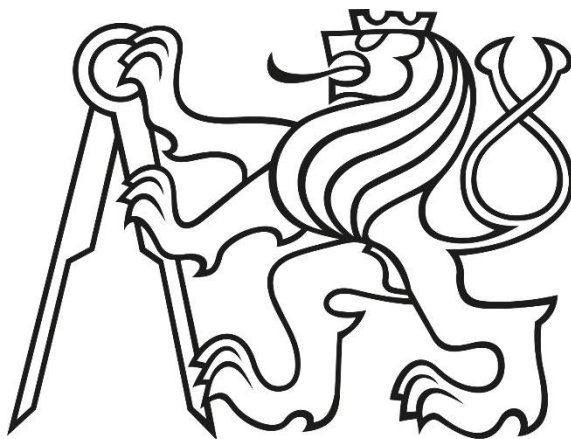


**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**

12 120 – ÚSTAV AUTOMOBILŮ,  
SPALOVACÍCH MOTORŮ  
A KOLEJOVÝCH VOZIDEL



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
2017**

**Nekonvenční kolejové systémy**  
Unconventional railway systems

TOMÁŠ  
PODZIMEK

## ZADÁNÍ



### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

#### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Podzimek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **437709**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojínského inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

#### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Nekonvenční kolejové dopravní systémy**

Název bakalářské práce anglicky:

**Unconventional railway systems**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši použití nekonvenčních systémů kolejové dopravy ve světě (systémy monorail, Maglev, Hyperloop apod.)
2. Proveďte rozdělení nekonvenčních přepravních systémů kolejové dopravy dle jejich základních technických parametrů.
3. Na základě provedené rešerše posuďte jejich použitelnost v podmínkách ČR.

Seznam doporučené literatury:

Kolář, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel  
Švejnoch a kol.: Teorie vozidel  
firemní literatura a prospekty

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Kalivoda Ph.D., Fakulta strojní**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce:

*Jan Kalivoda*  
Podpis vedoucí(ho) práce

*Tomáš Podzimek*  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

*Tomáš Podzimek*  
Podpis děkana(ky)

#### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, a výjimkou poskytnutých konzultací.

Seznam použité literatury, jiných pramenů a jiných konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

*Tomáš Podzimek*  
Datum převzetí zadání

*Tomáš Podzimek*  
Podpis studenta

## PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkovat panu Ing. Janu Kalivodovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky, důležité rady a ochotu při vytváření této bakalářské práce. Mé poděkování také patří všem vyučujícím na Fakultě strojní ČVUT v Praze, kteří mi předávali své zkušenosti a znalosti. Po celou dobu mého studia měli trpělivost s vypracováváním studentských prací, a především mi byli ochotni vysvětlit jakýkoliv problém týkající se výuky.

## ANOTAČNÍ ZÁZNAM

Jméno autora:	Tomáš
Příjmení autora:	Podzimek
Název práce:	Nekonvenční kolejové systémy
Rozsah práce:	Stran: 67 Obrázků: 79 Grafů: 6 Příloh: 0
Akademický rok:	2016/2017
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	12 120 – Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Vedoucí BP:	Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.
Zadavatel tématu:	Fakulta Strojní ČVUT v Praze
Klíčová slova:	Železniční doprava, kolejové systémy, nekonvenční kolejové systémy, vlaky, železnice, tratě
Key words:	Rail transport, railway systems, unconventional railway systems, trains, railway, tracks

## ABSTRAKT/ABSTRACT

Předmětem bakalářské práce *Nekonvenční kolejové systémy* je posoudit použitelnost nekonvenčních kolejových systémů v České Republice. Nejdříve je nutné provést rešerši těchto systémů, včetně jejich technických parametrů, aby se mohly rozdělit podle jejich použití. Je také nutné zjistit, jak si nekonvenční systémy stojí z ekonomického hlediska. K posouzení použitelnosti těchto systémů v ČR je nutné zvolit zástupce konvenčních systémů a porovnat je s nekonvenčními na základě provedené rešerše. Po vzájemném srovnání by mělo být jasné, jestli nekonvenční systémy mají své opodstatnění v ČR, což je cíl mé práce.

