci 2,4 GHz. Pro případ poruchy, případně pro případ jízdy vlaku nevybaveného palubní částí CBTC jsou tratě vybaveny kolejovými obvody pro bezpečnou detekci obsazení jednotlivých traťových oddílů. V provozu tento systém dosahuje minimálního intervalu mezi vlaky o hodnotě 120 s (36).



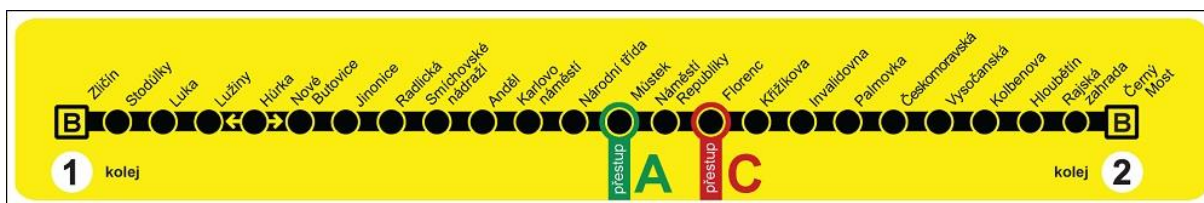
## 4 PARAMETRY VOZIDEL A TRATI

V této kapitole jsou obecně popsány základní charakteristiky tratě metra B a používaných vozidel. Dále jsou popsány konkrétní charakteristiky, které jsou nutné pro vytvoření simulace provozu, včetně charakteristiky použitého staničního, traťového a vlakového zabezpečovacího zařízení ARS.

### 4.1 Trať a stanice metra B

Projekt trasy B začal vznikat už v roce 1970. K zahájení stavby prvního provozního úseku I. B došlo v roce 1979 a byl uveden do provozu v roce 1985. Tento provozní úsek měl 5,410 km a 7 stanic. Tento úsek vedl ze stanice Smíchovské nádraží do stanice Florenc B. V roce 1988 byl zahájen provoz na třetím provozním úseku III. B mezi stanicemi Smíchovské nádraží – Nové Butovice o délce 5,006 km. V roce 1990 byl zahájen provoz na druhém provozním úseku II. B mezi stanicemi Florenc B – Českomoravská o délce 4,505 km. Pátý provozní úsek V. B byl uveden do provozu v roce 1994. Tento úsek vede ze stanice Nové Butovice do stanice Zličín. Spolu s výstavbou pátého provozního úseku probíhala i výstavba depa Zličín, které slouží pro deponování a údržbu vozidel používaných na trase B. Posledním provozním úsekem je úsek IV. B mezi stanicemi Českomoravská a Černý Most. Tento úsek má délku 6,447 km (37).

Trasa metra B má v současné době celkem 24 stanic a provozní délku 25,78 km (37). Jedná se tedy o nejdelší trasu metra v Praze. Maximální podélný sklon trati je 39,925 ‰. Minimální poloměr oblouků je 150 m. Pro tvorbu simulačního modelu byla použita data z orientačního schématu místních poměrů trasy B, kde jsou vyznačeny kilometrické polohy jednotlivých bodů, ve kterých se mění rozhodné parametry trati. Zároveň jsou v tomto schématu uvedeny kilometrické polohy jednotlivých výhybek, kolejových křižovatek, izolovaných styků a návěstidel (39). Schéma linky pražského metra B je uvedeno na obrázku 6.



Obrázek 6 Schéma linky B

**Zdroj: (38)**

V tabulce 2 jsou uvedeny jízdní doby a délky jednotlivých mezistaničních úseků. Kromě údajů uvedených v tabulce je pro tvorbu jízdního řádu pro model provozu na trase B důležitá i délka pobytu v jednotlivých stanicích. Pro stanice s menší frekvencí cestujících je používána jednotná délka pobytu 20 s. V obratových stanicích a ve významných přestupních uzlech je

délka pobytu prodloužena na 30 s. Mezi stanice s délkou pobytu 30 s patří: Zličín, Nové Butovice, Smíchovské nádraží, Anděl, Můstek B, Florenc B, Českomoravská, Vysočanská a Černý Most.

**Tabulka 2 Jízdní doby a délky mezistaničních úseků**

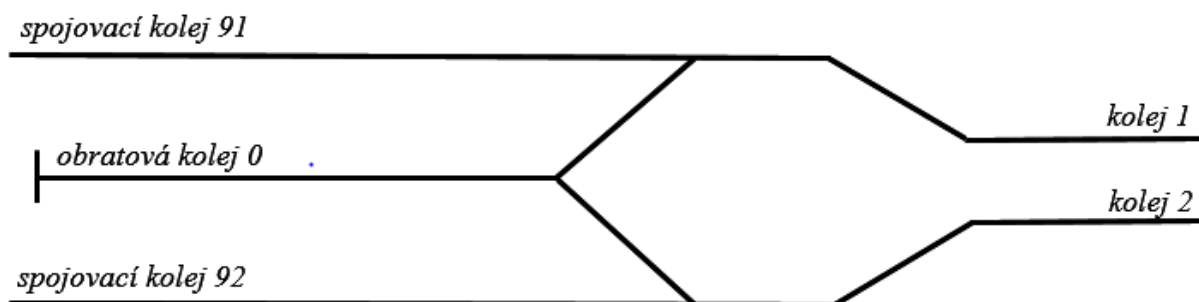
Mezistaniční úsek	Jízdní doba tam (s)	Jízdní doba zpět (s)	Délka (m)
Zličín (ZL) – Stodůlky (SD)	105	100	1460
Stodůlky (SD) – Luka (LK)	80	80	1130
Luka (LK) – Lužiny (LZ)	60	60	700
Lužiny (LZ) – Hůrka (HU)	80	90	1150
Hůrka (HU) – Nové Butovice (NB)	60	65	680
Nové Butovice (NB) – Jinonice (JI)	95	100	1370
Jinonice (JI) – Radlická (RD)	95	100	1420
Radlická (RD) – Smíchovské nádraží (SN)	140	140	2160
Smíchovské nádraží (SN) – Anděl (AN)	85	90	1100
Anděl (AN) – Karlovo náměstí (KN)	90	90	1220
Karlovo náměstí (KN) – Národní třída (NA)	60	60	640
Národní třída (NA) – Můstek B (MSB)	50	55	490
Můstek B (MSB) – Náměstí republiky (NR)	70	70	800
Náměstí republiky (NR) – Florenc B (FRB)	55	55	550
Florenc B (FRB) – Křížíkova (KR)	80	80	1090
Křížíkova (KR) – Invalidovna (IN)	75	80	970
Invalidovna (IN) – Palmovka (PA)	90	90	1170
Palmovka (PA) – Českomoravská (CE)	90	90	1270
Českomoravská (CE) – Vysočanská (VS)	65	65	800
Vysočanská (VS) – Kolbenova (KL)	80	80	1120
Kolbenova (KL) – Hloubětín (HL)	105	100	1540
Hloubětín (HL) – Rajská zahrada (RZ)	115	110	1750
Rajská zahrada (RZ) – Černý Most (CM)	90	85	1190
<b>Celkem</b>	<b>1915</b>	<b>1935</b>	<b>25770</b>

**Zdroj: (39, autor)**

Z hlediska provozu jsou významné především stanice s kolejovým rozvětvením, kde dochází k obrátům souprav a manipulaci se soupravami. Jedná se o těchto 6 stanic: Zličín, Nové Butovice, Smíchovské Nádraží, Florenc B, Českomoravská a Černý Most.

### **Stanice Zličín**

Stanice Zličín je vybavena jednou obratovou kolejí a dvěma spojovacími koleji do depa Zličín. Obratová kolej slouží pouze pro obraty souprav a pro odstavování souprav se nevyužívá. Tato kolej je zároveň vybavena služební lávkou. Využitelná délka obratové koleje je 190 m (40). Kolejové schéma stanice je uvedeno na obrázku 7.

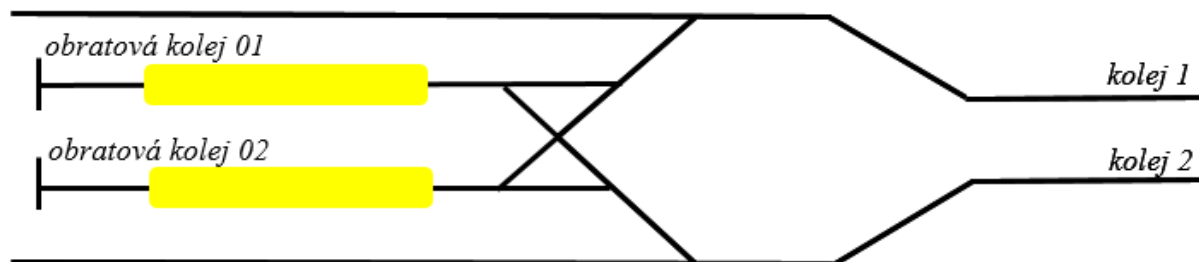


**Obrázek 7** Kolejové schéma stanice Zličín

Zdroj: (40), autor

### **Stanice Nové Butovice**

Stanice Nové Butovice je vybavena dvěma obratovými kolejemi, které mohou být využity i pro odstavování souprav. Využitelná délka každé z těchto kolejí je 169 m. Kolejje jsou rovněž vybaveny služební lávkou (40). Místa pro možné odstavení souprav jsou v kolejovém schématu stanice na obrázku 8 znázorněna žlutým obdélníkem.

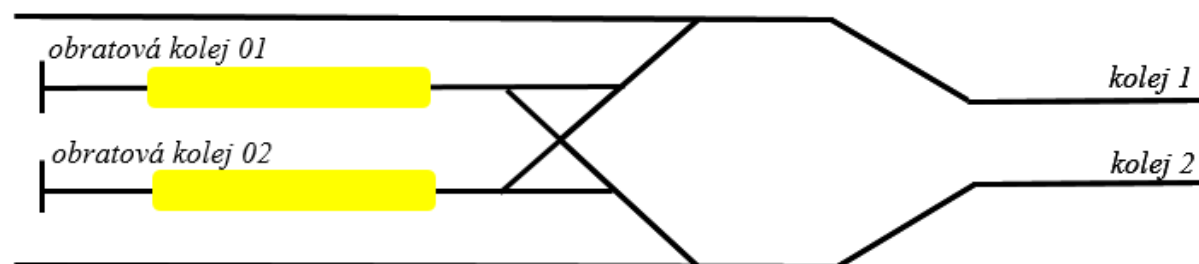


**Obrázek 8** Kolejové schéma stanice Nové Butovice

Zdroj: (40), autor

### **Stanice Smíchovské nádraží**

Stanice Smíchovské nádraží je také vybavena dvěma obratovými kolejemi se služební lávkou. Využitelná délka obou kolejí je 158 m (40). Místo pro možné odstavení souprav je znázorněno v kolejovém schématu na obrázku 9 žlutým obdélníkem.



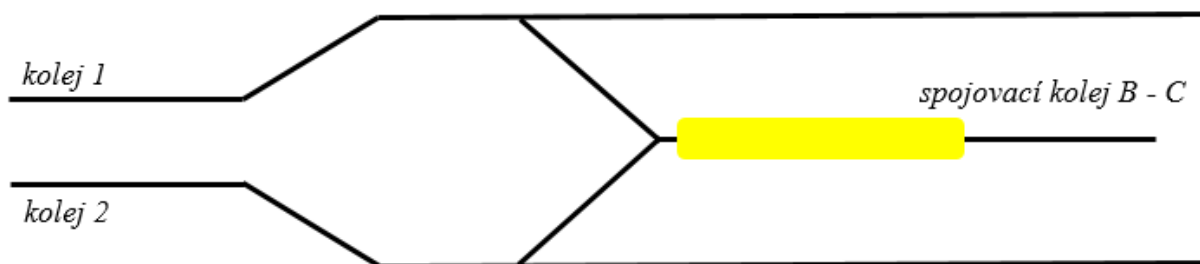
**Obrázek 9** Kolejové schéma stanice Smíchovské nádraží

Zdroj: (40), autor

### **Stanice Florenc B**

Stanice Florenc B je přestupní stanicí mezi linkou C a linkou B. Stanice je vybavena spojovací kolejí pro vzájemné propojení obou linek. Tato spojovací kolej je vybavena služební lávkou a lze ji využít pro obracení souprav i pro krátkodobé odstavení souprav. Využitelná

délka koleje pro obrat a odstavení souprav je 243 m (40). Místo pro možné odstavení souprav je znázorněno v kolejovém schématu na obrázku 10 žlutým obdélníkem.

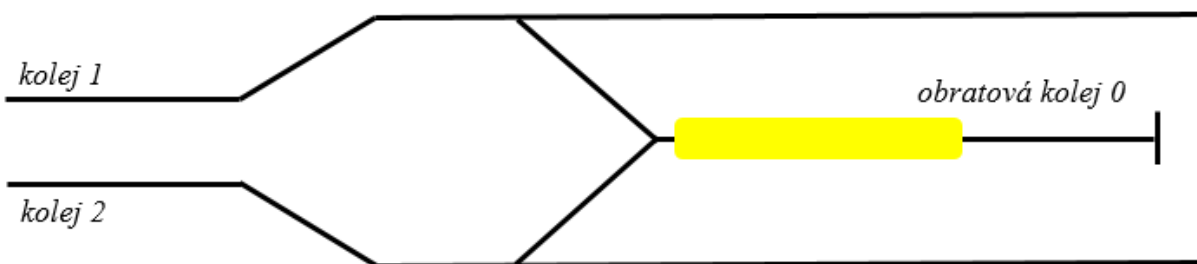


Obrázek 10 Kolejové schéma stanice Florenc B

Zdroj: (40), autor

### **Stanice Českomoravská**

Stanice Českomoravská je vybavena jednou obratovou kolejí. Kolej je také vybavena služební lávkou a lze ji využít pro obraty souprav i pro odstavení souprav. Využitelná délka koleje 0 je 165 m (40). Místo pro možné odstavení soupravy je znázorněno žlutým obdélníkem ve schématu stanice na obrázku 11.

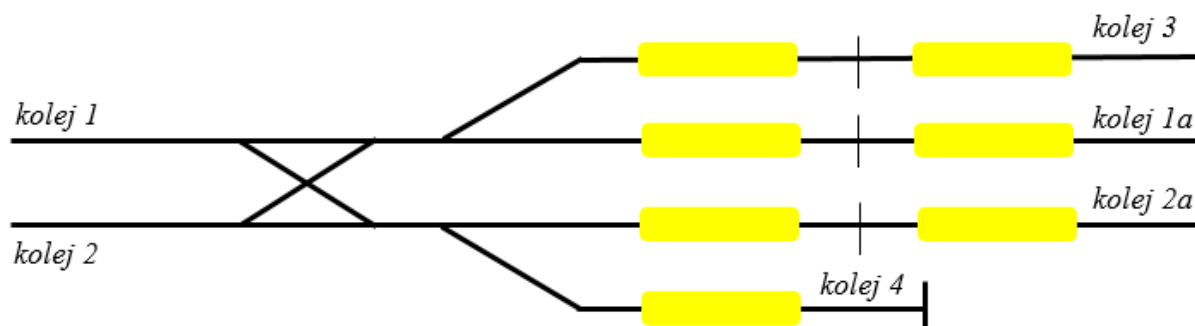


Obrázek 11 Kolejové schéma stanice Českomoravská

Zdroj: (40), autor

### **Stanice Černý Most**

Stanice Černý Most je vybavena čtyřmi kolejemi, na kterých je možné provádět odstavení a obraty souprav. Všechny koleje jsou vybaveny služební lávkou. V této stanici je možné odstavit až sedm souprav. Využitelná délka kolejí 3, 1a a 2a je 204 m. Tyto koleje jsou v polovině své délky rozděleny návěstidly a každá z nich umožňuje odstavení dvou souprav. Kolej 4 má využitelnou délku 127 m a lze ji využít pro odstavení jedné soupravy (40). Kolejové schéma se žlutě vyznačenými místy pro odstavení souprav je uvedeno na obrázku 12.



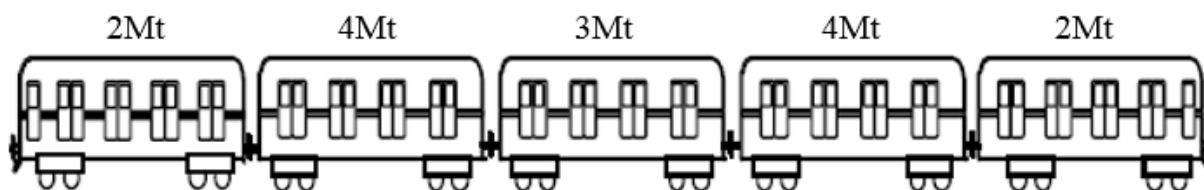
Obrázek 12 Kolejové schéma stanice Černý Most

Zdroj: (40), autor

## 4.2 Souprava 81 – 71 M

Rekonstruovaná souprava 81 – 71 M vznikla rekonstrukcí původních souprav 81 – 71, které byly sovětské výroby. Rekonstrukce souprav byla zadána konsorciu firem Škoda a. s. Plzeň a ČKD Praha Holding a. s. První rekonstruovaná souprava byla dodána v roce 1996. Vozy byly vybaveny zcela novou elektroinstalací a elektrickou výzbrojí. Z původní trakční výzbroje byly ponechány pouze trakční motory. Upraven byl i celkový vzhled soupravy. V současnosti tato souprava obsluhuje linku A a linku B (37, s. 106 – 108).

Souprava 81 – 71 M je tvořena třemi typy vozů. Vůz 2Mt je čelní motorový vůz s kabinou strojvedoucího, bateriemi a vlakovou částí zabezpečovacího zařízení. Vůz 3Mt je vložený motorový vůz s bateriemi a je řazen uprostřed soupravy. Vůz označovaný 4Mt je motorový vůz s instalovaným kompresorovým ústrojím a je řazen na druhé a čtvrté pozici v soupravě (41). Řazení soupravy je uvedeno na obrázku 13.



Obrázek 13 Řazení soupravy 81 - 71M

Zdroj: (42), autor

Z důvodů pevně daného řazení souprav a rozdílného vybavení vozů je možný provoz pouze ucelených souprav s pěti vozy. Soupravy je možné v případě provozní nutnosti (například porucha soupravy) spřáhat, protože čelní vozy jsou vybaveny poloautomatickým spřáhlem. Vozy jsou vybaveny rozsáhlou pneumatickou výstrojí, která je napájena šroubovými kompresory. Ovládání samočinné průběžné brzdy je zajištěno brzdícím DAKO BSE. Pro běžné brzdění se používá elektrodynamická brzda s možností rekuperace. Soupravy jsou vybaveny

trakční výzbrojí s pulzní regulací. Pro zabezpečení jízdy vlaku jsou soupravy vybaveny vlakovým zabezpečovačem ARS (na trase B) a systémem Matra PA 135 (na trase A) (41).

### **Základní parametry soupravy 81 – 71 M**

Mezi základní uvažované parametry soupravy patří zejména rozměry, hmotnosti a rychlostní parametry. Tyto veličiny jsou uvedeny v tabulce 3.

**Tabulka 3 Základní parametry soupravy 81 - 71M**

Parametr	Hodnoty			Jednotky
	2Mt	3Mt	4Mt	
Délka soupravy	96 426			mm
Hmotnost prázdné soupravy	157 910			kg
Hmotnost soupravy se zátěží (6 os·m <sup>-2</sup> )	235 610			kg
Hmotnost soupravy se zátěží (8 os·m <sup>-2</sup> )	255 860			kg
Hmotnost ekvivalentní rotačním hmotám	26 228			kg
Maximální zátěž (8 os·m <sup>-2</sup> )	97 950			kg
Konstrukční rychlost	90			km·h <sup>-1</sup>
Maximální rychlost	80			km·h <sup>-1</sup>
Počet míst k sezení	230			cestujících
Počet míst k stání (8 os·m <sup>-2</sup> )	1088			cestujících
Celková kapacita soupravy	1318			cestujících
	2Mt	3Mt	4Mt	
Minimální hmotnost prázdného vozu	31 930	31 350	31 350	kg
Maximální zátěž vozu (8 os·m <sup>-2</sup> )	19 050	19 950	19 950	kg
Maximální hmotnost vozu se zátěží (8 os·m <sup>-2</sup> )	50 980	51 300	51 300	kg
Délka vozu se spřáhly	19 398	19 210	19 210	mm

Zdroj: (41, 42), autor

### **Trakční charakteristiky soupravy 81 – 71M**

Pro plnohodnotnou simulaci jsou zásadním vstupním parametrem trakční charakteristiky soupravy. V tabulce 4 jsou uvedeny trakční charakteristiky použité při sestavě simulačního modelu. Hodnoty zrychlení odpovídají hodnotám síly a jsou vypočteny pomocí nominální hodnoty hmotnosti vlaku se zátěží a nominální hodnoty hmotnosti ekvivalentní rotačním hmotám. Uvedené hodnoty jsou stanoveny pro hodnotu trakčního napětí 750 V (42).