The subject of the bachelor thesis *Unconventional railway systems* is assessment of usability of these systems in the Czech Republic. First, it is essential to make sufficient research of these systems, including their technical data, so it is possible to divide them into the categories depending on their use. It is also important to find out their economics. To be able to assess usability of these systems in the Czech Republic it is necessary to choose representatives of conventional railway systems and compare them with unconventional railway systems using data from the research. The comparison should give the answer whether the unconventional systems could be used in the Czech Republic, which is the goal of this thesis.

## PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Nekonvenční kolejové systémy* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Kalivody, Ph.D. za pomoci použitých odborných zdrojů a citované literatury.

V Praze dne.....

.....

Tomáš Podzimek

## OBSAH

Zadání.....	2
Poděkování.....	3
Anotační záznam.....	3
Abstrakt/Abstract .....	4
Prohlášení o autorství .....	4
Obsah .....	5
1 Úvod.....	7
2 Vysokorychlostní nekonvenční systémy.....	8
2.1 Maglev.....	8
2.1.1 Vývoj a historie .....	8
2.1.2 Princip pohonu a technologie .....	10
2.1.3 Využití ve světě .....	13
2.1.4 Ekonomika.....	15
2.2 Hyperloop.....	16
2.2.1 Vývoj a historie .....	16
2.2.2 Princip pohonu a technologie .....	19
2.2.3 Využití ve světě .....	23
2.2.4 Ekonomika.....	25
2.3 Srovnání s konvenčními systémy a zhodnocení.....	26
2.3.1 Tabulka technických údajů .....	27
2.3.2 Přepavní rychlosti a časy .....	29
2.3.3 Zhodnocení .....	32
3 Městské nekonvenční systémy.....	35
3.1 Monorail.....	35
3.1.1 Vývoj a historie .....	35
3.1.2 Princip pohonu a technologie .....	39
3.1.3 Využití ve světě .....	43
3.1.4 Ekonomika.....	45

3.2	Kolejově vedený trolejbus .....	46
3.2.1	Vývoj a historie .....	47
3.2.2	Princip pohonu a technologie .....	48
3.2.3	Využití ve světě .....	51
3.2.4	Ekonomika.....	53
3.3	Srovnání s konvenčními systémy a zhodnocení.....	53
3.3.1	Tabulka technických údajů .....	55
3.3.2	Zhodnocení .....	56
4	Závěr .....	57
5	Seznamy.....	58
5.1	Seznam obrázků .....	58
5.2	Seznam grafů.....	60
5.3	Seznam použité literatury .....	61

# 1 ÚVOD

Pod pojmem kolejová přeprava si pravděpodobně většina lidí představí klasickou železnici, kde je trať tvořena dvěma kolejnicemi, které slouží k vedení i nesení vozidla. Vozová souprava je tvořena buď lokomotivou, která táhne vozy, nebo samostatnou motorovou jednotkou. Tratě tvořené dvěma kolejnicemi se objevily už na přelomu 18. – 19. století. Systémy dnes využívající tento typ tratí označujeme jako konvenční. Tyto systémy dnes tvoří prakticky veškerou kolejovou dopravu. Můžeme se s nimi setkat v dálkové veřejné dopravě i městské hromadné dopravě. Konvenční kolejové systémy každý den přepraví miliony lidí po celém světě a nacházejí své uplatnění i v nákladní dopravě. Lokomotivy a motorové jednotky v minulosti využívaly parní pohon, ze kterého přešly na pohon spalovacími motory a dnes jsou nejčastěji poháněny elektřinou. Transportní systémy, které nevyužívají valení ocelového dvojkolí po dvou ocelových kolejnicích, avšak vozidla jsou vedena i nesená drahou, nazýváme nekonvenční kolejové, či nekonvenční drážní systémy.



Obrázek 1: Typický nekonvenční systém – monorail, Malajsie [49]



Obrázek 2: Typický konvenční systém – lokomotiva Emil Zátopen, Slovensko [1]

Nekonvenční kolejové systémy vzhledem ke své poměrně malé rozšířenosti nejsou příliš známé. Od konvenční železnice se odlišují nejen jiným způsobem vedení a nesení vozidla, ale i principem pohonu. Zajímavé je, že nekonvenční kolejové systémy se začaly vyvíjet v těsné návaznosti na železnici konvenční. Rozvoj nových druhů železnice probíhal především v Anglii. Na počátku 19. století se prvně objevil systém monorail využívající pouze jedné kolejnice k nesení a vedení vozidla. Ve druhé polovině 19. stol. byla uvedena do provozu pneumatická dráha v Londýně a na počátku století 20. začaly první pokusy s pohonem vlaku magnetickou levitací.