**Tabulka 4 Hodnoty garantované trakční síly a zrychlení (81 – 71M)**

Rychlost	Hodnoty garantované trakční síly			Hodnoty zrychlení		
	0 os·m <sup>-2</sup>	6 os·m <sup>-2</sup>	8 os·m <sup>-2</sup>	0 os·m <sup>-2</sup>	6 os·m <sup>-2</sup>	8 os·m <sup>-2</sup>
km·h <sup>-1</sup>	kN	kN	kN	m·s <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>
0	250,4	353,3	381	1,36	1,35	1,35
5	250,4	353,3	381	1,36	1,35	1,35
10	250,4	353,3	381	1,36	1,35	1,35
15	250,4	353,3	381	1,36	1,35	1,35
20	250,4	353,3	381	1,36	1,35	1,35
25	250,4	353,3	381	1,36	1,35	1,35
30	250,4	353,3	353,3	1,36	1,35	1,25
35	250,4	293,2	293,2	1,36	1,12	1,04
40	250,4	251,8	251,8	1,36	0,96	0,89
45	225,2	225,2	225,2	1,22	0,86	0,8
50	171	171	171	0,93	0,65	0,61
55	136	136	136	0,74	0,52	0,48
60	111	111	111	0,6	0,42	0,39
65	95	95	95	0,52	0,36	0,34
70	84	84	84	0,46	0,32	0,3
75	76	76	76	0,41	0,29	0,27
80	70	70	70	0,38	0,27	0,25

**Zdroj: (42)**

Další důležitou hodnotou související s trakční charakteristikou je doba přechodu mezi výběhem a trakcí. Doba přechodu se skládá z doby zpoždění a doby náběhu. Doba zpoždění je doba mezi okamžikem vydání povelu a okamžikem, kdy je hodnota zrychlení rozdílná od hodnoty zrychlení odpovídající výběhu (0 m·s<sup>-1</sup>). Hodnota doby zpoždění mezi režimem výběhu a trakce je **0,375 s** (±0,075 s). Doba náběhu je doba, která uplyne od okamžiku, kdy je hodnota zrychlení rozdílná od hodnoty zrychlení odpovídající výběhu a okamžikem, kdy hodnota zrychlení dosáhne maximálního zrychlení. Hodnota doby náběhu pro zrychlení 0 – 40 km·h<sup>-1</sup> je **1,36 s** (±10 %) (42).

#### **Brzdné charakteristiky soupravy 81 – 71M**

Brzdné charakteristiky použité pro tvorbu simulačního modelu jsou uvedeny v tabulce 5. Hodnoty zrychlení uvedené v tabulce 5 odpovídají hodnotám síly a jsou vypočteny

pomocí nominální hodnoty hmotnosti vlaku se zátěží a nominální hmotnosti ekvivalentní rotačním hmotám.

**Tabulka 5 Hodnoty garantované brzdné síly a zrychlení (81 – 71M)**

Rychlost	Hodnoty garantované brzdné síly			Hodnoty zrychlení		
	0 os·m <sup>-2</sup>	6 os·m <sup>-2</sup>	8 os·m <sup>-2</sup>	0 os·m <sup>-2</sup>	6 os·m <sup>-2</sup>	8 os·m <sup>-2</sup>
km·h <sup>-1</sup>	kN	kN	kN	m·s <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	-217,00	-308,20	-329,60	-1,18	-1,18	-1,17
10	-216,90	-308,10	-329,40	-1,18	-1,18	-1,17
15	-216,70	-307,70	-329,00	-1,18	-1,18	-1,17
20	-216,40	-307,20	-328,50	-1,18	-1,17	-1,16
25	-216,00	-306,50	-327,80	-1,17	-1,17	-1,16
30	-215,50	-305,80	-327,00	-1,17	-1,17	-1,16
35	-214,80	-304,90	-326,00	-1,17	-1,16	-1,16
40	-214,10	-303,90	-324,90	-1,16	-1,16	-1,15
45	-213,10	-302,70	-323,60	-1,16	-1,16	-1,15
50	-212,00	-301,40	-322,20	-1,15	-1,15	-1,14
55	-211,20	-299,90	-320,60	-1,15	-1,15	-1,14
60	-210,40	-298,30	-318,90	-1,14	-1,14	-1,13
65	-209,20	-296,50	-317,00	-1,14	-1,13	-1,12
70	-208,00	-294,70	-315,00	-1,13	-1,13	-1,12
75	-206,60	-292,60	-312,80	-1,12	-1,12	-1,11
80	-205,20	-290,50	-310,60	-1,11	-1,11	-1,10

**Zdroj: (42)**

Pro provozní brzdění soupravy 81 – 71M se používá elektrodynamická brzda. Doba přechodu na maximální elektrickou brzdu je nezávislá na aktuální hmotnosti soupravy. Doba zpoždění mezi zadáním povelu a reakcí brzdy je **0,310 s**. Doba náběhu brzdy na 100 % brzdného účinku je **1,18 s** (42).

Vozy jsou vybaveny i nouzovou brzdou. Pro nouzovou brzdu je garantována minimální hodnota zrychlení **-0,94 m·s<sup>-2</sup>**. Tato garantovaná minimální hodnota počítá s nejhorsími uvažovanými adhezními podmínkami a poruchou brzd na jednom z vozů soupravy (42).



### ***Jízdní odpory soupravy 81 – 71M***

Jízdní odpory použité v simulaci se dělí na odpor jízdy ve vodorovné přímce a odpor jízdy v oblouku. Odpor jízdy ve vodorovné přímce je stanoven rovnicí uvedenou ve vzorci 1.

$$W_0 = A + kBv^2 \quad (1)$$

kde:

$W_0$  – jízdní odpor v rovině [N/kN]

A – koeficient o hodnotě 2,5

B – koeficient o hodnotě 0,0012

k – koeficient odporu jízdy v tunelu o hodnotě 1

v – rychlost [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ]

**Zdroj: (42)**

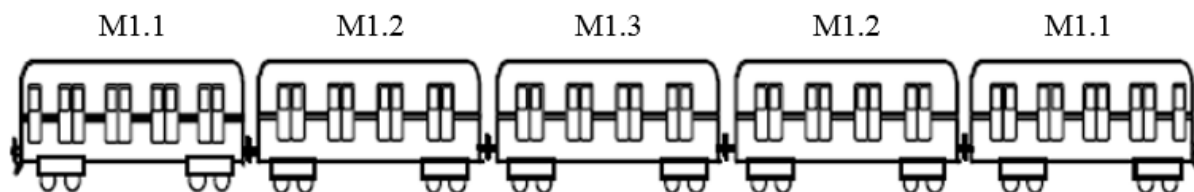
Jízdní odpor v oblouku je určen přednastaveným výpočtem v softwaru OpenTrack, který tento odpor počítá pomocí funkce *Strahl's formula*.

### **4.3 Souprava M1**

Soupravy typu M1 jsou nejmodernějšími soupravami provozovanými na síti pražského metra. Vznik jednotek M1 souvisí s přirozeným zastaráváním vozového parku a dalším rozšiřováním sítě pražského metra. Jednotky nahradily především dosluhující vozy sovětské výroby, konkrétně typ Ečs. Zadání zakázky na nové soupravy bylo svěřeno konsorciu firem ČKD – AEG – Siemens – SGP. Model nového vozu byl veřejnosti představen v březnu roku 1996. Dne 8. července 1998 bylo provedeno oživení první jednotky typu M1 v depu Kačerov. Následně dne 23. července 1998 proběhla první samostatná zkušební jízda soupravy s vlastním pohonem. Dne 27. ledna 2000 proběhla první zkušební jízda s cestujícími. Typ M1 byl homologován dne 14. května 2001. V roce 2009 bylo vyrobeno posledních 5 souprav tohoto typu, čímž se zvýšil jejich celkový počet na 53 souprav (37, s. 122 – 123).

Soupravy jsou řazeny jako pětivozové se dvěma čelními (M 1.1) a třemi vloženými vozy (M1.2 a M1.3). Vzhledem k rozdílné výbavě každého vozu jsou jednotky v provozu nedělitelné. Vozy jsou navíc v běžném provozu vzájemně neprůchozí. Vozy M1.1 jsou vybaveny stanovištěm strojvedoucího, tachografem, mobilní částí zabezpečovacího zařízení, trakčním kontejnerem, baterií palubní sítě a statickým měničem pro pohon pomocných agregátů. Vozy M1.2 jsou vybaveny trakčním kontejnerem a kompresorem. Vozy M1.3 se nachází uprostřed soupravy a jsou vybaveny trakčním kontejnerem a centrálním řídicím počítačem. Každý vůz je vybaven trakční výzbrojí a pneumatickou brzdou. Vozy jsou vzájemně propojeny komunikační linkou, která tvoří páteř řídicího systému SIBAS. Vozy mají trakční

výzbroj s třífázovými asynchronními trakčními motory s elektronickým řízením (43). Řazení souprav M1 je uvedeno na obrázku 14.



Obrázek 14 Řazení soupravy M1

Zdroj: (44), autor

U jednotek M1 bylo zároveň použito nové příčné uspořádání sedadel. Soupravy M1 dosahují při obsazenosti  $8 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$  kapacity 1240 stojících a 224 sedících cestujících (44).

### Základní parametry soupravy M1

Mezi základní uvažované parametry soupravy patří zejména rozměry, hmotnosti a rychlostní parametry. Základní údaje použité pro simulaci provozu jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Základní parametry soupravy M1

Parametr	Hodnoty			Jednotky
Délka soupravy	96 660			mm
Hmotnost prázdné soupravy	133 200			kg
Hmotnost soupravy se zátěží ( $6 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ )	219 750			kg
Hmotnost soupravy se zátěží ( $8 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ )	243 000			kg
Maximální zátěž ( $8 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ )	109 800			kg
Hmotnost ekvivalentní rotačním hmotám	19 360			kg
Konstrukční rychlost	90			$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
Maximální rychlost	80			$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
Počet míst k sezení	224			cestujících
Počet míst k stání ( $8 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ )	1 240			cestujících
Celková kapacita soupravy	1 464			cestujících
	<b>M1.1</b>	<b>M1.2</b>	<b>M1.3</b>	
Minimální hmotnost prázdného vozu	27 900	25 900	25 600	kg
Maximální zátěž vozu ( $8 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ )	21 150	22 500	22 500	kg
Maximální hmotnost vozu se zátěží ( $8 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ )	49 050	48 400	48 100	kg
Délka vozu	19 521	19 206	19 206	mm

Zdroj: (45), autor

### **Trakční charakteristiky soupravy M1**

Trakční charakteristiky k soupravě M1 jsou stanoveny pouze pro prázdnou soupravu a soupravu s maximálním obsazením 8 os·m<sup>-2</sup>. Hodnoty zrychlení odpovídají hodnotám síly a jsou vypočteny pomocí nominální hodnoty hmotnosti vlaku se zátěží a nominální hodnoty hmotnosti ekvivalentní rotačním hmotám (45). Trakční charakteristiky použité jako podklad pro simulaci jsou uvedeny v tabulce 7.

**Tabulka 7 Hodnoty garantované trakční síly a zrychlení (M1)**

Rychlost	Hodnoty garantované trakční síly		Hodnoty zrychlení	
	0 os·m <sup>-2</sup>	8 os·m <sup>-2</sup>	0 os·m <sup>-2</sup>	8 os·m <sup>-2</sup>
km·h <sup>-1</sup>	kN	kN	m·s <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>
0	208,67	356,66	1,30	1,29
2,5	208,67	356,66	1,30	1,29
5	208,67	356,66	1,30	1,29
10	208,67	356,66	1,30	1,29
15	208,67	356,66	1,30	1,29
20	208,67	356,66	1,30	1,29
25	208,67	356,66	1,30	1,29
30	208,67	356,66	1,30	1,29
35	178,60	305,26	1,11	1,11
40	156,50	267,50	0,98	0,97
45	139,32	238,13	0,87	0,86
50	125,20	214,00	0,78	0,78
55	113,54	194,07	0,71	0,70
60	104,34	178,33	0,65	0,65
65	96,36	164,69	0,60	0,60
70	89,61	153,16	0,56	0,56
75	83,47	142,67	0,52	0,52
80	78,56	134,27	0,49	0,40

**Zdroj: (45)**

Doba přechodu mezi režimem výběhu a trakce se stejně jako u soupravy 81 – 71M skládá z doby zpoždění a doby náběhu na 100 % garantované trakční síly. Doba zpoždění garantovaná výrobcem soupravy je **0,2 s** (±10 %). Maximální hodnota doby náběhu na 100 % trakce, je **1,533 s** u prázdné soupravy a **1,523 s** u maximálně obsazené soupravy při toleranci ±15 % (45).

### **Brzdné charakteristiky soupravy M1**

Brzdné charakteristiky soupravy M1, které byly použity pro tvorbu simulačního modelu, jsou uvedeny v tabulce 8. Hodnoty zrychlení uvedené v tabulce 8 odpovídají hodnotám síly a jsou vypočteny pomocí nominální hodnoty hmotnosti vlaku se zátěží a nominální hmotnosti ekvivalentní rotačním hmotám. Hodnoty garantované brzdné síly nejsou pro soupravu M1 k dispozici, proto jsou v tabulce 8 uvedeny pouze hodnoty zrychlení.

**Tabulka 8 Hodnoty zrychlení pro provozní brzdu soupravy M1**

	<b>Hodnoty zrychlení</b>	
<b>Rychlost</b>	<b>0 os·m<sup>-2</sup></b>	<b>8 os·m<sup>-2</sup></b>
km·h <sup>-1</sup>	m·s <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>
0	-1,38	-1,37
2,5	-1,38	-1,37
5	-1,38	-1,37
10	-1,38	-1,37
15	-1,38	-1,37
20	-1,38	-1,37
25	-1,38	-1,37
30	-1,38	-1,37
35	-1,38	-1,37
40	-1,38	-1,37
45	-1,38	-1,37
50	-1,38	-1,37
55	-1,38	-1,37
60	-1,38	-1,37
65	-1,27	-1,26
70	-1,18	-1,18
75	-1,10	-1,10
80	-1,03	-1,03

**Zdroj: (45)**

Pro provozní brzdění se u soupravy M1 používá elektrodynamická brzda. Pro rychlosti nižší než 10 km·h<sup>-1</sup> se používá pneumatická brzda. Doba čistého zpoždění reakce elektrické brzdy je **0,2 s**. Maximální doba náběhu na 100 % brzdné síly je **1,623 s** (±15 %) pro prázdnou soupravu a **1,613 s** (±15 %) pro maximálně obsazenou soupravu (45).

Vozy soupravy M1 jsou také vybaveny nouzovou brzdou. Pro tuto nouzovou brzdu je garantována minimální hodnota zrychlení  $-0,94 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  (45).

#### ***Jízdní odpory soupravy M1***

Jízdní odpor pro jízdu v oblouku je stejně jako u soupravy 81 – 71M určen přednastaveným výpočtem v programu OpenTrack. Konkrétně funkcí *Strahl's formula*. Jízdní odpor při jízdě v přímce brzdou nebo trakcí je dán rovnicí uvedenou ve vzorci 2.

$$W_0 = 1,16 + 0,0088 \cdot v + 0,156 \cdot v^2 \cdot m^{-1} \quad (2)$$

kde:

$W_0$  – jízdní odpor v rovině [N/kN]

$v$  – rychlost [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ]

$m$  – hmotnost [t]

**Zdroj: (45)**

#### **4.4 Zabezpečovací zařízení na trase B**

Staniční a traťové zabezpečovací zařízení, zabezpečující provoz na tratích a ve stanicích s kolejovým rozvětvením, je typu AŽD 71 speciálně upravené pro metro. Pro možnost dálkové obsluhy zabezpečovacího zařízení z centrálního dispečinku je zřízena elektronická nadstavba reléového zabezpečovacího zařízení (38, s. 123 – 124).

##### ***Vlakový zabezpečovač ARS***

Pro simulaci provozu na trase B jsou důležité zejména charakteristiky vlakového zabezpečovacího zařízení ARS. Toto ZZ sovětské výroby bylo původně instalováno na všech linkách pražského metra, postupně však dochází k jeho nahrazování modernějšími systémy. Na trase B v současné době (r. 2017) dochází k jeho náhradě za ZZ typu LZA. Jako podklad pro tvorbu modelu slouží parametry ZZ ARS, kterým je trasa v současné době vybavena.

Vlakový zabezpečovač ARS je liniový vlakový zabezpečovač. To znamená, že rychlost vlaku je zařízením kontrolována nepřetržitě ve všech bodech trati. Toto ZZ umožňuje následný interval vlaků **90 s**, což umožňuje maximální teoretickou propustnost **40 párů vlaků za hodinu**. Zařízení zajišťuje bezpečné zastavení vlaků před obsazeným nebo porouchaným kolejovým obvodem nebo pře návěstidlem s návěstí STŮJ (kromě návěsti TABULKA S VYKŘIČNÍKEM na absolutním návěstidle). Vlakový zabezpečovač zároveň kontroluje rychlost vlaku v jednotlivých kolejových obvodech. Zabezpečovací zařízení ARS se skládá z traťové a mobilní části (46).

Traťová část tohoto liniového zabezpečovače využívá principu dodatečného kódování. To znamená, že pokud nejsou kolejové obvody obsazeny (zašuntovány), tak je připojena pouze

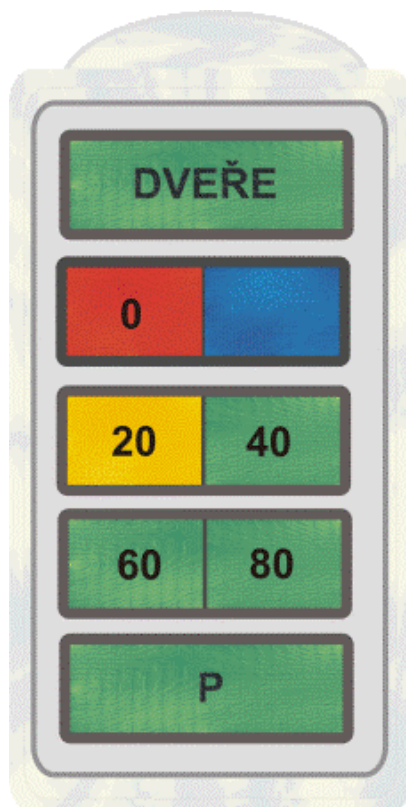
základní výstroj a je kódován základní signální kmitočet 275 Hz. Po obsazení kolejového obvodu čelním vozem vlaku začne kolejový obvod signální kmitočet pro příslušný rychlostní stupeň. Generování příslušných kmitočetů zabezpečuje generátor automatické lokomotivní signalizace (GALS). GALS vysílá rychlostní kmitočty na základě vybuzení příslušných rychlostních relé. Rychlostní relé jsou připojovány podle definovaných závislostí tj. volnost následujících kolejových obvodů v součinnosti s předdefinovanými zábrzdými vzdálenostmi podle projektu. Připojení příslušných rychlostních relé a generovaný kmitočet je uvedeno v tabulce 9. Rychlosti, které mají být kódovány v jednotlivých kolejových obvodech, na základě obsazení následujících kolejových obvodů, jsou uvedeny v kódovacích tabulkách. Traťová část zabezpečovače ARS zároveň zabezpečuje splnění úplné blokové podmínky. To znamená, že kromě uvolnění obsazeného kolejového obvodu musí být obsazen kolejový obvod následující (46, 47).

**Tabulka 9 Generování kmitočetů na základě požadované rychlosti**

Rychlost (km/h)	Vybuzené rychlostní relé	Generovaný kmitočet (Hz)
0	-	275
20	2R	225
40	2R, 4R	175
60	2R, 4R, 6R	125
80	2R, 4R, 6R, 8R	75

**Zdroj: (47)**

Mobilní část vlakového zabezpečovače přijímá a vyhodnocuje signály o povolené rychlosti v pojížděném kolejovém úseku a porovnává je se skutečnou rychlostí vlaku. V případě, že aktuální rychlost vlaku je vyšší než kódovaná rychlost, dojde k samočinnému snížení rychlosti vlaku. Jakýkoliv kmitočet rozdílný od předdefinovaných kmitočetů je vyhodnocen jako ztráta signálu. Okamžitá rychlost vlaku je určována pomocí osových tachogenerátorů. Každý čelní vůz je vybaven lokomotivním návěstidlem, které informuje strojvedoucího o dovolené rychlosti v příslušném kolejovém úseku a v následném kolejovém úseku. Vzhled lokomotivního návěstidla je na obrázku 15. Kromě lokomotivního návěstidla je součástí výstroje každého čelního vozu přístrojová skříň umístěná za kabinou strojvedoucího, snímací cívky umístěné před prvním dvojkolím vozu, osové generátory, ovládací řadič systému ARS a elektropneumatický ventil brzdného systému (46, 47).



**Obrázek 15** Lokomotivní návěstidlo ARS

**Zdroj:** (47)

Mobilní část ZZ ARS umožňuje sestavení řídicích vozových obvodů do režimu JÍZDA v případě, že:

- je přijímán povolující kmitočet a rychlost vlaku je nižší než povolená rychlost,
- je přijímán kmitočet zakazující jízdu nebo dojde ke ztrátě kódu a zároveň je stisknuto tlačítko bdělosti a rychlost vlaku je nižší než  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,
- došlo po překročení povolené rychlosti a zásahu brzdového systému k potvrzení této skutečnosti stiskem tlačítka bdělosti, přestavení páky řídicího kontroléru do nulové polohy a snížení rychlosti na požadovanou úroveň.

**Zdroj:** (46)

Zabezpečovací zařízení ARS dá povel k zásahu brzdy v případech, kdy:

- skutečná rychlost je vyšší než kódovaná rychlost,
- je přijímán povolující kmitočet a rychlost vlaku je stejná nebo nižší než povolená rychlost a zároveň jsou stisknuta tlačítka bdělosti,
- strojvedoucí nepotvrdil zásah ZZ při překročení rychlosti krátkodobým stiskem tlačítka bdělosti,
- je přijímán povolující kmitočet, ale souprava se do 7 – 9 sekund po zadání povelu k jízdě nerozjede (ochrana proti ujetí na spádu).

- je přijímán zakazující kmitočet a nejsou stisknuta tlačítka bdělosti,
- je přijímán zakazující kmitočet a jsou stisknuta tlačítka bdělosti, ale rychlost vlaku je vyšší než  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,
- je přijímán zakazující kmitočet a jsou stisknuta tlačítka bdělosti, při rychlosti nižší než  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , ale došlo ke ztrátě kódu (pro další jízdu je nutné tlačítka bdělosti uvolnit a opětovně stisknout).
- je přijímán povolující kmitočet  $75 - 175 \text{ Hz}$  a rychlost vlaku je nižší než  $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a jízdní páka není v jízdní poloze (parkování).

Zdroj: (46)

Význam jednotlivých kódů pro ARS a návěsti lokomotivního návěstidla jsou uvedeny v tabulce 10.

**Tabulka 10 Význam vysílaných kmitočtů a návěsti lokomotivního návěstidla**

Vysílaný kmitočet (Hz)					Svícení lokomotivního návěstidla		Význam pro ARS	
75	125	175	225	275	Plná intenzita	Snížená intenzita	Rychlost nyní ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	Rychlost následná ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )
S					80		80	0
S	N				80	60	80	60
S		N			80	40	80	40
S			N		80		80	0
S				N	80	P	80	80
	S				60		60	0
	S	N			60	40	60	40
	S		N		60	20	60	20
	S			N	60	P	60	>60
		S			40		40	0
		S	N		40	20	40	20
		S		N	40	P	40	>40
			S		20		20	0
			S	P	20	P	20	>20
				S	0		0	>0

S – kmitočet vysílaný v současném kolejovém obvodu  
N – kmitočet vysílaný z předvěstního obvodu

Zdroj: (46)



## 5 SIMULACE PROVOZNÍCH KONCEPTŮ

V této kapitole je obecně popsán software (SW) OpenTrack a postup tvorby simulačního modelu. Simulační model je vytvořen na základě parametrů popsaných v kapitole 4. Pro validaci modelu byl nejdříve sestaven a simulací ověřen tzv. ověřovací provozní koncept. Tento provozní koncept využívá principů konvenčního provozu vlaků se zjednodušeným konvenčním zabezpečovacím zařízením. Jízdní řád použitý pro ověřovací provozní koncept je vytvořen na základě analýzy skutečně používaného jízdního řádu. Na základě ověřovacího provozního konceptu byl simulační model upraven pro automatický provoz. Pro ověření možností automatického provozu byly sestaveny celkem čtyři provozní koncepty, jejichž popis a vyhodnocení je také předmětem této kapitoly.

### 5.1 Software OpenTrack

Software OpenTrack slouží pro simulaci provozu pro všechny druhy kolejové dopravy. Jedná se o produkt *Swiss Federal of Technology Institute for Transport Planning and Systems*. OpenTrack se používá především pro určování kapacity železničních tratí, případně jiné drážní infrastruktury, pro testování propustné výkonnosti, pro ověřování stability navrhovaných jízdních řádů a pro testování energetické náročnosti jízdy vlaku. Vstupními daty pro vytvoření simulačního modelu jsou data o infrastruktuře, o vozidlech a o jízdním řádu. Výstupem simulace jsou diagramy jízdy vlaku, statistiky, plány obsazení kolejí a nákrese jízdní řády.

Tento software je také nástrojem pro ověření možností nově navrhované infrastruktury, včetně úprav zabezpečovacího zařízení. Simulací v softwaru OpenTrack je možné odhalit omezující faktory, které vyplývají z navrhovaných změn. Pro ověření úprav technologie provozu a zabezpečovacího zařízení na trase B byl použit software OpenTrack verze 1.3, který je k dispozici ve školní laboratoři.

### 5.2 Postup vytvoření simulačního modelu v softwaru OpenTrack

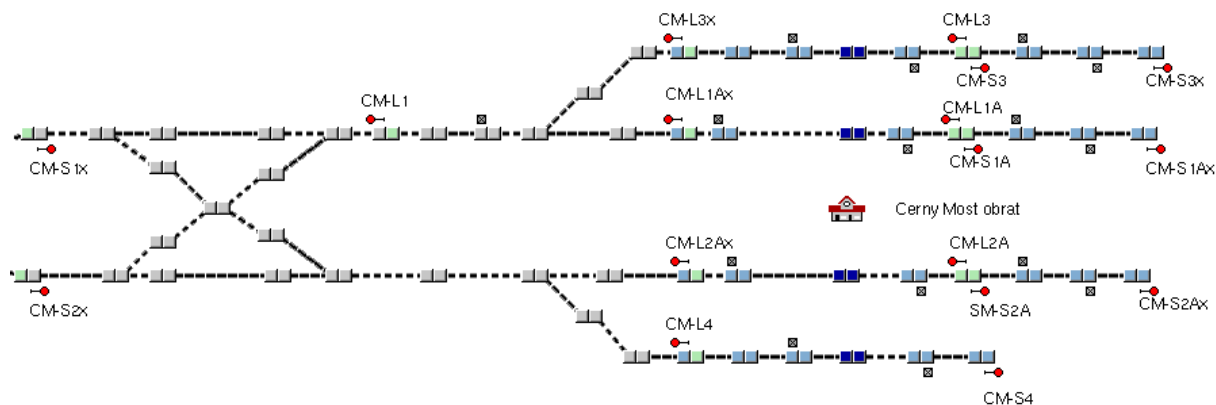
Vytvoření simulačního modelu je velmi časově náročná činnost. Pro možnost využití plně funkční simulace je zapotřebí zpracovat všechna potřebná vstupní data. Zejména se jedná o data o infrastruktuře, vozidlech, zabezpečovacím zařízení a jízdních cestách.

### ***Zadání parametrů infrastruktury***

Parametry infrastruktury se do modelu zadávají na jednotlivé pracovní listy. Základními prvky pro vkládání infrastruktury jsou dvoubody tzv.: *Vertex*, které reprezentují kilometrickou polohu míst na trati, kde se mění parametry trati, případně se zde nacházejí další rozhodné prvky infrastruktury. V případě, že se v daném místě mění sklon trati, poloměr oblouku nebo parametry tunelů, postačuje pouhé vložení kilometrické polohy tohoto místa. Vložení kilometrické polohy bez zadání dalších parametrů dvoubodu se používá také pro vkládání výhybek a námezníků výhybek. Pro tvorbu tohoto simulačního modelu byla použita data o infrastruktuře vycházející z orientačního schématu místních poměrů trasy B (40). Vkládání ostatních prvků infrastruktury jako jsou návěstidla a balízy se provádí vložím příslušného prvku do dvoubodu, který zastupuje kilometrickou polohu tohoto prvku. Návěstidla byla do modelu vložena na základě údajů ze schématických plánů stanic. Balízy byly vloženy před absolutní a traťová návěstidla a také před konec nástupiště. Balízy byly vkládány tak, aby i při nepřesnosti určení polohy vlaku  $\pm 5\%$  (48), došlo k jeho zastavení s přesností na jeden metr. Jednotlivé stanice se vkládají pomocí nástroje *Stations*. Do každé staniční koleje musí být vložena speciální staniční dvoubod.: *Station Vertex*, který reprezentuje kilometrickou polohu stanice v každé staniční koleji. Pro funkčnost simulačního modelu pro trasu B byly kromě existujících stanic vloženy i fiktivní stanice s obrátovými kolejemi. Jedná se o stanice: Zličín depo (ZLD), Zličín obrát (ZLO), Nové Butovice obrát (NBO), Smíchovské nádraží obrát (SNO), Florenc spojka B – C (FRBC), Českomoravská obrát (CEO) a Černý Most obrát (CMO).

Jednotlivě vložené dvoubody se spojují hranami (*Edges*), které zastupují jednotlivé koleje. Do těchto hran se zadávají sklonové a směrové parametry trati. Zároveň se zde zadávají parametry tunelů. Pro tvorbu simulačního modelu bylo vloženo několik typů tunelů: dvoukolejný tunel s rovnými stěnami, jednokolejný tunel s rovnými stěnami a jednokolejný tunel s kruhovým půdorysem o průměru 5,1 m.

Po vytvoření takovéto sítě bodů a hran je nutné přiřadit vybrané body k jednotlivým stanicím a vytvořit tzv. *Station Area*, tedy obvody stanic. Příklad vytvořené stanice Černý Most obrát je uveden na obrázku 16.



Obrázek 16 Model stanice Černý Most obrat

Zdroj: autor v SW OpenTrack

### Zadání parametrů jednotlivých souprav

Parametry souprav se zadávají dvoufázově. V první fázi se zadávají parametry hnacího vozidla a ve druhé fázi parametry vlaků (souprav). Do modelu bylo vloženo celkem 5 typů hnacích vozidel. Jednotlivé typy se liší parametry, které se mění s obsazeností soupravy. Pro soupravy 81-71M byly vloženy parametry pro plně obsazenou soupravu ( $8 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ ), středně obsazenou soupravu ( $6 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ ) a pro prázdnou soupravu. Pro soupravu M1 byly zadány parametry pro plně obsazenou soupravu ( $8 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ ) a pro prázdnou soupravu. Konkrétní parametry, které je nutné vložit do editoru hnacích vozidel, jsou: název hnacího vozidla, hmotnost, adhezní hmotnost, délka, maximální rychlost, trakční výkon, trakční napájecí soustava a druh vlakového zabezpečovače. Tyto hodnoty byly zadány podle tabulek garantovaných parametrů souprav.

Ve druhé fázi jsou do modelu zadány parametry vlaků. Parametry vlaků se zadávají v editoru vlaků, kde je každému vlaku přiřazeno hnací vozidlo a další parametry: název vlaku, typ vlaku, kategorii vlaku, hodnotu maximální akcelerace, dobu zpoždění náběhu trakce, brzdné charakteristiky a součinitele odporu.

### Vložení jízdnic cest

Po zadání všech výše uvedených parametrů je nutné určit jízdnicí cesty, které je možné pro model použít. Postup vytváření jízdnicích cest se skládá ze tří hlavních částí. První část tzv. *Routes* slouží k přiřazení všech uvažovaných jízdnicích cest k jednotlivým hlavním nástupišťům. OpenTrack tyto jízdnicí cesty vyhledává automaticky, ale pro správnost modelu je nutné vybrat z množiny možných cest pouze ty, které se shodují se závěrovou tabulkou. Druhá část spočívá ve vytvoření konkrétních jízdnicích cest tzv. *Paths*, které jsou složeny z jednotlivých *Routes*. Třetí část spočívá v zadání tzv. *Itineraries*, tedy itinerářů, které se skládají z jednotlivých *Paths*.

### ***Vložení jízdních řádů***

Dalším bodem je vytvoření konkrétních vlaků. Tato volba se provádí v menu *Courses and Services*. V tomto menu se konkrétnímu vlaku přiřadí: číslo, kategorie a způsob obsazování trati. Pro každý vlak je nutné zvolit konkrétní itineráře a určit jejich vzájemnou preferenci. Dále je potřeba zvolit jízdní řád, který bude následně ověřen v simulaci. Pokud takový jízdní řád není k dispozici, je potřeba určit čas odjezdu z výchozí stanice a spustit simulaci. Následně lze podle dat z průběhu simulace jízdní řád dodatečně vytvořit. Pro zjednodušení práce s programem je možné spoje, které se periodicky opakují vkládat kopírováním, při kterém se časové polohy následujících spojů posunou o zvolený čas vůči původnímu jízdnímu řádu.

### ***Vložení parametrů zabezpečovacího zařízení***

Pro správnou funkci simulačního modelu je nutné vložit parametry zabezpečovacího zařízení. Parametry staničního zabezpečovacího zařízení jsou pro všechny stanice stejné, protože všechny stanice jsou vybaveny reléovým zabezpečovacím zařízením s elektronickou nadstavbou. Pro modelování vlastností reléového zabezpečovacího zařízení bylo použito přednastavených hodnot pro elektrické (reléové) stavědlo, tedy *Electric signalbox*. Traťové a vlakové zabezpečovací zařízení je předmětem úpravy modelu pro konvenční provoz v ověřovacím provozním konceptu (kapitola 5.3.1) a pro automatický provoz v návrhových provozních konceptech (kapitola 5.4.1).

## **5.3 Ověřovací provozní koncept**

Pro ověřovací provozní koncept bylo nutné upravit model tak, aby byla správně simulována funkce stávajícího zabezpečovacího zařízení ARS. V takto upraveném modelu byla následně provedena simulace ověřovacího provozního konceptu. Tento koncept slouží především k ověření funkčnosti simulace pro stávající provoz. K tomuto účelu byl zpracován 4,5 hodinový grafikon vlakové dopravy. V tomto grafikonu jsou použity tři typy intervalů, které vycházejí z intervalů, které jsou na trase metra B v současném provozu využívány. Jedná se o interval 600 s, 300 s a 141 s. Tyto intervaly se mění každou hodinu. Výstupem simulace je kromě ověření správnosti modelu také odchylka použitých jízdních dob od jízdních dob dosažených simulací.

### **5.3.1 Úprava modelu pro simulaci konvenčního provozu se zabezpečovacím zařízením ARS a možnosti konvenčního provozu**

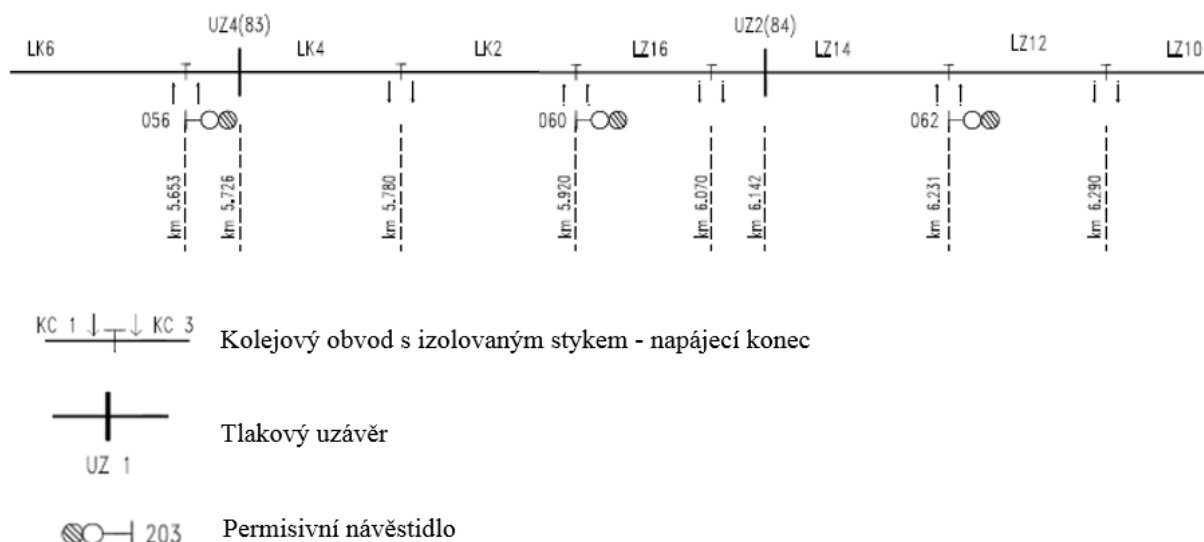
Pro správnou funkci simulačního modelu bylo nutné prověřit možnost simulace zabezpečovacího zařízení ARS. Funkce tohoto zařízení byly již popsány v kapitole 4. V softwaru OpenTrack však není možná simulace se zachováním všech jeho funkcí. Proto bylo přistoupeno k úpravě modelu tak, aby plnil základní funkce nutné pro simulaci ověřovacího provozního konceptu.

Zjednodušený model funkce zabezpečovacího zařízení využívá permissivní a absolutní světelná návěstidla, která jsou na trati metra B zřízena. Došlo k úpravě a rozšíření jejich funkcí. Principiálně se jedná o systém autobloku, který je používán na běžných železničních tratích. Tento autoblok, použitý v simulačním modelu, umožňuje jízdu vlaku maximální traťovou rychlostí do volného prostorového oddílu. V případě, že je tento oddíl obsazen, může vlak pokračovat sníženou rychlostí. Tato rychlost je pro každé návěstidlo jiná a je určena na základě údajů uvedených v kódovacích tabulkách. Jedná se vždy o maximální rychlost určenou kódovací tabulkou pro daný prostorový oddíl. Návěstidla v simulačním modelu nejsou předvěsti následujícího návěstidla, proto je fiktivně prodloužena dohlednost těchto návěstidel na 500 m.

Pro možnost jízdy za absolutní návěstidla, která jsou zřízena ve stanicích s kolejovým rozvětvením, je model upraven jiným způsobem. Tato návěstidla mají vždy absolutní platnost a pro další jízdu vlaku musí být celý následující prostorový oddíl volný. Zároveň musí být postavena vlaková cesta pro další vlak a proveden její závěr. Návěst VYKŘIČNÍK, která je návěstí přidruženého návěstidla k absolutnímu návěstidlu, není v simulačním modelu řešena. Splnění závěru vlakové cesty a volnosti prostorového oddílu je dáno podmínkou uvolnění celého prostorového oddílu a postavením vlakové cesty pro následující vlak. V případě, že následný vlak směřuje na jinou kolej, je návěst STŮJ na absolutním návěstidle změněna na návěst dovolující jízdu ihned po postavení a provedení závěru vlakové cesty.

#### ***Příklad principu tvorby zjednodušeného modelu ZZ ARS***

Pro názornost se autor rozhodl popsat princip úpravy simulačního modelu pro simulaci ZZ ARS. Jako příklad principu úpravy ZZ pro simulační model byl zvolen mezistaniční úsek Luka – Lužiny ve druhé traťové koleji. V tomto mezistaničním úseku se nacházejí celkem tři traťová návěstidla a to: 056, 060 a 062. Poloha návěstidel a jednotlivých kolejových obvodů je uvedena na obrázku 17.



Obrázek 17 Schéma mezistaničního úseku Luka – Lužiny

Zdroj: (49), autor

Pro každý kolejový obvod je kódovací tabulkou dána maximální rychlost, kterou může vlak jet. Příklad části kódovací tabulky je uveden na obrázku 18. Červeně označeny jsou rychlosti, které byly v modelu přiřazeny jednotlivým návěstidlům pro jízdu do obsazeného prostorového oddílu. V případě kódované rychlosti  $0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  je v simulačním modelu dovolena jízda do obsazeného prostorového oddílu rychlostí  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Návěstidlo	Kolejové obvody		Návěstidlo	Kolejové obvody		Návěstidlo	Kolejové obvody		Návěstidlo
056	LK 4	LK 2	060	LZ 16	LZ 14	062	LZ 12	LZ 10	064
⊗	×								
⊗	0	×							
⊗/○	20	0	⊗	×					
⊗/○	60	40	⊗	0	×				
○	60	60	⊗/○	40	0	⊗	×		
	80	60	⊗/○	40	0	⊗	0	×	
		80	⊗/⊗	60	20	⊗/⊗	0	0	⊗

- ⊗ Návěst Stůj
  - ⊗/○ Návěst Výstraha
  - ⊗/⊗ Návěst Rychlost  $40 \text{ km/h}$
  - ×
- 20 Rychlost kódovaná kolejovým obvodem [km/h]  
40 Rychlost kódovaná kolejovým obvodem [km/h]  
60 Rychlost kódovaná kolejovým obvodem [km/h]  
80 Rychlost kódovaná kolejovým obvodem [km/h]

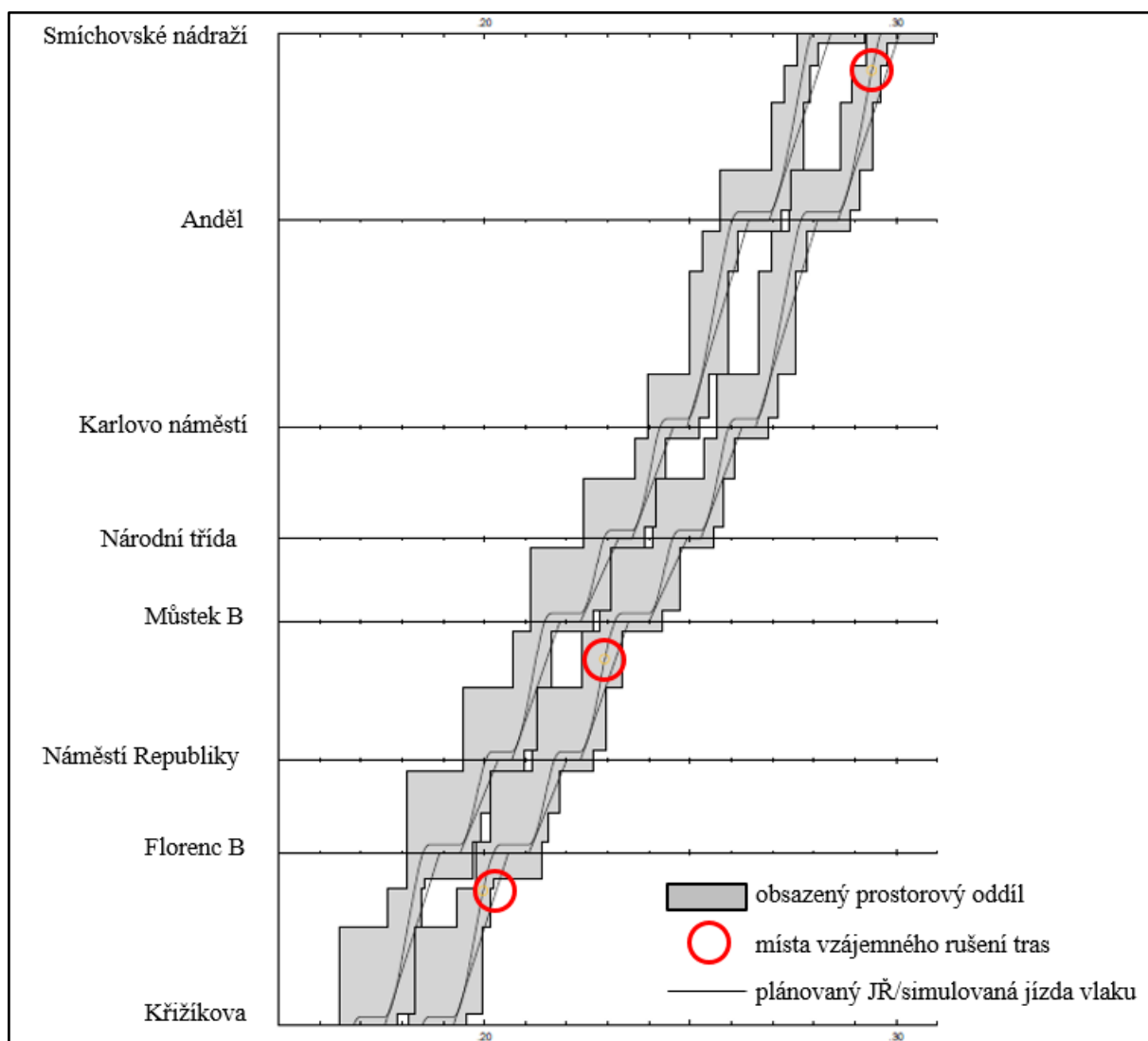
Obrázek 18 Příklad kódovací tabulky

Zdroj: (49), autor

### Funkčnost zjednodušeného modelu zabezpečovacího zařízení ARS

Z hlediska funkčnosti simulačního modelu bylo nutné ověřit fungování takto upraveného zabezpečovacího zařízení. Zejména pak minimální interval mezi následnými vlaky. Tento interval byl určen pomocí opakovaných simulací jízdy následných vlaků v obou směrech. Výsledkem těchto simulací je špičkový minimální interval **114 s**. Tento interval postačuje pro simulaci ověřovacího konceptu, kde je použit špičkový minimální interval 141 s.