V dnešní době se můžeme setkat s nekonvenční železnici po celém světě, zejména ale v Asii. Důležité je zmínit, že dnešní nekonvenční systémy jsou používány hlavně k přepravě osob. Současným nejrozšířenějším systémem je monorail, který je používán v dopravě městské. Dalším systémem, který se používá ve městské, ale i meziměstské přepravě je systém maglev, pracující na principu magnetické levitace. Nepříliš rozšířený, ale zajímavý je kolejově vedený trolejbus, který spojuje velikost a přepravní kapacitu tramvaje s využitelností

trolejbusu. Koncept nadzvukového systému Hyperloop, představený v roce 2013 je také velice zajímavý, především svými technickými parametry, které převyšují i dopravu leteckou. K revoluci v dálkové dopravě, jak říkají autoři projektu, by mělo dojít v horizontu 5 let, kdy by měl být Hyperloop uveden do provozu.

Práce si klade za cíl posoudit použitelnost nekonvenčních kolejových systémů v České Republice. Na začátku je nutné provést rešerši, která umožní získat informace pro podrobné představení dnes používaných nekonvenčních systémů, ale také dá podklady pro jejich rozdělení, podle základních technických parametrů. Jako základní technický parametr zvolím přepravní rychlost a rozdělím nekonvenční systémy na vysokorychlostní a městské. Abych mohl nekonvenční systémy porovnat, vyberu vhodné zástupce konvenčních systémů používaných ve světě a v ČR. V porovnání se bude vycházet z rešerše, porovnájí se přepravní rychlosti, kapacita a další parametry, ale také ekonomická stránka jednotlivých systémů. Porovnání by mělo přinést odpověď, jestli mají nekonvenční systémy opodstatnění v ČR.

## 2 VYSOKORYCHLOSTNÍ NEKONVENČNÍ SYSTÉMY

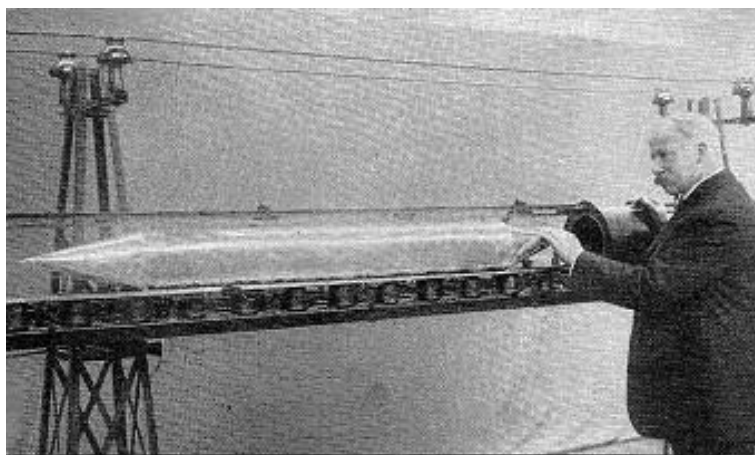
### 2.1 Maglev

Maglev je systém kolejové přepravy pracující na principu magnetické levitace tzn., že nedochází ke kontaktu mezi vlakem a zemí. Odtud také pochází označení maglev (magnetic levitation). Díky absenci kontaktu kolo-kolejnice je vnější hlučnost na velmi nízké úrovni a většina energie je spotřebována na překonání odporu prostředí, na rozdíl od konvenčních kolejových systémů, kde je určitá část energie spotřebována kontaktem kolo-kolejnice, a tím je i hlučnost vyšší. Jedná se o poměrně nákladný a značně inovativní způsob kolejové přepravy, a proto se s ním v běžném provozu můžeme setkat jen výjimečně. Vozy vlaku se běžně pohybují 8 až 12 mm nad dráhou. [2] Magnety umožňující levitaci a pohyb vpřed, jsou zabudovány jak v trati, tak i ve vlaku. O pohyb vlaku se stará lineární synchronní motor. Trati jsou nejčastěji nadzemní, na betonových pilířích a jsou nepoužitelné pro jakýkoliv konvenční vlak. Jako důkaz technické vyspělosti systému maglev můžeme brát překonání magické hranice 600 km/h na testovací trati v japonském Yamanashi v dubnu 2015.