Zjednodušením funkce zabezpečovacího zařízení však došlo k prodloužení minimálního intervalu, které umožňuje zabezpečovací zařízení ARS o 25 s. Na obrázku 19 je uveden diagram obsazení jednotlivých prostorových oddílů v úseku mezi stanicemi Smíchovské nádraží – Křižíkova následnými vlaky jedoucími v intervalu 100 s. Červenými kroužky jsou vyznačena místa, kde dochází ke konfliktům tras jednotlivých vlaků. Z obrázku je patrné, že k vzájemnému rušení tras dochází především před stanicemi s prodlouženou délkou pobytu na 30 s.



**Obrázek 19 Diagram obsazení prostorových oddílů (konvenční provoz)**

**Zdroj: autor v SW OpenTrack**

Pro liché směry (Černý Most – Zličín) jsou při intervalu 100 s omezujícími mezistaničními úseky Křižíkova – Florenc B, Náměstí Republiky – Můstek B, Anděl – Smíchovské nádraží a Stodůlky – Zličín. Nejvíce omezující úsek, ve kterém jsou trasy vlaků vzájemně rušeny i při intervalu 113 s je mezi stanicemi Křižíkova – Florenc B. V sudém směru dochází k rušení tras při intervalu 100 s pouze mezi stanicemi Radlická – Smíchovské

nádraží a Smíchovské nádraží – Anděl. Nejvíce omezujícím úsekem je z hlediska simulačního modelu úsek Křižíkova – Florenc B v lichém směru, kde dochází k opakovanému brzdění vlaku před absolutním návěstidlem FRB – L1.

### 5.3.2 Analýza současného jízdního řádu

V současné době se používá celá řada jízdních řádů v závislosti na časovém období. Intervaly se zkracují především v hodinách ranní a odpolední špičky. V tabulce 11 jsou uvedeny používané intervaly podle jednotlivých hodin, kdy je metro v provozu.

Tabulka 11 Intervaly používané na trase B

Časové období	Interval (s)	Časové období	Interval (s)
05:00 - 06:00	290 - 600	15:00 - 16:00	164 - 237
06:00 - 07:00	141 - 250	16:00 - 17:00	164
07:00 - 08:00	141	17:00 - 18:00	164 - 209
08:00 - 09:00	141 - 150	18:00 - 19:00	250
09:00 - 10:00	180 - 231	19:00 - 20:00	290 - 360
10:00 - 11:00	237 - 300	20:00 - 21:00	450
11:00 - 12:00	300	21:00 - 22:00	529 - 600
12:00 - 13:00	300	22:00 - 23:00	600
13:00 - 14:00	237 - 300	23:00 - 24:00	391 - 600
14:00 - 15:00	243 - 273		

Zdroj: (39), autor

Dalším důležitým aspektem, který byl předmětem analýzy současného jízdního řádu, je doba obratu soupravy v koncových stanicích. Jedná se o dobu mezi příjezdem soupravy do stanice a mezi odjezdem stejné soupravy ze stanice v opačném směru. V obou obratových stanicích byla zjištěna minimální doba obratu čtyři minuty. Celková cestovní doba ve směru Zličín – Černý Most je **41 minut a 25 sekund**, ve směru Černý Most – Zličín je cestovní doba **41 minut a 45 sekund**.

### 5.3.3 Simulace ověřovacího provozního konceptu

Pro simulaci konvenčního provozu byl sestaven 4,5 hodinový jízdní řád. V tomto jízdním řádu jsou použity tři z intervalů používaných na trase metra B. V době od 5:00 do 6:00 hod. je to interval 600 s, v době od 6:00 do 7:00 hod. interval 300 s a v době od 7:00 do 8:00 hod. interval 141 sekund. Interval 141 sekund je zároveň nejkratším používaným intervalem na trase B. Pro simulaci provozu byly použity čtyři typy souprav. Pro provoz s cestujícími jsou využity soupravy 81 – 71M s obsazením 8 os·m<sup>-2</sup> a M1 s obsazením 8 os·m<sup>-2</sup>. Pro soupravové jízdy jsou použity prázdné soupravy 81 – 71M a M1.



Pro kvalitní simulační model bylo nutné stanovit i oběhy souprav tak, aby byla dodržena minimální doba obratu 4 minuty. Doba obratu použitá v jízdním řádu pro ověřovací provozní koncept je stanovena podle vzorce 3.

$$T_o = 2 \cdot t_k + 2 \cdot t_{po} + 2 \cdot t_z + t_{př} \quad (3)$$

kde:

$T_o$  – doba obratu [s]

$t_k$  – doba pobytu v konečné a výchozí stanici [s]

$t_{po}$  – doba přistavné a odstavné jízdy [s]

$t_z$  – doba zprovoznění/zneprovoznění stanoviště [s]

$t_{př}$  – doba přechodu strojvedoucího na druhé stanoviště [s]

**Zdroj: autor**

Jednotlivé technologické časy se shodují s časy používanými konstruktéry jízdních řádů pražského dopravního podniku. Jedinou výjimku tvoří doba přistavné a odstavné jízdy, která byla určena simulací a po zaokrouhlení na celých 5 s nahoru jde o dobu 35 s pro obratové stanice Zličín obrat a Černý Most obrat. Doba pobytu v konečných stanicích je vždy 30 s (39), doba na zprovoznění/zneprovoznění stanoviště je 20 s a doba přechodu strojvedoucího na druhé stanoviště je 80 s (50). Dosazením do vzorce 3 byla zjištěna minimální doba obratu **250 s**. Tato minimální doba obratu je použita i u ověřovacího jízdního řádu.

Pro ověřovací provozní koncept byly vytvořeny oběhy souprav a to pro stanovení minimálního počtu souprav a pro ověření funkce střídání obratových kolejí. Pro interval 141 s jsou ve stanici Černý Most obrat využívány dvě obratové koleje, jejichž použití se periodicky střídá tak, aby souprava měla vždy minimální dobu pobytu v obratové koleji 120 s. Ve stanici Zličín obrat je však k dispozici pouze jedna obratová kolej a proto část souprav zajíždí až do depa Zličín. Soupravy přistavované a odstavované do depa Zličín netvoří oběh, ale jsou vždy započteny jako nová souprava. Minimální potřeba souprav pro takto sestavený jízdní řád je 44 + 2 soupravy náhradní. První náhradní souprava je umístěna v depu Zličín, druhá náhradní souprava je umístěna na koleji č. 3a ve stanici Černý Most. Celková potřeba souprav je tedy 46. Celkově je jízdní řád sestaven pro 90 vlaků s přepravou cestujících a pro 26 soupravových vlaků. Celkově je sestaven jízdní řád pro 116 vlakových tras. Při konstrukci jízdního řádu bylo uvažováno odstavení sedmi souprav (jedna záložní) ve stanici Černý Most. Šest souprav je tedy přistaveno na linku a odstaveno z linky do stanice Černý Most obrat. Trasy soupravových vlaků jsou konstruovány a jejich jízda je simulována stejným způsobem jako u vlaků s přepravou cestujících. Tento způsob konstrukce jízdního řádu byl zvolen proto, aby nedocházelo k vzájemnému rušení jednotlivých tras vlaků.

Simulací byla ověřena možnost konvenčního provozu a správnost simulačního modelu. Simulační model pracoval bez dodatečných konfliktů vlakových tras. V tabulce 12 jsou uvedeny hodnoty zpoždění zjištěné simulací při příjezdu do příslušné stanice.

**Tabulka 12 Hodnoty zpoždění v jednotlivých stanicích**

	Souprava 81-71M		Souprava M1	
	Hodnota zpoždění (s)			
	Jízda tam	Jízda zpět	Jízda tam	Jízda zpět
Zličín		-5		-12
Stodůlky	-16	-3	-18	-8
Luka	0	-2	-6	-7
Lužiny	-5	-13	-7	-17
Hůrka	-4	-11	-7	-14
Nové Butovice	-7	-10	-9	-17
Jinonice	-11	0	-13	-13
Radlická	-9	-9	-12	-23
Smíchovské nádraží	-19	-9	-21	-18
Anděl	-11	-11	-14	-14
Karlovo náměstí	-12	-5	-15	-9
Národní třída	-6	-9	-8	-11
Můstek - B	-5	-9	-7	-12
Náměstí Republiky	-9	-6	-12	-8
Florenc - B	-7	-11	-10	-14
Křižíkova	-10	-12	-13	-15
Invalidovna	-6	-15	-10	-17
Palmovka	-12	-8	-16	-11
Českomoravská	-8	-5	-11	-8
Vysočanská	-5	-6	-8	-8
Kolbenova	-4	-8	-8	-10
Hloubětín	-13	-8	-15	-11
Rajská zahrada	5	-7	-12	-10
Černý Most	-2		-12	
<b>Celkem (s)</b>	<b>-176</b>	<b>-182</b>	<b>-264</b>	<b>-287</b>
<b>Celkem (minuty)</b>	<b>2,933</b>	<b>3,033</b>	<b>4,400</b>	<b>4,783</b>

Zdroj: autor v SW OpenTrack

Z výsledků simulace je patrné, že vlaky přijíždí do stanic s náskokem nebo včas. Náskoky při příjezdu do jednotlivých stanic jsou způsobeny přírážkami k jízdním dobám, které slouží k vyrovnání případných zpoždění. K jedinému zpoždění došlo ve stanici Rajská Zahrada ve směru Zličín – Černý Most. Jedná se o zpoždění 5 s při použití soupravy 81 – 71M. Příčinou zpoždění jsou v tomto případě náročné sklonové poměry, kde průměrný sklon mezi stanicemi Hloubětín – Rajská zahrada je +31,83 %. Na jízdním profilu soupravy 81 – 71M, uvedeném v příloze D je patrné, že vlaky jedoucí v sudém směru v úseku Hloubětín – Rajská Zahrada

vůbec nedosáhnou maximální povolené rychlosti. Souprava M1, která je lehčí a výkonnější dosahuje ve stejném úseku o 17 s kratší jízdní dobu.

Nákresný jízdní řád (NJŘ) vytvořený v SW OpenTrack je uveden v příloze E. Součástí této přílohy je také simulace jízdního řádu, která potvrzuje správnost ověřovacího provozního konceptu. Během běhu simulace nedocházelo k žádným zpožděním ani provozním nepravidelnostem.

## **5.4 Automatický provoz**

V této kapitole je popsána simulace automatického provozu se zabezpečovacím zařízením CBTC. Pro možnost provozu vlaků v pohyblivých prostorových oddílech muselo dojít k úpravě simulačního modelu, která je popsána v kapitole 5.4.1. Pro ověření správné funkce simulačního modelu byl následně simulován provozní koncept (nultá varianta), který svými parametry odpovídá ověřovacímu provoznímu konceptu. Kromě nulté varianty jsou v kapitole popsány a vyhodnoceny další tři provozní koncepty, které jsou zaměřeny na prověření možností a limitů provozu vlaků v automatickém režimu. Simulace provozu je ve všech provozních konceptech provedena se soupravou 81 – 71M.

### **5.4.1 Úprava simulačního modelu pro automatický provoz a možnosti automatického provozu**

Pro simulaci provozu se zabezpečovacím zařízením CBTC bylo zapotřebí znovu upravit simulační model. Protože SW OpenTrack ve verzi 1.3 neumožňuje přímo simulovat provoz v režimu CBTC, je pro simulaci použit režim simulace pro zabezpečovací zařízení *European Train Control System* (ETCS) L3, které také umožňuje provoz v pohyblivých prostorových oddílech. Funkci referenčních bodů v simulačním modelu plní balízy s přesně danou polohou. Pro účely smíšeného provozu, který je předmětem kapitoly 5.4.3, jsou tyto balízy umístěny 20 m před návěstidla a konce nástupišť (pro přesnost zastavení na 1 m). V úseku Smíchovské nádraží – Radlická je vložena zpřesňující balíza, která rozděluje 850 m dlouhý úsek na dva úseky po 425 m. V dalších úsecích je maximální vzdálenost balíz 630 m. Pro určení polohy bylo do modelu vloženo celkem 258 balíz. Rádiovou síť dle standardu IEEE 802.11 a/g/p/n v modelu nahrazuje rádiová síť GSM – R, která pokrývá 100 % trati. Tato rádiová síť zabezpečuje bezpečnou komunikaci mezi vlaky a OCC, ze kterého je celá trasa řízena.

### ***Model bezpečného rozestupu vlaků***

Tento model je zásadní pro bezpečnou jízdu vlaků. Na obrázku 5 v kapitole 3 je popsán model bezpečného brzdění dle standardů IEEE 1474.1. Pro účely simulačního modelu byl tento model bezpečného brzdění upraven tak, aby jej bylo možné použít pro simulaci

v SW OpenTrack verze 1.3. Pro určení bezpečného rozestupu vlaků jsou klíčové dvě složky. První složkou je bezpečná zábrzdá vzdálenost a druhou složkou je nejistota určení polohy následných vlaků. Bezpečná zábrzdá vzdálenost je pro všechny použité soupravy stejná. Je dána parametrem zrychlení nouzové brzdy, které je  $-0,94 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Všechny soupravy, při použití nouzové brzdy v rovině zastaví na vzdálenost 262,7 m. Bezpečný rozestup vlaků se určuje podle vzorce 4.

$$S_{brv} = s_{bzv} + s_{nup} \quad (4)$$

kde:

$S_{brv}$  – bezpečný rozestup vlaků [m]

$s_{bzv}$  – bezpečná zábrzdá vzdálenost [m]

$s_{nup}$  – nejistota určení polohy vlaků [m]

**Zdroj: (34), autor**

Nejistota určení polohy vlaku vychází z maximálního rozestupu referenčních bodů (balíz) a odchylky měření, která je 5 %. Maximální rozestup balíz v modelu je 630 m, takže maximální nejistota určení polohy je 31,5 m pro každý vlak. Pro určení bezpečného rozestupu je zapotřebí uvažovat nejistotu určení polohy prvního i druhého vlaku, tedy celkem 63 m. Po dosazení do vzorce 4 je výsledná hodnota bezpečného rozestupu vlaků pro všechny typy souprav **325,7 m**.

Pro funkčnost simulačního modelu je však potřeba dosadit hodnotu bezpečnostní vzdálenosti, která je určena podle vzorce 5.

$$S_{bezp} = s_{nup} + (s_{bzv} - s_{prov}) \quad (5)$$

kde:

$S_{bezp}$  – bezpečnostní vzdálenost [m]

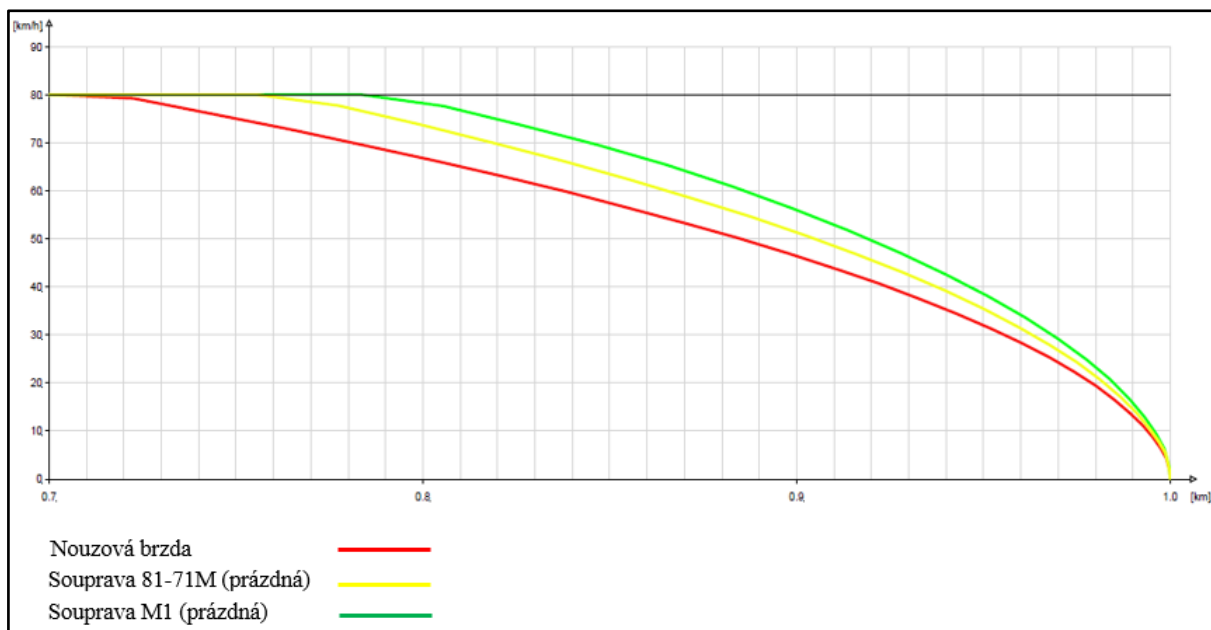
$s_{nup}$  – nejistota určení polohy vlaků [m]

$s_{bzv}$  – bezpečná zábrzdá vzdálenost [m]

$s_{prov}$  – zábrzdá vzdálenost při provozním brzdění [m]

**Zdroj: (34), autor**

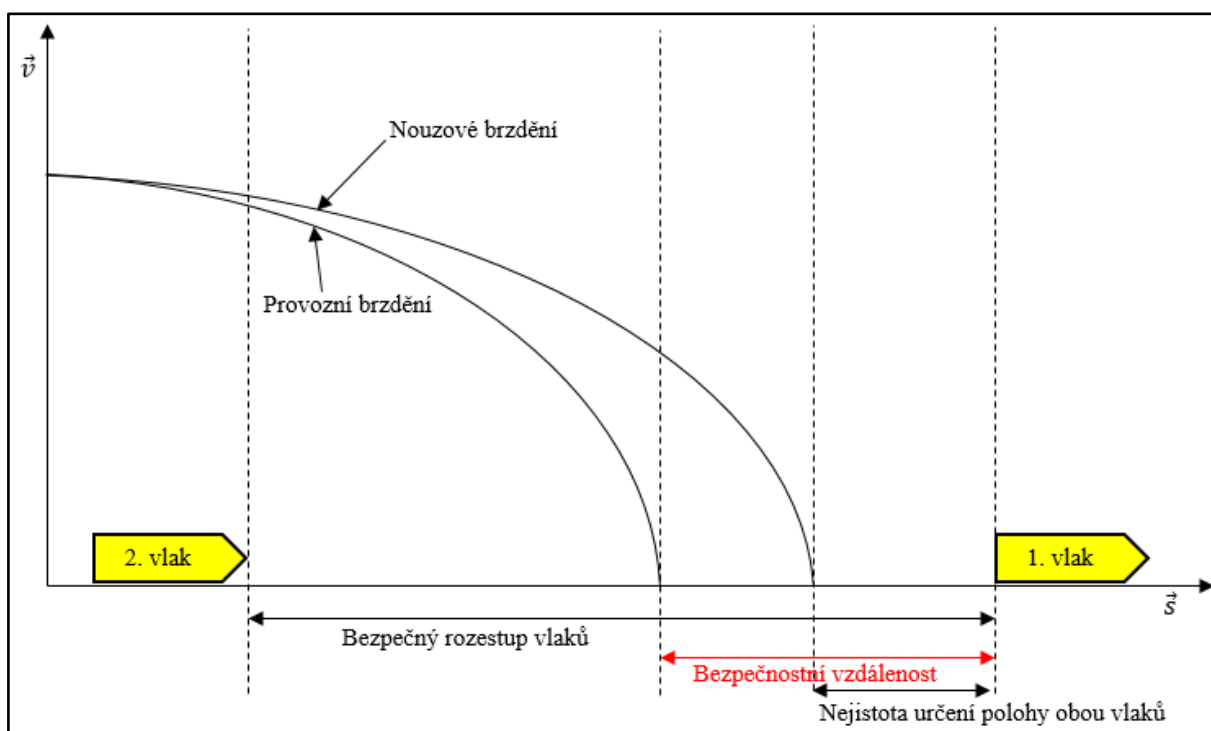
Bezpečná zábrzdá vzdálenost je pro všechny soupravy stejná, ale zábrzdá vzdálenost při provozním brzdění se pro každou soupravu liší. Do modelu jsou zahrnuty dvě hodnoty nejvyšší hodnoty této vzdálenosti. Jedná se o hodnoty prázdných souprav 81 – 71M a M1, u kterých je největší rozdíl mezi bezpečnou zábrzdnou vzdáleností a zábrzdnou vzdáleností při provozním brzdění. Brzdné křivky obou souprav jsou uvedeny na obrázku 20.



Obrázek 20 Brzděné křivky

Zdroj: autor v SW Open Track

Upravený model bezpečného rozestupu vlaků, který je použit pro vytvoření simulačního modelu, s použitím pohyblivých prostorových oddílů, je uveden na obrázku 21.



Obrázek 21 Upravený model bezpečného rozestupu vlaků

Zdroj: (34), autor

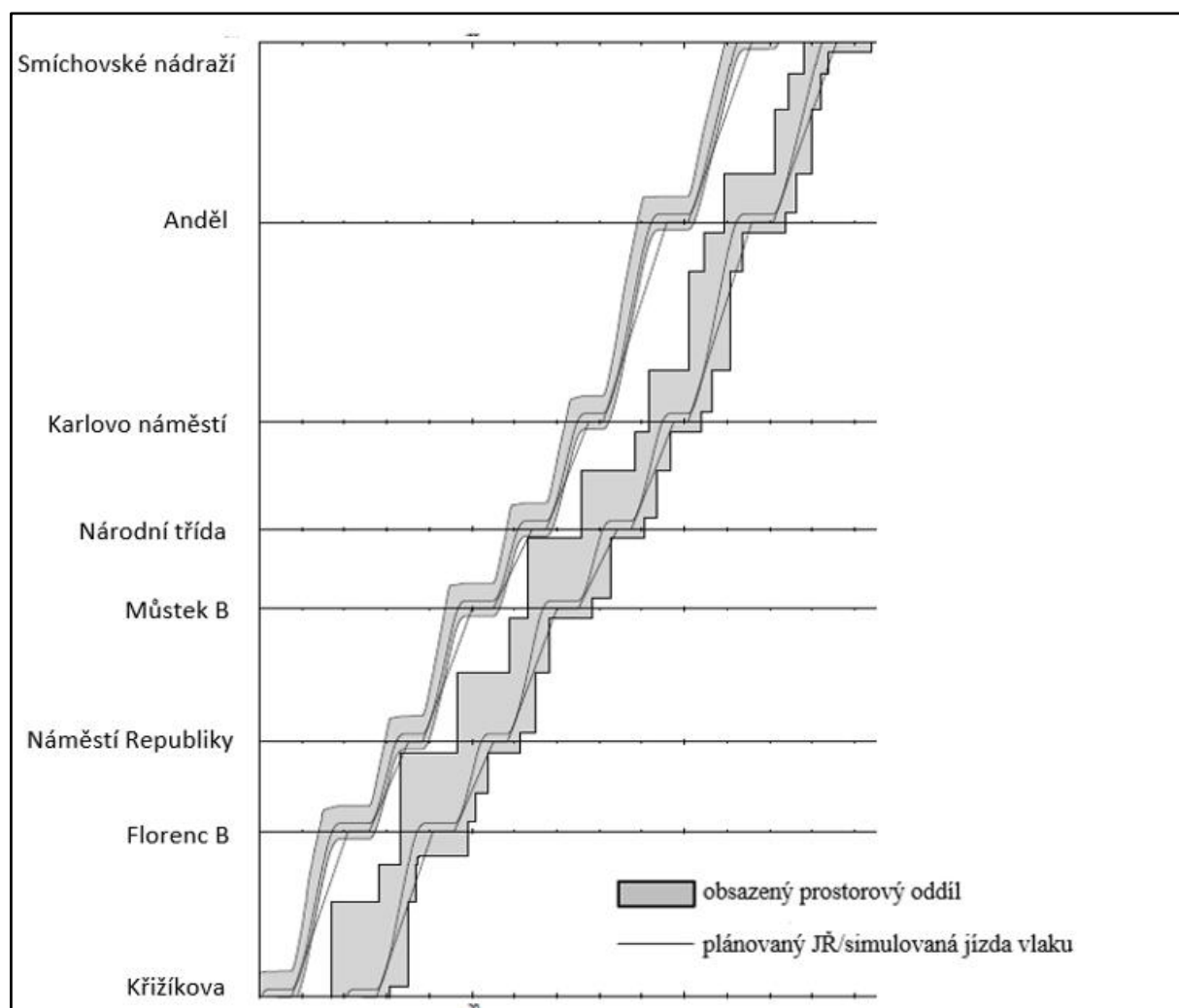
Hodnoty bezpečnostní vzdálenosti vypočtené podle vzorce 5 pro použití v simulačním modelu jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13 Vypočtené bezpečnostní vzdálenosti

Souprava	Zábrzdná vzdálenost	Bezpečnostní vzdálenost
M1(0 os·m <sup>-2</sup> )	197,1 m	128,6 m
M1(8 os·m <sup>-2</sup> )	198,1 m	127,6 m
81-71M(0 os·m <sup>-2</sup> )	217,8 m	107,9 m
81-71M(8 os·m <sup>-2</sup> )	219,8 m	105,9 m

Zdroj: autor

Opakovanými simulacemi jízdy vlaků s prázdnou soupravou 81 – 71M v obou směrech bylo dosaženo špičkového minimálního intervalu **70 sekund**. Při tomto intervalu nedochází ke vzájemnému ovlivňování tras jednotlivých vlaků. Tento minimální interval je stanoven pro jízdu vlaků v traťových kolejích a neřeší možnosti obrátových stanic. Porovnání obsazování prostorových oddílů konvenčními vlaky a vlaky jedoucími v pohyblivých prostorových oddílech je uvedeno v diagramu na obrázku 22.

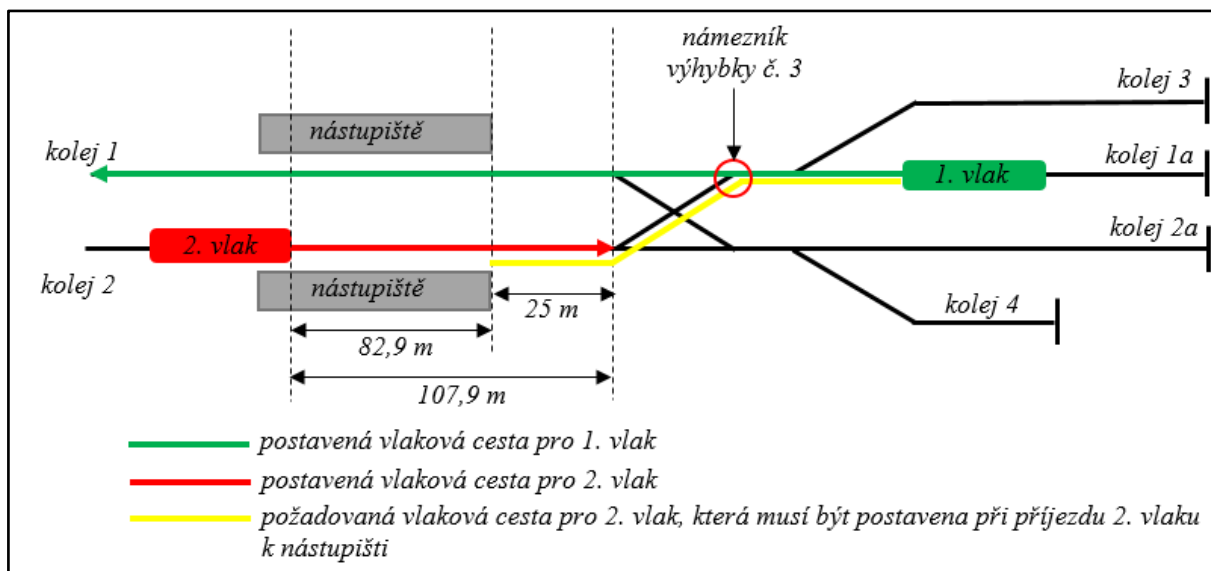


Obrázek 22 Diagram porovnání obsazování prostorových oddílů (pohyblivý/pevný blok)

Zdroj: autor v SW OpenTrack

### Možnosti obratu vlaků v obratových stanicích

Při sestavě jízdních řádů bylo zjištěno, že limitujícím faktorem z hlediska minimálního intervalu vlaků jsou obraty souprav v obratových stanicích. Problémem je nedostatečná vzdálenost mezi koncem nástupiště a krajní výhybkou, která je ve všech obratových stanicích kratší než bezpečnostní vzdálenost určená v modelu bezpečného brzdění. Z tohoto důvodu musí být jízdní cesta soupravy směřující do obratové koleje postavena ještě před vjezdem vlaku do stanice. V případě stanic s jednou obratovou kolejí to znamená, že vlak směřující z obratové koleje k nástupišti musí být přistaven ještě před příjezdem vlaku směřujícího do obratové koleje k nástupišti stanice. V případě stanic se dvěma a více obratovými kolejemi platí tato podmínka pouze v případě, že se vlakové cesty vzájemně kříží. Tento problém se podařilo částečně vyřešit přepnutím funkce absolutních návěstidel platných pro vjezd do obratových kolejí do režimu *discrete for moving block*, která umožňuje přepnutím na konvenční provoz určit nižší prioritu vlakové cestě směřující do obratové koleje. Touto úpravou došlo k dosažení správné funkce modelu, ale bylo způsobeno zpoždění vjezdové soupravy. Vjezdová souprava totiž v takovém případě musí zastavit na bezpečnostní vzdálenost před tímto návěstidlem a tím pádem je znemožněn její včasný příjezd k nástupišti stanice. Zároveň je tato úprava v rozporu s principem automatického provozu, a proto není v modelu dále využívána. Na obrázku 23 je uvedeno schéma stanice Černý Most a fiktivní stanice Černý Most obrat, na kterém je názorně vysvětlen problém nedostatečné vzdálenosti mezi krajní výhybkou a koncem nástupiště stanice.



Obrázek 23 Problém nedostatečné vzdálenosti mezi krajní výhybkou a koncem nástupiště

Zdroj: autor

Z obrázku 23 je patrné, že pokud není pro druhý vlak postavena vlaková cesta do obratové koleje, dojde k zastavení vlaku 82,9 m před koncem nástupiště. Druhý vlak tedy může vjet do stanice až po uvolnění námezníku výhybky č. 3 prvním vlakem a po postavení

vlakové cesty do obratové koleje. Vzdálenost 82,9 m platí pouze pro stanici Černý Most a pro prázdnou soupravu 81 – 71M. Pro ostatní obratové stanice i pro ostatní typy souprav však platí, že bezpečnostní vzdálenost je vždy delší než vzdálenost mezi krajní výhybkou a koncem nástupiště.

Opakovanými simulacemi obrátů souprav bylo zjištěno, že minimální možný interval jízdy následných vlaků je vzhledem k omezeným možnostem obratových stanic **109 s**. Doba pobytu soupravy na obratové koleji je autorem stanovena na **10 s**. Tato doba zahrnuje čas na přípravu odjezdové vlakové cesty a technologický obrat soupravy. V závislosti na použitém typu zabezpečovacího zařízení CBTC se tato doba může měnit. Hodnota doby obratu **109 s** vyplývá ze simulací obrátů souprav prováděných ve stanici Černý Most obrat. Pro ověření správnosti byla výsledná hodnota testována simulací obrátů souprav v ostatních obratových stanicích. Touto simulací bylo prokázáno, že uvedenou hodnotu minimálního intervalu následných vlaků je možné udržet ve všech obratových stanicích na trase B.

#### **5.4.2 Nultá varianta**

Nultá varianta automatického provozu vychází z jízdního řádu navrženého pro konvenční provoz. Jedná se tedy o 4,5 hodinový NJŘ. Vzhledem k rozdílným požadavkům na dobu obratu, která se zkrátila na 120 sekund, byla upravena i časová poloha spojů. Intervaly použité při konstrukci jízdního řádu pro konvenční provoz však byly zachovány. V době od 5:00 do 6:00 hod. je to interval 600 s, v době od 6:00 do 7:00 hod. interval 300 s a v době od 7:00 do 8:00 hod. interval 141 sekund. Stejný je i počet vlaků s přepravou cestujících, kterých je celkem 90. V nulté variantě je oproti variantě konvenčního provozu zavedeno o jeden pár soupravových vlaků méně, tedy celkem 24 soupravových vlaků. Nákrešný jízdní řád pro tuto variantu je uveden v příloze F. Pro zajištění provozu při takto zkonstruovaném jízdním řádu je zapotřebí celkem 42 souprav, včetně dvou záložních souprav ve stanicích Zličín depo a Černý Most obrat.

Doby pobytu souprav v obratových stanicích se liší podle velikosti jednotlivých intervalů. Při intervalu 600 a 300 s je tato doba 145 s ve stanici Černý Most obrat a 120 sekund ve stanici Zličín obrat. Pro interval 141 sekund je doba pobytu soupravy v obratové stanici 11 s ve stanici Černý Most obrat a 12 s ve stanici Zličín obrat. Vzhledem k omezeným možnostem obratových stanic jsou čtyři obraty ve stanici Zličín obrat vyřešeny odstoupením soupravy do depa Zličín a následným přistavením nové soupravy. U automatického provozu by bylo možné využít možnosti obratu na spojovací koleji do depa Zličín. Protože ale při tvorbě práce nebyla k dispozici data o spojovacích kolejích do depa Zličín, nebylo možné tuto variantu



prověřit simulací. Z tohoto důvodu soupravy přistavované a odstavované do depa Zličín netvoří oběh, ale jsou vždy započteny jako nová souprava. Ve stanici Černý Most obrat jsou obraty vlaků prováděny pouze v koleji 1a.

Simulace nákrešného jízdního řádu je součástí přílohy F. Simulací byla ověřena možnost provozu souprav v pohyblivých prostorových oddílech. Jednotlivé trasy vlaků jsou vzájemně nekonfliktní a při simulaci nedochází k žádným zpožděním. Pro ověření stability zkonstruovaného jízdního řádu bylo následně přistoupeno ke čtyřem variantám simulace zpoždění.

První varianta simulace zpoždění využívá možností SW OpenTrack v menu *Train Categories*. V tomto menu je možné nastavit hodnotu maximálního a průměrného zpoždění vlaků a také procento vlaků, u kterých zpoždění nastane. V první variantě bylo simulováno zpoždění o maximální hodnotě 141 s a průměrné zpoždění 70,5 s u 10 % vlaků. Toto zpoždění se vždy vztahuje k odjezdu vlaku z obratové koleje. V intervalech 600 a 300 s byla prokázána stabilita jízdního řádu, kdy bylo zpoždění v průběhu jízdy vlaku vyrovnáno a nedocházelo k ovlivňování jízdy dalších vlaků. Při intervalu 141 s však už jízdní řád stabilní nebyl a docházelo k přenosu zpoždění na další vlaky, které již nebylo v průběhu simulace vyrovnáno.

Druhá varianta využívá stejného nástroje SW OpenTrack jako první varianta, ale s maximálním zpožděním o velikosti poloviny minimálního intervalu, tedy 70,5 s. Průměrná velikost zpoždění byla v této variantě stanovena na 35,3 s a pravděpodobnost výskytu zpoždění 10 %. V této variantě byl jízdní řád zcela stabilní a vždy došlo k vyrovnání zpoždění. Simulace druhé varianty zpoždění je součástí přílohy F.

Třetí varianta zpoždění je zaměřena na simulaci zpoždění ve stanicích, které může vzniknout například zvýšenou frekvencí cestujících. V deseti autorem náhodně vybraných stanicích bylo simulováno zpoždění od 10 do 70,5 s. V intervalech 600 a 300 s byl jízdní řád zcela stabilní a zpoždění bylo vždy vyrovnáno během jízdy vlaku nebo v obratové stanici. Při intervalu 141 sekund bylo zpoždění během simulace vždy vyrovnáno, ale docházelo k přenosům zpoždění v obratových stanicích. Tento jev je však způsoben zkrácenou dobou pobytů na obratových kolejích, kde je vzhledem ke stanovené době pobytu minimalizována možnost vyrovnání zpoždění.

Čtvrtá varianta je zaměřena na možnost poruchy automatické soupravy. Vlak vedený soupravou v poruše je řízen strojvedoucím v náhradním režimu. Jízda vlaku je řízena optickými návěstidly podle návěstního předpisu D1/1 a dopravního předpisu D2/1. Maximální dovolená rychlost pro tuto soupravu je  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  na návěst VOLNO a  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  na návěst OPATRŇ. Pro tento jízdní řád byla simulována porucha vlaku č. 61 a maximální vzniklé zpoždění bylo

35 s. Zpoždění vlaku v poruše se nepřenáší na další vlaky. Z hlediska bezpečnosti provozu je ale jediným správným řešením neprodlené odstavení soupravy do depa Zličín, případně v některé z vhodných obratových stanic.

#### **5.4.3 Maximální varianta**

Maximální varianta provozu je navržena pro interval 120 s. Jedná se o čtyřhodinový jízdní řád, kdy v době od 5:00 do 7:00 hod. vyjíždějí vlaky s přepravou cestujících z konečných stanic Zličín a Černý Most. Navržený nákrešný jízdní řád je uveden v příloze G. Jedná se o čtyřhodinový NJŘ od 4:20 do 8:20 hod. V tomto jízdním řádu je zkonstruováno celkem 121 tras pro vlaky s přepravou cestujících a 30 tras pro soupravové vlaky. Pro zajištění provozu je zapotřebí celkem 45 souprav, včetně dvou náhradních souprav. Z důvodu úspory souprav je v tomto jízdním řádu minimalizována doba pobytu na obratových kolejích, která je 11 sekund ve stanici Zličín obrat a 14 sekund ve stanici Černý Most obrat. Obraty vlaků ve stanici Černý Most obrat jsou stejně jako u nulté varianty prováděny v koleji 1a.

Simulací navrženého jízdního řádu byla ověřena jeho správnost. V průběhu simulace nedochází k vzniku žádných zpoždění ani vzájemnému konfliktu jednotlivých tras vlaků. Simulace jízdního řádu pro maximální variantu je součástí přílohy G. Pro ověření stability jízdního řádu byly simulovány tři varianty simulace zpoždění.

První varianta zpoždění ověřuje chování simulace při zpoždění vlaku při odjezdu z obratové stanice. Maximální doba zpoždění byla stanovena na polovinu intervalu, tedy 60 s. Průměrná doba zpoždění byla stanovena na 30 s a pravděpodobnost vzniku zpoždění na 10 %. Simulací bylo ověřeno, že v tomto případě je jízdní řád zcela stabilní a zpoždění je vyrovnáno během jízdy vlaku. Vzniklé zpoždění se nepřenáší na další vlaky.

Druhá varianta zpoždění se zaměřuje na zpoždění vzniklé v nácestných stanicích. Autorem bylo vybráno devět stanic, ve kterých vzniká zpoždění. Maximální uvažované zpoždění je 60 sekund. I ve druhé variantě zpoždění je jízdní řád stabilní a nedochází k přenosům zpoždění na ostatní vlaky. Simulace druhé varianty zpoždění je součástí přílohy G.

Třetí varianta zpoždění je zaměřena na poruchu soupravy vlaku 59. Souprava je vedena v náhradním režimu a řídí ji strojvedoucí. Maximální hodnota vzniklého zpoždění je 35 s. Ani při této variantě zpoždění nedochází k rušení tras dalších vlaků. Vzhledem k tomu, že souprava vlaku č. 59 přechází ve stanici Zličín obrat na vlak č. 96, je v simulaci uvažováno odstavení porouchané soupravy do depa Zličín a přistavení nové soupravy na vlak č. 96.

#### 5.4.4 Pásmový provoz

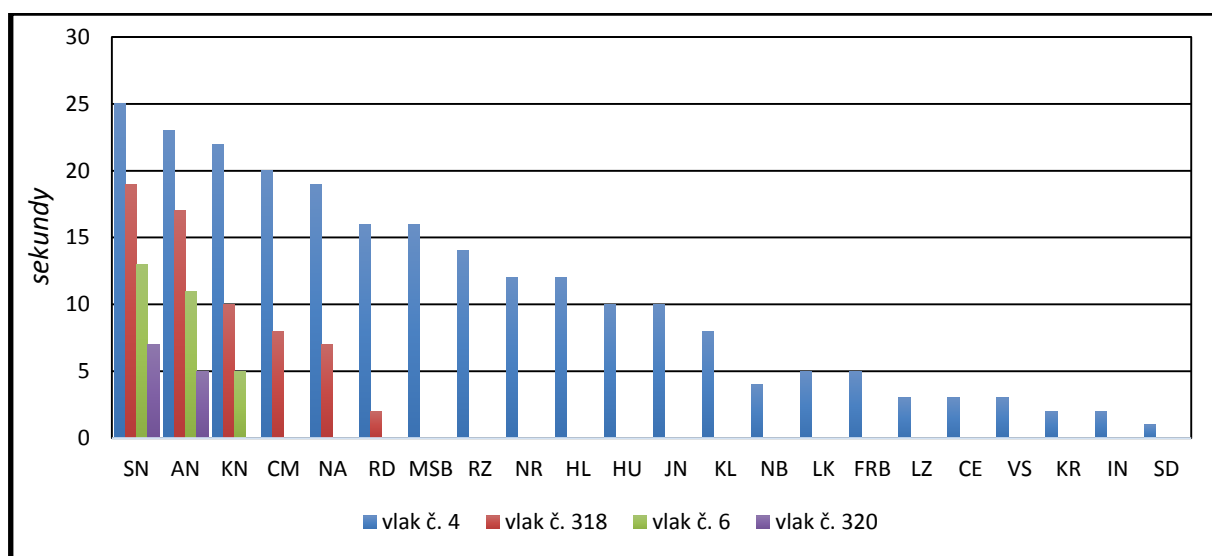
Tato varianta byla sestavena pro ověření možností simulace pásmového provozu na trase metra B. Vlaky, které jsou vedeny v celé trase Zličín obrat – Černý Most obrat jedou v intervalu 140 sekund. Mezi stanicemi Smíchovské nádraží – Českomoravská jsou vlaky vedeny v intervalu 70 sekund. Úsek Smíchovské nádraží – Českomoravská je totiž úsekem s nejvyšším přepravním zatížením. Graf zatížení mezistaničních úseků je uveden v příloze H. Pro pásmový provoz byl sestaven čtyřhodinový NJŘ, který je uveden v příloze I. V tomto jízdním řádu vyjíždějí vlaky z obratových stanic Zličín obrat, Smíchovské nádraží obrat, Českomoravská obrat a Černý Most obrat v intervalu 140 sekund. Nákrešný jízdní řád je sestaven pro období od 4:20 do 8:20 hod. V rámci konstrukce jízdního řádu bylo sestrojeno celkem 103 tras pro vlaky s přepravou cestujících jedoucích v celém úseku Zličín obrat – Černý Most obrat. Tyto vlaky mají čísla od 1 do 112. Vlaky s číslem 300 – 403 jsou vedeny pouze v úseku Smíchovské nádraží obrat – Českomoravská obrat. Pro tyto vlaky bylo zkonstruováno 104 vlakových tras. Dále bylo sestrojeno 25 tras soupravových vlaků jedoucích v úseku Zličín obrat – Černý Most obrat. Tyto vlaky mají čísla 900 – 924. Pro přistavení a odstavení souprav do a ze stanice Českomoravská bylo sestrojeno 14 tras soupravových vlaků s čísly 700 – 713. Pro přistavení a odstavení souprav do a ze stanice Smíchovské nádraží bylo sestrojeno 12 vlakových tras pro soupravové vlaky s čísly 800 – 811. Celkový počet vlakových tras v tomto jízdním řádu je 258. Pro zajištění provozu pro takto zkonstruovaný jízdní řád je zapotřebí 52 souprav a 2 náhradní soupravy. Celková minimální potřeba souprav je 54.

Pro obraty vlaků ve stanici Černý Most obrat je používána kolej 1a a ve stanici Smíchovské nádraží obrat kolej 01. Doby pobytů v obratových kolejích jsou 21 s ve stanici Zličín obrat, 26 s ve stanici Smíchovské nádraží obrat, 29 s ve stanici Českomoravská obrat a 14 s ve stanici Černý Most obrat. Simulace navrženého jízdního řádu je uvedena v příloze I. Simulací byla ověřena možnost provozu takto sestaveného jízdního řádu. V průběhu simulace nevznikala žádná zpoždění. Pro ověření stability zkonstruovaného jízdního řádu byly simulací ověřeny tři varianty zpoždění.

První variantou simulace zpoždění bylo ověřeno chování modelu v případě zpoždění vlaku z výchozí stanice. Maximální hodnota zpoždění byla stanovena na 35 s a průměrné zpoždění 17,5 s. Pravděpodobnost vzniku zpoždění byla stanovena na 10 %. V simulaci se projevilo především zpoždění vlaků výchozích ze stanice Smíchovské nádraží obrat a Českomoravská obrat. Toto zpoždění se přenáší na další vlaky a způsobuje narušení stability jízdního řádu.

Druhou variantou byla simulace zpoždění vzniklých v nácestných stanicích. Maximální hodnota zpoždění byla stanovena na 35 s. Celkem bylo v této variantě autorem náhodně zpožděno 15 vlaků. I v případě této varianty zpoždění docházelo v úseku Smíchovské nádraží – Českomoravská k přenosu zpoždění na další vlaky a nestabilitě jízdniho řádu.

Třetí varianta uvažuje zpoždění vlaku vzniklé poruchou soupravy. Maximální rychlost tohoto vlaku je omezena, stejně jako v předcházejících případech variant s poruchou soupravy, na  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . V tomto případě byla porouchána souprava vlaku č. 4. Jeho zpoždění se přenáší na další vlaky, jak je patrné v simulaci poruchy v příloze I. Na obrázku 24 je uveden graf přenosu zpoždění na další vlaky.



**Obrázek 24** Graf přenosu zpoždění při poruše soupravy

**Zdroj:** autor

Z grafu je patrné, že dochází k přenosu zpoždění na další čtyři vlaky. Přenos zpoždění je daný především minimálním intervalem 70 sekund mezi stanicemi Smíchovské nádraží a Černý Most. Jízdní řád pro pásmový provoz je celkově méně stabilní než ostatní navržené jízdní řády a každé zpoždění se projeví jeho přenosem na další vlaky.

#### 5.4.5 Smíšený provoz

Pro ověření možnosti smíšeného provozu souprav byl zpracován jízdní řád s intervalem 141 sekund. Tento interval je na trase B využíván jako špičkový. Smíšený provoz metra je uvažován pouze jako dočasné řešení při modernizaci tratě na automatický provoz. Pro simulační model bylo uvažováno periodické střídání automatických vlaků a vlaků konvenčních. Pro obrat ve stanici Černý Most jsou využívány tři obratové koleje. Na koleji 1a je prováděn obrat automatických souprav a na kolejích 2a a 4a obrat konvenčních vlaků. Doba pobytu na obratových kolejích je 24 s pro automatický provoz a 296 s pro konvenční provoz. Ve stanici Zličín obrat dochází pouze k obratu vlaků s konvenčními soupravami. Doba pobytu

v obrátové koleji je 121 s. Zkonstruovaný nákresný jízdní řád je uveden v příloze J. Jedná se o čtyřhodinový jízdní řád od 4:20 do 8:20 hod. V jízdním řádu je zkonstruováno 103 tras pro vlaky s přepravou cestujících a 28 tras soupravových vlaků. Pro zajištění provozu je potřeba 57 souprav, včetně dvou náhradních souprav. Obě náhradní soupravy jsou vybaveny pouze konvenčním vlakovým zabezpečovačem. K dispozici tedy musí být 36 souprav pro automatický provoz a 21 konvenčních souprav. Tato potřeba souprav je dána především nutností opakovaného odstavování a přistavování automatických souprav do depa, kdy je v tomto simulačním modelu vždy zapotřebí nová souprava. Ve skutečném provozu by bylo možné tento problém vyřešit obratem na spojovací koleji. Pro ověření funkčnosti sestaveného jízdního řádu byla provedena simulace, která je uvedena v příloze J. Pro zjištění stability jízdního řádu byly testovány tři varianty zpoždění.

První varianta zpoždění ověřuje chování simulace při zpoždění vlaku při odjezdu z obrátové stanice. Maximální doba zpoždění byla stanovena na 70,5 s, průměrná doba zpoždění na 35,3 s a pravděpodobnost vzniku zpoždění 10 %. Při simulaci této varianty zpoždění docházelo k opakovanému přenosu zpoždění na další vlaky a k navyšování zpoždění v obrátových stanicích. Simulace celkově prokázala nízkou stabilitu navrženého jízdního řádu.

Druhá varianta ověřuje chování jízdního řádu při vzniku zpoždění v nácestných stanicích, postupně bylo testováno maximální zpoždění 60 s, 45 s a 30 s v deseti náhodně vybraných stanicích. Teprve při hodnotě maximálního zpoždění 30 s je jízdní řád stabilní a během simulace zpoždění konverguje k nule.

Třetí variantou byla porucha jedné z automatických souprav. Omezená maximální rychlost soupravy vlaku č. 6 způsobí zpoždění dalších tří vlaků, které jedou za tímto vlakem. Po odstavení porouchané soupravy do depa Zličín však dojde k vyrovnání zpoždění bez vlivu na další provoz.

Na základě výstupů simulace bylo zjištěno, že takový typ provozu je z hlediska zabezpečení jízdy jednotlivých vlaků vyhovující. Použitím tohoto typu provozu se však ztrácejí výhody plynoucí z automatického provozu v režimu GoA4. Zároveň by bylo nutné současně provozovat dva vzájemně kompatibilní zabezpečovací systémy. Simulací zpoždění byla také zjištěna nízká stabilita jízdního řádu při vzniku náhodných zpoždění. Použitím takového provozního konceptu by bylo možné v přechodové fázi mezi konvenčním a automatickým provozem udržet stávající rozsah dopravy.

## 5.5 Shrnutí výsledků simulace

Simulací konvenčního provozu byla prokázána správnost modelu a možnost dodržení stanovených jízdních dob. Úpravou modelu pro provoz se zjednodušeným zabezpečovacím zařízením ARS však došlo ke zvýšení hodnoty teoretického intervalu mezi jízdami následných vlaků z 90 s na 114 s. I přes tuto úpravu však bylo možné simulací ověřit minimální v současnosti používaný interval 141 s.

Následně byl model upraven pro automatický provoz. Výsledkem testování možností automatického provozu je teoretický minimální interval jízd následných vlaků 70 s. Pro automatický provoz se jako limitující faktor ukázaly především obraty vlaků v konečných stanicích. Problém by bylo možné vyřešit zkrácením bezpečnostní vzdálenosti pomocí instalace zpřesňujících balíz a úpravou chování zabezpečovacího zařízení. Tato úprava by spočívala především v možnosti jízdy vlaku omezenou rychlostí při minimalizaci této bezpečnostní vzdálenosti. Druhou variantou by byla úprava konfigurace stávajícího kolejiště.

Simulace provozu v automatickém režimu se zabezpečovací zařízením CBTC prokázala možnost provozování vlaků v tomto režimu. Celkově byly navrženy tři provozní koncepty, které jsou zaměřeny na možnosti a specifika automatického provozu. Všechny provozní koncepty byly podrobeny simulaci zpoždění pro ověření stability navržených jízdních řádů. Přestože má každý ze sestavených jízdních řádů pro automatický provoz jinou schopnost vyrovnání zpoždění, tak ve všech třech variantách vzniklá zpoždění postupně konvergují k nule.

Kromě zcela automatického provozu byl navržen i provozní koncept pro smíšený provoz. Simulací jízdního řádu konceptu smíšeného provozu byla ověřena možnost koexistence dvou zabezpečovacích systémů. Problémem tohoto řešení je zejména nutnost vzájemné kompatibility obou provozovaných systémů. Zároveň je tato varianta náročná na organizaci provozu a sestavování oběhů. Nicméně pro přechodovou fázi mezi konvenčním a automatickým provozem je tato forma provozu jedinou možností pro zachování současného rozsahu provozu.

## ZÁVĚR

Zavedení automatického provozu na trati provozované konvenčním způsobem je velice komplikovaný problém. Přesto automatický provoz oproti konvenčnímu provozu přináší řadu výhod, jako je zvýšení nabídky spojů, zlepšení bezpečnosti, úspora provozního personálu a celkové zkvalitnění služby. Zabezpečovací zařízení ARS, které je v současné době používáno pro zabezpečení provozu na trase B je z hlediska stupňů automatizace na úrovni GoA1. V práci je uvažováno zvýšení stupně automatizace na úroveň GoA4, tedy na zcela bezobslužný provoz.

Pro simulaci jednotlivých provozních konceptů bylo použito softwaru OpenTrack, který je vhodným nástrojem pro ověření vlivu modernizace zabezpečovacího zařízení na skutečný provoz. Pro validaci modelu byl sestaven tzv. ověřovací provozní koncept, který prokazuje správnost vytvořeného modelu. Na podkladě tohoto ověřovacího provozního konceptu byl vytvořen model pro automatický provoz. Na základě simulace automatického provozu bylo zjištěno, že minimální teoretický interval jízdy následných vlaků je pro trasu B a soupravu 81 – 71M je 70 sekund. Limitujícím faktorem jsou z hlediska simulačního modelu obrátové stanice, které umožňují minimální interval jízdy vlaků 109 sekund. V softwaru OpenTrack byly sestaveny tři provozní koncepty pro automatický provoz, které ověřují možnost skutečného provozu v automatickém režimu se zabezpečovacími zařízeními CBTC. Dále byl sestaven provozní koncept, který ověřuje možnost smíšeného provozu v přechodové fázi mezi konvenčním a zcela automatickým provozem.

Autor práce se domnívá, že stanovené cíle práce byly splněny. Na základě všech vytvořených simulací bylo zjištěno, že zavedení automatického provozu na trase B je možné. Kromě úprav zabezpečovacího zařízení a vybavení stanic by ke zlepšení kvality provozu přispěla také výměna stávajícího vozového parku za nová vozidla s vyšší přepravní kapacitou a moderní koncepcí.

## SEZNAM CITACÍ

- (1) ČSN EN 62267: *Drážní zařízení - Automatizovaná městská doprava s vyhrazenou vodící dráhou (AUGT) - Bezpečnostní požadavky*. 1. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- (2) ČSN EN 62290 - 1. *Drážní zařízení - Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou - Část 1: Systémové principy a základní pojmy*. 2. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- (3) ČSN EN 62290 - 2. *Drážní zařízení - Systémy řízení městské dopravy s vyhrazenou vodící dráhou - Část 2: Specifikace funkčních požadavků*. 2. Praha: Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- (4) Statistics Brief: World report on metro automation - July 2016. In: *UITP* [online]. Brusel: UITP, 2016 [cit. 2016-11-1]. Dostupné z: <http://www.uitp.org/world-report-metro-automation>
- (5) Lille VAL, France. In: *Railway-technology.com* [online]. Railway Technology [cit. 2016-11-2]. Dostupné z: [http://www.railway-technology.com/projects/lille\\_val/](http://www.railway-technology.com/projects/lille_val/)
- (6) UITP: Barcelona Line 9/10. *UITP: Observatory of automated metro* [online]. 2016 [cit. 2016-11-9]. Dostupné z: <http://metroautomation.org/barcelona-transport-metropolitans-de-barcelona-tmb/>
- (7) *TMB: Automated metro line* [online]. Barcelona: Transports Metropolitans de Barcelona, 2017 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <https://www.tmb.cat/en/about-tmb/transport-network-improvements/automated-metro/which-lines>
- (8) Bezobslužná linka L9 v barcelonském metru prodloužena na letiště. *Proelektrotechniky.cz* [online]. redakce Proelektrotechniky.cz, 2016 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <http://proelektrotechniky.cz/automatizace-dopravy/77.php>
- (9) TMB: Metro L11 - Trinitat Nova / Can Cuiàs. *TMB* [online]. Barcelona: Grupo TMB, 2016 [cit. 2016-11-9]. Dostupné z: <https://www.tmb.cat/es/barcelona/metro/-/lineametro/L11>
- (10) *Railway gazette: Line 11 opens* [online]. Londýn: Railway gazette, 2004 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/line-11-opens.html>



- (11) *THE BUDAPEST METRO NETWORK: The Operating Metro Lines in Budapest* [online]. In: . Budapešť, 2015 [cit. 2016-11-9]. Dostupné z: [http://www.uvaterv.hu/uploads/referenciak/pdf/the\\_operating\\_metro\\_lines\\_in\\_budapest.pdf](http://www.uvaterv.hu/uploads/referenciak/pdf/the_operating_metro_lines_in_budapest.pdf)
- (12) Official website of Metro4. *Official website of Metro4* [online]. DBR Metro, 2015 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: [http://www.metro4.hu/index.php?lang\\_id=en&menu=1](http://www.metro4.hu/index.php?lang_id=en&menu=1)
- (13) *Railway gazette: Automated metro Line M4 opens in Budapest* [online]. Londýn: Railway gazette, 2014 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/line-11-opens.html>
- (14) SCHWANDL, Robert. *Urbanrail.net: Paris* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/eu/fr/paris/paris.htm>
- (15) Siemens Extends first driveless metro in Paris. In: *Siemens AG* [online]. 2014 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: [http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2014/mobility/pr2014100022moen.htm&content\[\]=MO](http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2014/mobility/pr2014100022moen.htm&content[]=MO)
- (16) *Alstom: Alstom and RATP celebrate the 67th and final MP05 metro train* [online]. Paříž: Alstom, 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/press-centre/2015/10/alstom-and-ratp-celebrate-the-67th-and-final-mp05-metro-train/>
- (17) Paris metro Line 14. In: *Sytra.com* [online]. 2013 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: [https://www.sytra.com/IMG/pdf/metro\\_meteor\\_en-3.pdf](https://www.sytra.com/IMG/pdf/metro_meteor_en-3.pdf)
- (18) *Alstom: The design of Ile de France's future metro is unveiled* [online]. Paříž: Alstom, 2016 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/press-centre/2015/10/alstom-and-ratp-celebrate-the-67th-and-final-mp05-metro-train/>
- (19) SCHWANDL, Robert. ROMA. In: *UrbanRail.net* [online]. 2015 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/eu/it/rom/roma.htm>
- (20) *Proelektrotechniky.cz: Bezobslužná linka C metra v Římě otevřela druhý úsek* [online]. Praha: Proelektrotechniky.cz, 2015 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/automatizace-dopravy/67.php>
- (21) Driverless Unattended Metro. In: *AnsaldoSTS* [online]. Janov, 2014 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: [http://www.ansaldo-sts.com/sites/ansaldosts.message-asp.com/files/imce/metro\\_driverless\\_eng.pdf](http://www.ansaldo-sts.com/sites/ansaldosts.message-asp.com/files/imce/metro_driverless_eng.pdf)
- (22) Description of the Copenhagen Metro. In: *DR.dk* [online]. 2009 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: [https://www.dr.dk/NR/rdonlyres/36F44712-A8F1-45EC-BF3E-59441D78201E/2472811/Copenhagen\\_Metro.pdf](https://www.dr.dk/NR/rdonlyres/36F44712-A8F1-45EC-BF3E-59441D78201E/2472811/Copenhagen_Metro.pdf)

- (23) SCHWANDL, Robert. Lyon. In: *UrbanRail.net* [online]. 2004 [cit. 2016-11-18].  
Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/eu/fr/lyon/lyon.htm>
- (24) *Siemens: Lyon (France) Line D The first driverless heavy metro in Europe* [online].  
Châtillon cedex: Siemens, 2012 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z:  
[https://w5.siemens.com/france/web/fr/sts/en\\_france/Documents/Fiche\\_Lyon\\_ligneD\\_2012\\_en\\_sstraitscoupe.pdf](https://w5.siemens.com/france/web/fr/sts/en_france/Documents/Fiche_Lyon_ligneD_2012_en_sstraitscoupe.pdf)
- (25) *Alstom: Alstom to provide new automation systems for lines B and D of the Lyon metro* [online]. Paříž: Alstom, 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z:  
<http://www.alstom.com/press-centre/2017/832228/alstom-to-provide-new-automation-systems-for-lines-b-and-d-of-the-lyon-metro/>
- (26) SCHWANDL, Robert. Milano. In: *UrbanRail.net* [online]. 2006 [cit. 2016-11-18].  
Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/eu/it/mil/milano.htm>
- (27) Milan Metro Line 5 Extension, Italy. In: *Railway-technology.com* [online]. 2015 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/milan-metro-line-5/>
- (28) Nuremberg U-Bahn. In: *MetroEasy.com* [online]. 2015 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z:  
<http://www.metroeasy.com/nuremberg-u-bahn.html>
- (29) Nuremberg Automatic U-Bahn, Germany. In: *Railway-technology.com* [online]. 2008 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/neuremburgautobahn/>
- (30) Driverless metro in Nuremberg, Germany. In: *Siemens AG* [online]. Berlín, 2014 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z:  
<https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/metros/slideshow/metro-nuernberg-en.pdf>
- (31) Torino Metro Line 1, Italy. In: *Railway-technology.com* [online]. 2016 [cit. 2016-11-11].  
Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/torino-metro/>
- (32) *Railway - technology.com: Lille VAL, France* [online]. Francie: Railway -  
technology.com, 2008 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: [http://www.railway-technology.com/projects/lille\\_val/](http://www.railway-technology.com/projects/lille_val/)
- (33) ALESSIO, Ferrari. Product Line Engineering Applied to CBTC Systems Development.  
In: *Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione* [online]. Firenze, 2014 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <http://puma.isti.cnr.it/rmydownload.php?filename=cnr.isti/cnr.isti/2012-A2-043/2012-A2-043.pdf>.

- (34) CHEN, R. a J. GUO. *Development of the new CBTC system simulation and performance analysis* [online]. Southwest Jiaotong, China, 2010 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/114/21448>. School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, China.
- (35) CBTC Connectivity Solutions White paper. In: *HUBER+SUHNER AG* [online]. Pfäffikon, 2011 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: [http://www.railwaydirectory.net/company/feature/project\\_references/hash/a4c286bc338f6eac9e60034c4152aba0/name/White%20Paper%20-%20CBTC%20Connectivity%20Solutions.pdf](http://www.railwaydirectory.net/company/feature/project_references/hash/a4c286bc338f6eac9e60034c4152aba0/name/White%20Paper%20-%20CBTC%20Connectivity%20Solutions.pdf)
- (36) TAZAKI, Tomoaki. Development of CBTC for Global Markets. In: *Hitachi* [online]. 2012 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: [http://www.hitachi.com/rev/pdf/2012/r2012\\_07\\_110.pdf](http://www.hitachi.com/rev/pdf/2012/r2012_07_110.pdf)
- (37) FOJTÍK, Pavel. *30 let pražského metra*. 2., rozš. vyd. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, 2004. ISBN 80-239-2704-3.
- (38) *MHD Praha* [online]. Praha: MHD Praha, 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [www.mhd-praha.eu](http://www.mhd-praha.eu)
- (39) DOPRAVNÍ PODNIK HL.M. PRAHY, ROPID, CHAPS SPOL. S.R.O. *SBORNÍK: Kompletního přepravního průzkumu metra*. 1. Praha, 2015.
- (40) *Orientační schéma: Místní poměry trati B*. Praha, 2004.
- (41) REJDAL, Tomáš. *Metroweb.cz: Modernizovaná souprava 81-71M* [online]. Praha: Metroweb.cz, 2005 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.metroweb.cz/metro/81-71M/81-71M.htm>
- (42) DOPRAVNÍ PODNIK HL.M. PRAHY: *Parametry rekonstruovaného vlaku metra typu 81-71M*. 1. Praha, 2009.
- (43) Technické údaje souprav. *Dopravní podnik hlavního města Prahy* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: <http://strategieprojekty.dpp.cz/vozy/metro/vozy-metra-m1/technicke-udaje-souprav>
- (44) Souprava M1 pražského metra. *METROWEB* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: <https://www.metroweb.cz/old/03leden24/metro/M1/M1-info.htm>
- (45) *Tabulka parametrů nových vozů metra typu M1, garantovaných DPMETRO*. Praha, 2009.
- (46) REJDAL, Tomáš. *Metroweb.cz: Liniový vlakový zabezpečovač ARS* [online]. Praha: Metroweb.cz, 2005 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.metroweb.cz/metro/ars.htm>

- (47) DOPRAVNÍ PODNIK HL.M. PRAHY, ODDĚLENÍ ZABEZPEČOVACÍ TECHNIKY. *Systém Automatické regulace rychlosti (ARS)*. 1. Praha, 1998.
- (48) FIKEJZ, Jan. *LOKALIZACE POLOHY KOLEJOVÝCH VOZIDEL V RÁMCI MODELU ŽELEZNIČNÍ SÍTĚ S VYUŽITÍM TECHNOLOGIE ORACLE NETWORK DATA MODEL* [online]. Pardubice, 2012, 7(III), 49 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: [http://pernerscontacts.upce.cz/27\\_2012/Fikejz.pdf](http://pernerscontacts.upce.cz/27_2012/Fikejz.pdf)
- (49) DOPRAVNÍ PODNIK HL.M. PRAHY, ODDĚLENÍ ZABEZPEČOVACÍ TECHNIKY. *Orientační schémata a kódovací tabulky*. 1. Praha, 1998.
- (50) DOPRAVNÍ PODNIK HL.M. PRAHY. *Interní zdroje DPP*. Praha, 2017.
- (51) MTR South Island Line: Fully Automatic Operation (FAO). *MTR* [online]. 2016 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <http://www.mtr-southislandline.hk/en/about-sil/information.html#fa>
- (52) Alstom and Thales to supply advanced CBTC signalling system to Hong Kong's seven metro lines. *Alstom* [online]. [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/press-centre/2015/1/alstom-and-thales-to-supply-advanced-cbtc-signalling-system-to-hong-kongs-seven-metro-lines->  
[/http://www.proelektrotechniky.cz/automatizace-dopravy/84.php](http://www.proelektrotechniky.cz/automatizace-dopravy/84.php)
- (53) Metro Klang Valley Kuala Lumpur. In: *Siemens AG* [online]. Mnichov, 2016 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/metros/inspiration-citylife-inspiro/inspiro-kuala-lumpur-en.pdf>
- (54) São Paulo Metro, Brazil. In: *Railway-technology.com* [online]. 2016 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/saopaulometro/>
- (55) Singapore's automatic metro line, NEL, begins service. In: *Alstom* [online]. 2003 [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/press-centre/2003/6/Singapores-automatic-metro-line-NEL-begins-service-20030630/>
- (56) SCHWANDL, Robert. SEOUL. In: *UrbanRail.net* [online]. 2015 [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/as/kr/seoul/seoul.htm>
- (57) Thales wins signalling contract for Sin Bundang Line extension in South Korea. In: *Railway-technology.com* [online]. 2012 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/news/newsthales-wins-signalling-contract-for-sin-bundang-line-extension-in-south-korea>

- (58) Brescia Driverless Metro System, Italy. In: *Railway-technology.com* [online]. 2016 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/brescia-driverless-metro-system/>
- (59) Dubai Metro Network, United Arab Emirates. In: *Railway-technology.com* [online]. 2016 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/dubai-metro/>
- (60) The Dubai Metro, the World's Longest Fully Automated Metro Network. In: *Mitsubishi Heavy Industries* [online]. 2012 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e492/e492001.pdf>
- (61) SCHWANDL, Robert. YOKOHAMA. In: *UrbanRail.net* [online]. 2014 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/as/jp/yokohama/yokohama.htm>
- (62) SERRADELL, J. YOKOHAMA. In: *METROORBITS.ORG* [online]. 2008 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://mic-ro.com/metro/metrocity.html?city=Kobe>
- (63) SCHWANDL, Robert. Osaka. In: *UrbanRail.net* [online]. 2011 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/as/jp/osaka/osaka.htm>
- (64) SCHWANDL, Robert. Busan. In: *UrbanRail.net* [online]. 2007 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/as/kr/busan/busan.htm>
- (65) Busan Metro Line No. 4. In: *Woojin Industrial Systems* [online]. 2016 [cit. 2016-11-8]. Dostupné z: [http://www.wjis.co.kr/BUSAN%20Metro%20Mo.4\\_06.pdf](http://www.wjis.co.kr/BUSAN%20Metro%20Mo.4_06.pdf)
- (66) SCHWANDL, Robert. Daegu. In: *UrbanRail.net* [online]. 2004 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/as/kr/busan/busan.htm>
- (67) Daegu Urban Railway Line 3, South Korea. In: *Railway-technology.com* [online]. 2015 [cit. 2016-11-8]. Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/daegu-urban-railway-line-3/>
- (68) SCHWANDL, Robert. TaiPei. In: *UrbanRail.net* [online]. 2004 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/as/taip/taipei.htm>
- (69) Taipei Metro, Taiwan. In: *Railway-technology.com* [online]. 2015 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/taipei/>
- (70) INNOVIA Metro – Taipei, Taiwan. In: *Bombardier* [online]. 2016 [cit. 2016-11-8]. Dostupné z: <http://www.bombardier.com/en/transportation/projects/project.innovia-taipei-taiwan.html>
- (71) Driverless Unattended Metro. In: *Ansaldo STS a Hitachi Group Company* [online]. Janov, 2015 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: [http://www.ansaldo-sts.com/sites/ansaldosts.message-asp.com/files/imce/asts\\_hitachi\\_driverless\\_english\\_lr\\_0.pdf](http://www.ansaldo-sts.com/sites/ansaldosts.message-asp.com/files/imce/asts_hitachi_driverless_english_lr_0.pdf)

- (72) SCHWANDL, Robert. Tokyo. In: *UrbanRail.net* [online]. 2010 [cit. 2016-11-17].  
Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/as/jp/tokyo/tokyo.htm>
- (73) Yurikamome: Tokyo's Automated Transportation System. In: *Yurikamome* [online]. 2014 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z:  
[http://www.japan.go.jp/tomodachi/\\_userdata/pdf/2016/spring-summer2016/p30\\_31.pdf](http://www.japan.go.jp/tomodachi/_userdata/pdf/2016/spring-summer2016/p30_31.pdf)
- (74) Torino Metro Line 1, Italy. In: *Railway-technology.com* [online]. 2016 [cit. 2016-11-11].  
Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/torino-metro/>
- (75) Torino Metro Line 1, Italy. In: *Railway-technology.com* [online]. 2016 [cit. 2016-11-11].  
Dostupné z: <http://www.railway-technology.com/projects/torino-metro/>
- (76) *Detroit People Mover: Company Profile & Mission* [online]. Detroit: Detroit People Mover, 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.thepeoplemover.com/about-dpm/overview/>
- (77) SCHWANDL, Robert. Jacksonville. In: *UrbanRail.net* [online]. 2007 [cit. 2016-10-28].  
Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/am/jack/jacksonville.htm>
- (78) SCHWANDL, Robert. Guangzhou. In: *UrbanRail.net* [online]. 2007 [cit. 2016-10-15].  
Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/as/cn/guan/guangzhou.htm>
- (79) References: Fully automated metro lines worldwide. In: *Siemens AG* [online]. Berlin, 2012 [cit. 2016-11-13]. Dostupné z:  
<http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2012/infrastructure-cities/mobility-logistics/2012-04-metro-paris/references-en.pdf>
- (80) INNOVIA ART 200 – Yongin, South Korea. In: *Bombardier* [online]. 2016 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z:  
<http://www.bombardier.com/en/transportation/projects/project.innovia-yongin-south-korea.html>
- (81) INNOVIA Monorail 200 – Las Vegas, USA. In: *Bombardier* [online]. 2015 [cit. 2016-11-13]. Dostupné z:  
<http://www.bombardier.com/en/transportation/projects/project.innovia-las-vegas-usa.html?f-region=americas&show-by-page=50&page=1&f-country=us&f-segment=all&f-type=all&f-name=all>
- (82) SCHWANDL, Robert. Lausanne. In: *UrbanRail.net* [online]. 2004 [cit. 2016-11-15].  
Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/eu/ch/vd/lausanne.htm>
- (83) SCHWANDL, Robert. Miami. In: *UrbanRail.net* [online]. 2014 [cit. 2016-11-15].  
Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/am/miam/miami.htm>

- (84) SCHWANDL, Robert. Nagoya. In: *UrbanRail.net* [online]. 2015 [cit. 2016-11-15].  
Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/as/jp/nagoya/nagoya.htm>
- (85) SCHWANDL, Robert. New York City. In: *UrbanRail.net* [online]. 2016 [cit. 2016-11-1].  
Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/am/nyrk/new-york.htm>
- (86) SLAVÍK, Jakub. CBTC: projekt automatického metra pro Rennes zahájen.  
In: *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-11-8]. Dostupné z:  
<http://www.proelektrotechniky.cz/automatizace-dopravy/27.php>
- (87) Fully automatic VAL metro system goes operational in Uijeongbu, South Korea.  
In: *Siemens AG* [online]. 2015 [cit. 2016-11-5]. Dostupné z:  
<http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2012/infrastructure-cities/rail-systems/icrl201207009.htm&content%5b%5d=ICRL&content%5b%5d=MO>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

PŘÍLOHA A – TABULKA – STUPNĚ AUTOMATIZACE

PŘÍLOHA B – FUNKCE OCC V BEZPEČNOSTI SYSTÉMU

PŘÍLOHA C – OSTATNÍ AUTOMATICKÉ PROVOZY METRA

PŘÍLOHA D – JÍZDNÍ PROFILY SOUPRAVY 81 – 71M

PŘÍLOHA E – OVĚŘOVACÍ PROVOZNÍ KONCEPT (na CD)

PŘÍLOHA F – NULTÁ VARIANTA (na CD)

PŘÍLOHA G – MAXIMÁLNÍ VARIANTA (na CD)

PŘÍLOHA H – GRAF ZATÍŽENÍ MEZISTANIČNÍCH ÚSEKŮ

PŘÍLOHA I – PÁSMOVÝ PROVOZ (na CD)

PŘÍLOHA J – SMÍŠENÝ PROVOZ (na CD)



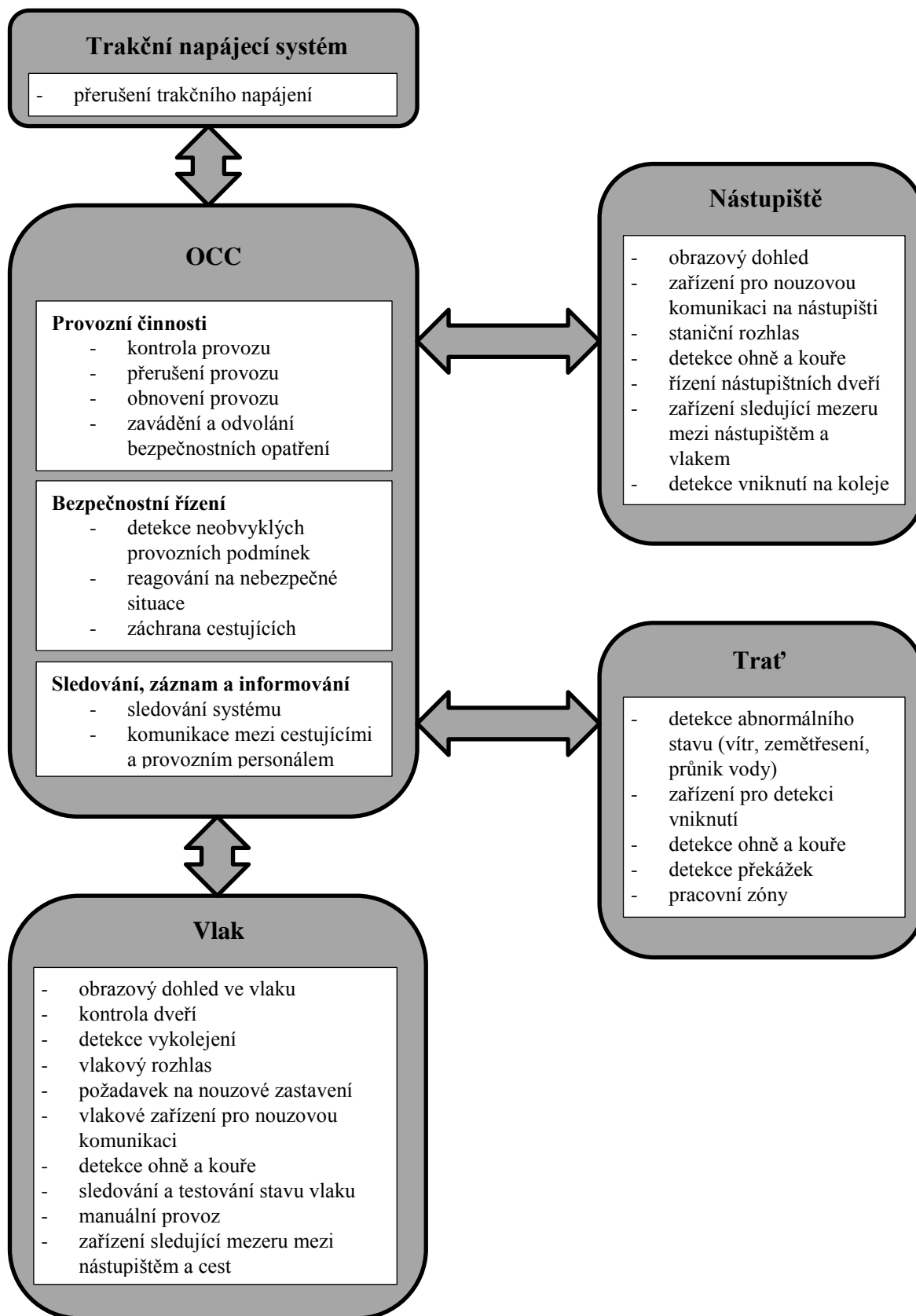
# PŘÍLOHA A – TABULKA – STUPNĚ AUTOMATIZACE

Tabulka A 1 Stupně automatizace

Základní funkce provozu vlaku	Provoz vlaku podle rozhledu	Neautomatizovaný provoz	Poloautomatizovaný provoz	Provoz vlaku bez strojvedoucího	Provoz vlaku bez obsluhy
	GoA0	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
Zajištění bezpečné jízdy vlaku	Zabezpečení jízdní cesty	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS
	Zajištění bezpečného rozestupu vlaků	Provozní personál	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS
	Zajištění bezpečné rychlosti	Provozní personál	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS
Řízení vlaku	Zrychlování a brzdění	Provozní personál nebo pouze částečný dohled UGTMS	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS
Dohled nad vodící dráhou	Zabránění střetu s překážkami	Provozní personál	Provozní personál	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS
	Zabránění střetu s osobami v kolejišti	Provozní personál	Provozní personál	zařízení UGTMS	zařízení UGTMS
Dohled nad pohybem cestujících	Otevírání dveří pro cestující	Provozní personál	Provozní personál	Provozní personál	zařízení UGTMS
	Zabránění úrazům osob mezi vozy nebo v nástupním prostoru	Provozní personál	Provozní personál	Provozní personál	zařízení UGTMS
	Zajištění podmínek pro bezpečný rozjezd	Provozní personál	Provozní personál	Provozní personál	zařízení UGTMS
Provozování vlaku	Uvádění vlaku do provozu a odstavení z provozu	Provozní personál	Provozní personál	Provozní personál	zařízení UGTMS
	Dohled nad stavem vlaku	Provozní personál	Provozní personál	Provozní personál	zařízení UGTMS
Zajištění detekce a řešení nouzových situací	Detekce ohně/kouře a detekce vykoľejení, detekce roztržení vlaku, nouzová signalizace cestujících	Provozní personál	Provozní personál	Provozní personál	zařízení UGTMS nebo personál v OCC

Zdroj: (1, s. 9), autor

## PŘÍLOHA B – FUNKCE OCC V BEZPEČNOSTI SYSTÉMU



Obrázek B 1 Možné funkce OCC z hlediska bezpečnosti systému

Zdroj: (1, s. 52), autor

## **PŘÍLOHA C – OSTATNÍ AUTOMATICKÉ PROVOZY METRA**

V této příloze jsou uvedeny systémy automatického metra, které nejsou uvedeny v rámci kapitoly 2. Jedná se o stručný popis systémů provozovaných v Evropě i ve světě. Pro přehlednost jsou systémy rozděleny v závislosti na kapacitě souprav.

### **Linky automatického metra s kapacitou vyšší než 700 osob/vlak**

V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé systémy metra, ve kterých jsou provozovány vlaky s kapacitou vyšší než 700 cestujících. Jedná se zpravidla o páteřní linky metra, kde jsou provozovány tři a vícevozové soupravy.

#### ***Automatického metra v Hong Kongu***

Provozovatelem sítě metra v Hong Kongu je společnost *Mass Transit Railway* (MTR). V současné době se dokončuje několik projektů automatického metra. Prvním z nich je *South Island Line*, která je ve zkušebním provozu a pro cestující byla otevřena na konci roku 2016. Délka této linky je 7 km a obsluhuje celkem 5 stanic.(51). Dodavatelem ZZ pro tuto linku je společnost Alstom, která podepsala s MTR rámcovou smlouvu na dodávku ZZ pro celkem 7 linek, na kterých má být postupně zaveden bezobslužný provoz (52).

#### ***Projekt automatického metra v Kuala Lumpur***

V roce 2017 bude otevřena první bezobslužná linka metra v Malajsii. Konkrétně se jedná o linku 1 budovaného městského dopravního systému *Klang Valley Mass Rapid Transit*. Linka 2 má být otevřena v roce 2022. Obě linky by měly mít celkovou délku 103 km a obsluhovat 68 stanic. Zároveň budou obě linky využívat ZZ typu CBTC Bombardier CITYFLO 650 (53).

Pro obě linky má být dodáno 58 jednotek Siemens Inspiro. Tyto jednotky budou čtyřvozové, každá o kapacitě 1554 cestujících, při délce soupravy 90 metrů. Napájení je realizováno třetí kolejnici. Trakční napájecí systém je stejnosměrný o napětí 750 V. Maximální podélný sklon je pro tyto jednotky stanoven na 40 %. Jednotky mají být provozovány v režimu GoA4, tedy zcela bez vlakového personálu, a proto jsou vybaveny řadou kamer a detekčních systémů (53).

#### ***Automatické metra Sao Paulu***

Tato síť metra má celkem pět linek. Linky 1, 2 a 3 jsou provozovány konvenčním způsobem, tedy se strojvedoucími. Linky číslo 4 a 5 byly osazeny ZZ CBTC Siemens

Trainguard MT. Linka číslo 4 byla dokončena v roce 2014, má délku 12,8 km a obsluhuje 11 stanic. Na této lince jsou v provozu šestivozové soupravy od konsorcia firem Alstom, Siemens a CAF. Linka číslo 5 byla dokončena v roce 2012 a má jako jediná normální rozchod 1435 mm a stejnosměrnou trakční napájecí soustavu o napětí 1,5 kV. Ostatní linky Sao Paulu jsou širokorozchodné (1600 mm) a požívají stejnosměrnou trakční napájecí soustavu o napětí 750 V. Linka číslo 5 je dlouhá 8,4 km a obsluhuje 6 stanic. Na této lince jsou v provozu osmivozové jednotky od společnosti Hyundai – ROTEM (54).

### ***Automatické metro v Singapuru***

V Singapuru byla v roce 2003 uvedena do provozu první automatická linka vysokokapacitního metra. Konkrétně se jedná o linku *North – East Line*. Společnost Alstom je dodavatelem vozového parku i ZZ. Bylo dodáno 25 šestivozových jednotek typu METROPOLIS. Kapacita jednotky je 1900 cestujících a maximální rychlost  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Zabezpečovací zařízení je typu CBTC Alstom URBALIS 300. Toto ZZ umožňuje provoz vlaků ve špičkovém intervalu 90 s (55).

### ***Automatické metro v Soulu***

Soulské metro má celkem 18 linek a tři hlavní provozovatele. *Seoul Metropolitan Subway Corporation* provozuje linky číslo 1 – 4. *Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation* provozuje linky číslo 4 – 8 a společnost *Veolia* provozuje linku číslo 9. Dalších 9 linek není provozováno pod čísly, ale každá má svůj název a vlastního provozovatele. V budoucnosti se počítá s tím, že všechny linky metra budou provozovány v automatickém režimu (56).

V současné době je v provozu jediná linka automatického metra, takzvaná *DX Line* nebo *Shin Bundang Line*. Délka této linky je 21 km, ale není doposud zcela dostavěna. Na této lince je v provozu 15 vlakových souprav. Maximální rychlost vlaků je omezena na  $90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Zabezpečovací zařízení je typu CBTC. Dodavatelem ZZ pro první dvě fáze výstavby linky je společnost Thales, která zde instalovala svůj systém SelTrac (57).

## **Linky automatického metra s kapacitou 300 – 700 osob/vlak**

V této kapitole jsou popsány systémy metra se střední kapacitou souprav. Mezi systémy automatických provozů metra je tato skupina svým počtem linek zastoupena nejvíce.

### ***Automatické metro v Brescii***

Město Brescia má pouze jednu linku metra s třinácti stanicemi. Tato linka byla otevřena v březnu roku 2013 a má délku 13,1 km. Pro bezpečnost cestujících jsou na nástupištích

zbudovány bezpečnostní skleněné dveře. Zabezpečovací zařízení je typu CBTC od firmy Ansaldo STS, které kromě radiofrekvenčního přenosu používá i kolejové obvody.

Společnost AnsaldoBreda dodala pro tuto linku 18 třívozových souprav. Tyto soupravy mají kapacitu 72 sedících a 228 stojících cestujících. Souprava je dlouhá 39 m a její maximální rychlost je  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Soupravy metra přepraví 8 500 osob za hodinu. Interval na lince se pohybuje mezi třemi a šesti minutami (58).

### ***Automatické metro v Dubaji***

Dubajské metro má celkem dvě automatické linky. První linkou je červená linka, která má délku 52,1 km a je nejdelší automatizovanou linkou metra na světě. Červená linka má 29 stanic. Druhou linkou je zelená linka, která má délku 22,5 km. Zelená linka má 18 stanic. V konečné fázi by dubajské metro mělo mít 5 linek o celkové délce 320 km (59).

Vozový park dubajského metra tvoří pětivozové jednotky o délce 75 m a kapacitě 400 cestujících. Celkově je těchto jednotek v provozu 86. Na rozdíl od ostatních systémů metra mají tyto jednotky 1. a 2. vozovou třídu. Maximální rychlost vlaků je  $90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Obě linky mají dohromady přepravní kapacitu 280 000 cestujících za den (59).

Zabezpečovací zařízení je typu CBTC. Toto zařízení umožňuje provoz souprav v minimálním intervalu 90 s. Dodavatelem zabezpečovacího zařízení je Missubishi Heavy Industry Corporation spolu s firmou Thales. Konkrétně se jedná o ZZ typu SelTrac. Hlavní komunikační síť ZZ tvoří více než 500 km optických kabelů. Kromě běžné komunikační sítě je zbudována i náhradní větev pro komunikaci mezi vlaky a řídicím centrem. Všechny stanice jsou vybaveny skleněnými bezpečnostními dveřmi na nástupištích (60)

### ***Automatické metro v Jokohamě***

Jokohama je druhé největší město v Japonsku. V automatickém provozu je zde jediná linka metra. Jedná se o metro na pneumatikách napájené třetí napájecí kolejnicí. Oficiální název linky je *Kanazawa Seaside Line*. Linka byla otevřena 1989 a je dlouhá 10,6 km (61).

### ***Automatické metro v Kóbe***

V Kóbe jsou v provozu dvě bezobslužné linky metra. Jedná se o linky *Port Liner* a *Rokko Liner*. Linka *Port Liner* byla otevřena již v roce 1981. Linka *Rokko Liner* byla otevřena v roce 1990. Obě linky jsou provozovány jako systém lehkého metra na pneumatikách. Celková délka obou linek je 30,6 km a obsluhují dohromady 26 stanic. Trakční napájení je realizováno třetí kolejnicí s napětím 600 a 1500 V. Denně je na těchto linkách přepraveno přibližně 332 000 cestujících (62).

## ***Ósaka***

Ósacké metro má síť linek dlouhou 130 km a má celkem 123 stanic. Jedinou automatickou linkou je *Nanko Port Town Line*. Tato linka je dlouhá 7,9 km a má 10 stanic. Jedná se o systém lehkého metra na pneumatikách. Trakční napájecí soustava je stejnosměrná o napětí 600 V. Jednotky jsou napájeny postranní kolejnicí (63).

## ***Pusan***

Metro v jihokorejském Pusanu má délku celkem 108 km a 102 stanic. Jedinou linkou provozovanou v automatickém režimu je linka 4, která má délku 12,7 km a 14 stanic. Jedná se o systém lehkého metra na pneumatikách, které kompletně dodala jihokorejská firma Woojin. Plný provoz na této lince začal v roce 2011 (64).

Vozový park tvoří šestivozové jednotky o kapacitě 504 cestujících. Hmotnost plně obsazené soupravy je 108 t. Napájení je provedeno postranní kolejnicí a trakční napětí je 750 V. V jednotce jsou umístěny nouzové ovládací pulty pro případné ruční převzetí obsluhy při výpadku automatického řízení (65).

## ***Automatické metro v Tegu***

Metro v jihokorejské Tegu má tři linky o celkové délce 84 km. Celá síť linek má 101 stanic (66). V automatickém provozu je zde linka číslo 3, která je koncipovaná jako monorail. Je dlouhá 24 km, má 30 stanic a byla otevřena v roce 2015. Na lince jsou provozovány třívozové jednotky o kapacitě až 398 cestujících. Maximální rychlost je  $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a průměrná rychlost jednotek na lince je  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Systém monorailu dodala firma Woojin ve spolupráci s firmou Hitachi (67).

## ***Automatické metro v Tchaj-Peji***

Metro v Tchaj-Peji má pět linek s celkovou délkou 128,9 km a 124 stanic. Jediná automatizovaná linka je linka číslo 5. Linka je dlouhá 28,2 km a obsluhuje 23 stanic. Jedná se o systém lehkého metra na pneumatikách (68). Trasa linky je složena ze dvou částí. První část byla otevřena v roce 1996 a nesla název *Muzha Line* a měla 10,5 km a 12 stanic. V roce 2009 byla připojena novostavba tzv. *Neihu Line* a celá linka byla vybavena novým ZZ (69).

Dodavatelem ZZ je firma Bombardier. Použité ZZ je typu CBTC CITYFLO 650. Firma Bombardier dodala kompletní technologické zařízení pro obě části linky a nové soupravy (70).

Na lince číslo 5 jsou požívány dva typy souprav. Nové čtyřvozové soupravy Bombardier INNOVIA (69). A starší soupravy typu VAL 256, které jsou pouze dvouvozové. Celková kapacita linky je 28 400 cestujících za hodinu (69).

V budoucnosti se předpokládá otevření nové okružní linky *Taipei Circular Line*, která bude propojovat všechny linky metra. Tato linka má být provozována v automatickém režimu se ZZ CBTC od firmy Ansaldo STS (71).

### ***Automatické metro v Tokiu***

Metro v japonském Tokiu má celkem 13 linek. Jejich celková délka je více než 200 km. Hlavními provozovateli linek jsou společnosti: *Tokyo Metro Corporation* a *Transportation Bureau of Tokyo Metropolitan Government* (72).

Jedinou automatickou linkou metra v Tokiu je *Yurikamone Line*. Tato linka je dlouhá 14,7 km a obsluhuje 16 stanic. Dodavatelem jednotek a ZZ je společnost Mitsubishi Heavy Industry. Jedná se o systém lehkého metra na pneumatikách. Jednotky používané na této lince jsou čtyřvozové (73).

### ***Automatické metro v Turíně***

První linka metra v italském Turíně byla otevřena v roce 2006. V roce 2011 byla otevřena nová část této linky. Linka číslo 1 turínského metra měří 13,2 km a obsluhuje 21 stanic. Po dokončení zbývajících úseků má být linka prodloužena na celkovou délku 27,5 km. Jedná se o systém lehkého metra na pneumatikách (74).

Na lince číslo 1 jsou provozovány čtyřvozové jednotky VAL 208 od společnosti Siemens. Jednotka je dlouhá 52 m a má kapacitu 440 cestujících. Maximální rychlost je  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Pro napájení jednotek je využívána postranní kolejnice s trakčním napájecím systémem 750 V stejnosměrných (74).

Zabezpečovací zařízení je typu CBTC Siemens Trainguard MT. Pro bezpečnost cestujících jsou nástupiště osazena bezpečnostními skleněnými dveřmi. Prostory stanic jsou pro vyšší bezpečnost snímány kamerovým systémem (74).

### ***Automatické metro ve Vancouveru***

Systém metra ve Vancouveru se nazývá *SkyTrain* a tvoří jej tři plně automatizované linky: *Expo Line*, *Milennium Line* a *Canada Line*. Celková délka linek je 49,5 km. Systém SkyTrain má 54 stanic. Jedná se o systém VAL, tedy o systém lehkého metra na pneumatikách (75).

První linkou, která byla otevřena v roce 1986 je linka *Expo Line*, na ni navazuje *Milennium Line*, která byla otevřena v roce 2002 a dokončena v plné délce v roce 2006. Systém *SkyTrain* na obou těchto linkách používá čtyř a šestivozové soupravy. Jednotky byly dodány společností Bombardier (75).

Další linka provozovaná ve Vancouveru je *Canada line*, které byla otevřena v roce 2009. Tato linka je dlouhá 19,5 km. Používají se na ní dvouvozové jednotky o délce 41 m. Linka je rovněž provozována v automatickém režimu, avšak použitá technologie není kompatibilní s ostatními částmi sítě. V budoucnu je plánována výstavba zcela nové bezobslužné linky s názvem *Evergreen Line* (75).

### **Linky automatického metra s kapacitou menší než 300 osob/vlak**

U těchto systémů jsou zpravidla provozovány dvou nebo jednovozové soupravy. Někdy se můžeme také setkat s označením těchto systémů jako minimetro. V angličtině se používá označení *automatic people mover*.

#### ***Minimetro v Detroitu***

V Detroitu je v provozu jediná linka metra dlouhá 4,7 km. Jedná se o jednosměrný okruh okolo centra města. Byla otevřena v roce 1987 a má celkem 13 stanic. Systém se nazývá *Detroit People Mover*. Jedná se o systém lehkého metra. Základnu vozového parku tvoří 11 plně automatických dvouvozových klimatizovaných jednotek. Jednotky jezdí v intervalu tří až pěti minut po dobu 24 hodin denně. Celková jízdní doba je 15 minut. V roce 2015 tento systém přepravil přibližně 2 500 000 cestujících. V budoucnu se plánuje napojení na budovanou automatickou linku povrchové dopravy *M-1 Rail* (76).

#### ***Minimetro v Jacksonville***

V americkém Jacksonville je provozován automatizovaný systém městského monorailu. Tento systém se nazývá *Skyway* a má osm stanic a délku 4 km. Dodavatelem vozidel je firma Bombardier. Jedná se o dvouvozové jednotky o kapacitě 112 cestujících. Jednotky jsou napájeny třetí kolejnicí a jejich maximální rychlost je  $56 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Maximální kapacita systému je 5000 cestujících denně. Dodavatelem původního ZZ byla společnost Matra. Nové ZZ je typu CBTC Thales SelTrac (77).

#### ***Minimetro v Jonginu***

Metro v Jonginu je součástí sítě metra soulské aglomerace. Tvoří ho linka *EverLine*, která je dlouhá 18,2 km a má celkem 15 stanic. Linka byla uvedena do provozu v roce 2013. Zabezpečovací zařízení dodala firma Bombardier a jedná se konkrétně o typ CITYFLO 650. Vozový park tvoří 30 jednotek Bombardier INNOVIA ART 200. Maximální kapacity jedné jednotky je 226 cestujících. Vlaky v provozu jezdí v tří až deseti minutových intervalech (78).



### ***Minimetro v Kantonu***

Metro v čínském Kantonu má osm linek o celkové délce 225 km a obsluhuje 133 stanic. V automatickém režimu jsou provozovány dvě linky a to číslo 4 a 5. Linka číslo 4 je dlouhá 43,7 km a obsluhuje 15 stanic. Linka číslo 5 je dlouhá 31,9 km a 24 stanic (79).

Zabezpečovací zařízení je typu CBTC Siemens Trainguard MT. Minimální interval mezi vlaky je 90 s. Linky jsou provozovány v automatickém režimu od roku 2010 (80).

### ***Minimetro v Las Vegas***

V Las Vegas je v provozu automatická linka monorailu dlouhá 6,4 km. Systém má celkem 7 stanic. Vozový park tvoří čtyřvozové jednotky Bombardier INNOVIA 200. Vlaky jezdí v intervalu čtyři až pět minut. Nástupiště jsou dlouhá 74 m a jsou zabezpečena skleněnými bezpečnostními dveřmi. Zabezpečovací zařízení je typu CBTC Thales SelTrac (81).

### ***Minimetro v Lausanne***

Metro ve švýcarském Laussane má 2 linky metra o celkové délce 13,7 km. Automatickou linkou je linka M2, která je dlouhá 5,9 km a obsluhuje 14 stanic. Jedná se o systém lehkého metra na pneumatikách. Vozovou základnu tvoří jednotky MP89 od společnosti Alstom. Jedná se o dvouvozové jednotky o kapacitě 222 cestujících a délce 30 m. Maximální rychlost je  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a jízdní doba na lince je 18 minut. Linka používá plně automatické ZZ Alstom URBALIS 300 (82).

### ***Minimetro v Miami***

Metro v Miami má 2 linky klasického metra a 3 linky tzv. *Metromoveru* o celkové délce 43,8 km. Systém klasického metra obsluhuje 22 stanic a *Metromover* 20 stanic. *Metromover* je provozován v automatickém režimu a skládá se ze tří linek. *Brickel loop* je dlouhá 1,8 km, *Omni loop* je dlouhá 2,2 km. Spojením těchto linek vzniká vnitřní smyčka provozovaná jako okružní linka tzv. *Inner loop*. Na síti *Metromoveru* jsou provozovány 12 m dlouhé jednotky, které mohou jezdit samostatně nebo po dvojicích (83).

### ***Maglev ve městě Nagoya***

Metro v japonském městě Nagoya má 5 linek o celkové délce 87 km, které obsluhují 93 stanic. Na linku číslo 1 tzv. *Higashiyama Line*, navazuje automatická linka systému Maglev tzv. *Limino Line*. Tento systém byl uveden do provozu v roce 2005 při příležitosti veletrhu EXPO 2005 (84). Linka je dlouhá 9,2 km. Na lince jsou provozovány třívozové jednotky o kapacitě 244 cestujících. Maximální rychlost je  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Jednotky jsou napájeny třetí kolejnici s napětím 1500V (84).

### ***Minimetro v Queens (New York)***

Metro v New Yorku má 21 linek o délce 337 km a celkem 468 stanic. Na tuto rozsáhlou síť metra navazuje jedna 13 km dlouhá linka na letiště Johna Fidgeralda Kennedyho v Queensu. Tato linka byla otevřena v roce 2003 a slouží ke spojení letiště s městskou sítí linek a k vzájemnému propojení terminálů na letišti. Linka má celkem 10 stanic, z čehož 6 tvoří vnitřní okruh letiště. Tento okruh je dlouhý 2,5 km (85).

Vozový park tvoří 32 jednovozových jednotek Bombardier INNOVIA ART MK II. Jednotky mohou být spřaženy až do čtyřvozového vlaku. Délka jednotky je 17 m a kapacita 97 cestujících se zavazadly. Napájení je realizováno třetí kolejnicí o napětí 750 V a maximální rychlost jednotek je  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (85).

Kompletní technologii včetně ZZ dodala společnost Bombardier. Všechny stanice na lince jsou vybaveny skleněnými bezpečnostními dveřmi (85).

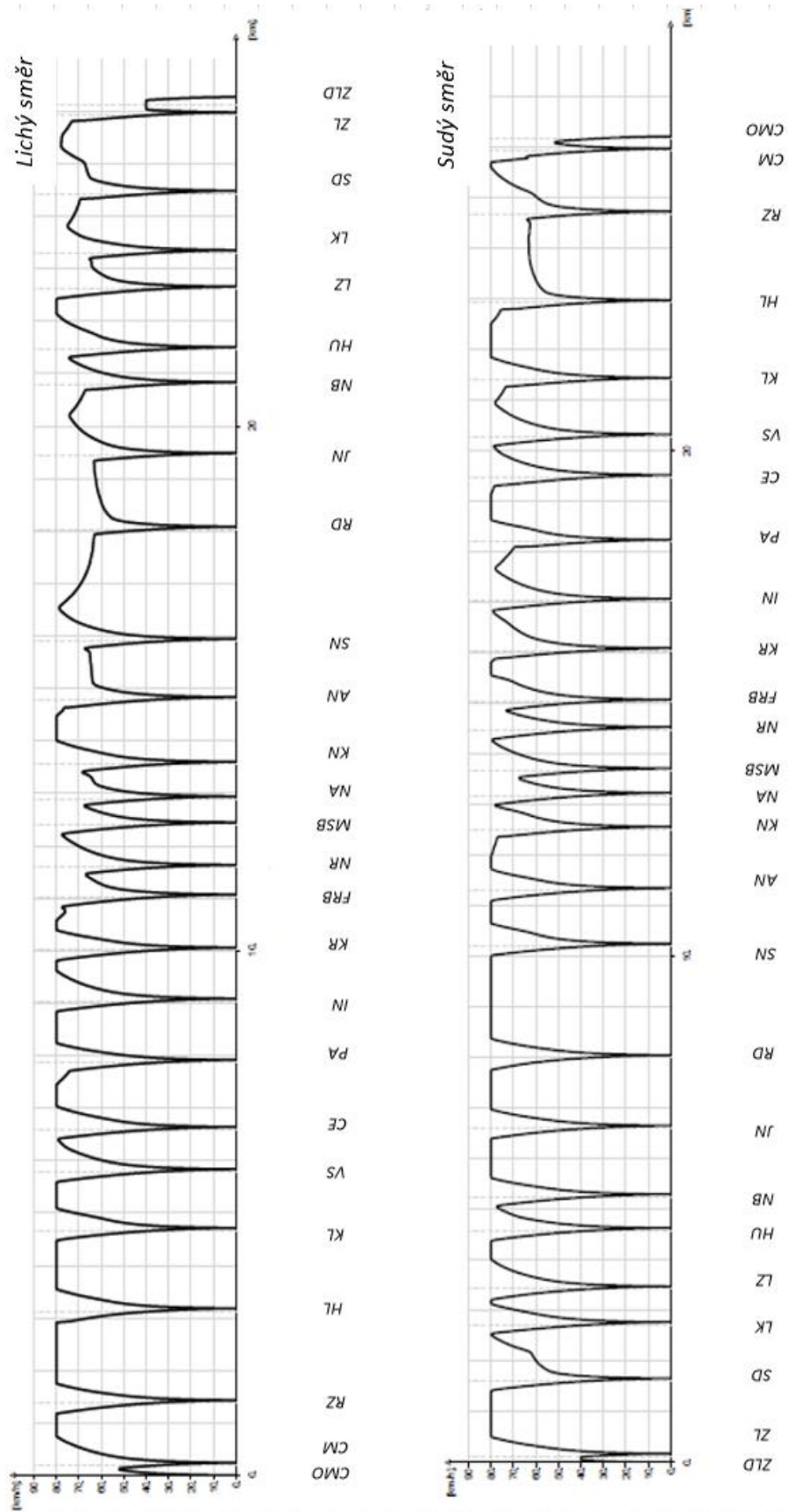
### ***Systém VAL v Rennes***

Metro ve francouzském Rennes má jednu linku. Jedná se o linku automatického metra systému VAL, tedy lehkého metra na pneumatikách. Linka byla otevřena v roce 2002 a je dlouhá 9,4 km. Linka obsluhuje 15 stanic. Vozový park tvoří 30 dvouvozových jednotek VAL 208 od společnosti Siemens o délce 26 m a kapacitě 170 cestujících. Zabezpečovací zařízení je typu CBTC Siemens Trainguard MT. V roce 2014 začala výstavba další linky, která bude dlouhá 12,6 km a bude obsluhovat 15 stanic. Bude se také jednat o systém VAL se ZZ typu CBTC (86).

### ***Systém VAL v Uijeongbu***

Linka do Uijeongbu navazuje na rozsáhlou síť metra v jihokorejském Soulu. Byla otevřena v roce 2011, má délku 11,1 km a obsluhuje 15 stanic. Jedná se o lehké metro systému VAL. Vozový park tvoří jednotky VAL 208 NG od společnosti Siemens. Jednotky mají kapacitu 236 cestujících a maximální rychlost  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Zabezpečovací zařízení je typu CBTC Siemens Trainguard MT (87).

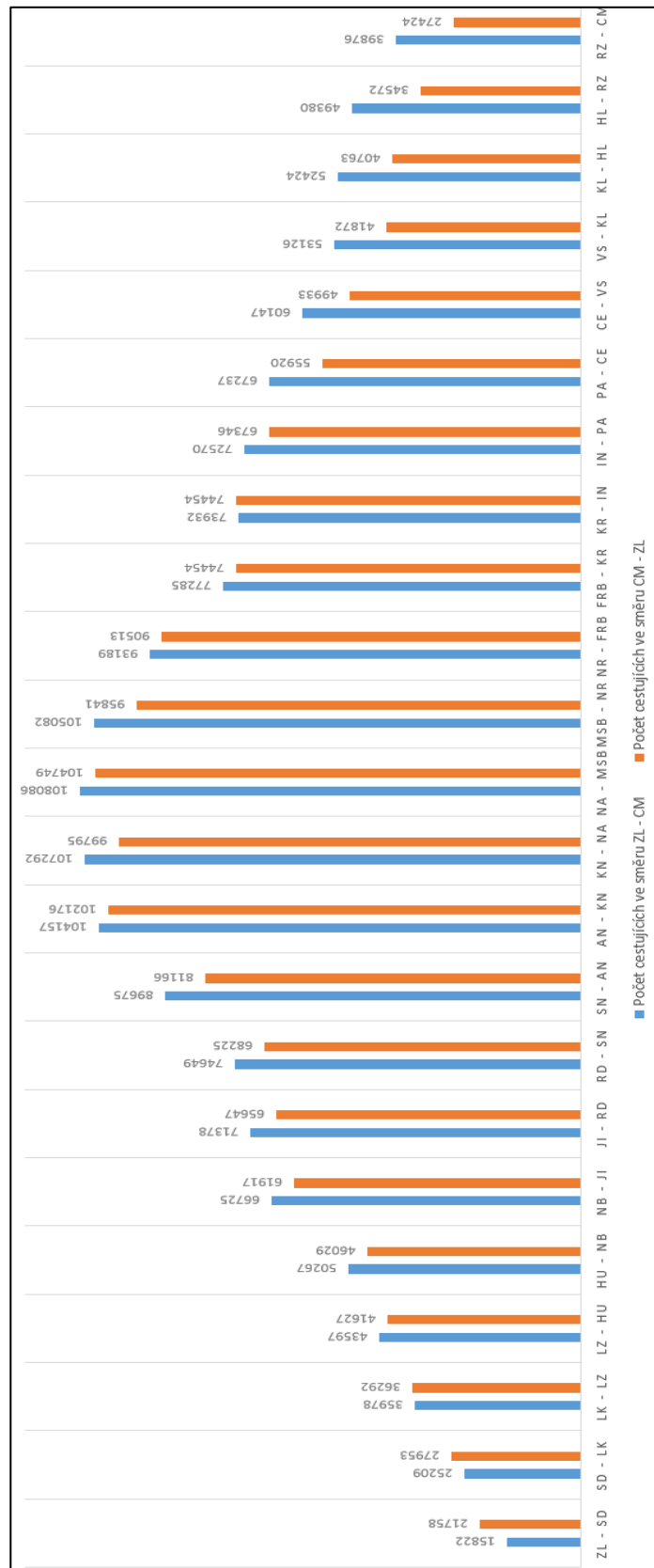
# PŘÍLOHA D – JÍZDNÍ PROFILY SOUPRAVY 81 – 71M



Obrázek D 1 Jízdní profily souprav 81 - 71M

Zdroj: autor v SW OpenTrack

# PŘÍLOHA H – GRAF ZATÍŽENÍ MEZISTANIČNÍCH ÚSEKŮ



Obrázek H 1 Graf zatížení mezistaničních úseků

Zdroj: (39), autor