#### 2.1.1 Vývoj a historie

První patenty v oblasti magneticky se vznášejících vlaků poháněných lineárním motorem se začaly objevovat již na počátku 20. století. Emile Bachelet, Francouz žijící v Americe, předvedl prototyp magneticky levitujícího vozu už roku 1912 v New Yorku. [3] Bacheletův a další prototypy, ale nikdy nebyly realizovány ve skutečné velikosti a v reálném světě. Proto je největší podíl na vzniku maglevu dáván profesoru Laithwaitovi, který přišel s lineárním motorem odpovídající velikosti.





**Obrázek 3: Emile Bachelet a jeho prototyp levitujícího vozu [3]**

Inženýr Eric Laithwait, působící na Královské univerzitě v Londýně, vyvinul model prvního lineární motoru skutečné velikosti ve 40. letech minulého století. Roku 1964 byl jmenován profesorem za svůj úspěšný vývoj v oblasti lineárních motorů a magnetické levitace. [4]

Vlastnost, že lineární motor nevyžaduje fyzický kontakt mezi vozidlem a tratí, se stala důvodem, proč byl tento motor spojován s pokročilými způsoby kolejové dopravy. Své využití tedy našel i v maglevu. První komerční použití tohoto systému přišlo v Anglii v roce 1984 poblíž Birminghamu, trať spojovala zdejší letiště s vlakovou stanicí. Délka trati byla 600 metrů, vlak na ní dosahoval nejvyšší rychlosti 42 km/h a vznášel se nad tratí ve výšce 15 mm. Provoz maglevu byl po 11 letech ukončen v důsledku zastarávání elektrického systému, který způsoboval častější problémy se spolehlivostí. [2]



**Obrázek 4: Maglev v Birminghamu roku 1984 [2]**

V Německu byl systém maglev pojmenován Transrapid. První nasazení Transrapidu do ostrého provozu s cestujícími proběhlo roku 1979 v Hamburku při Mezinárodní přepravní výstavě, kde dopravoval její návštěvníky. Transrapid během konání výstavy přepravil 55 000 lidí a zanechal pozitivní dojem. Po výstavě byla trať rozebrána. Další vývoj Transrapidu probíhal mezi roky 1984–2012 v Emslandu, kde byla postavena zkušební dráha o délce 31,5 km. Vlaky

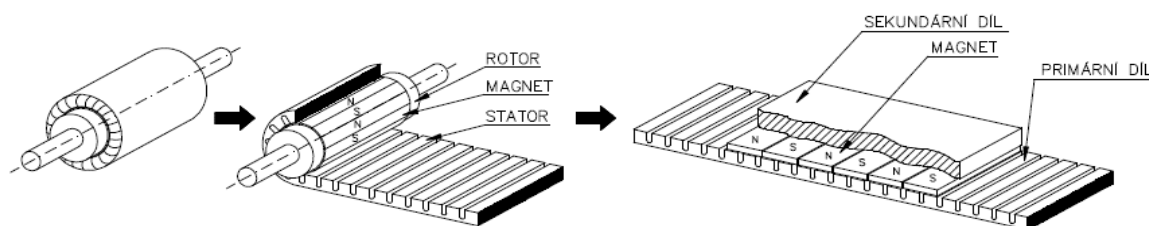
na této dráze dosahovaly běžně rychlosti 420 km/h. Roku 2006 došlo na tomto testovacím úseku k zatím nejzávažnější nehodě vlaku typu maglev, během které zahynulo 23 lidí. Nehoda nebyla způsobena technickou závadou, nýbrž lidskou chybou, došlo ke střetu vlaku s vozidlem údržby trati. Od toho roku Transrapid jezdil prázdný bez pasažérů. V roce 2011 skončila Transrapidu licence a nebyla obnovena, roku 2012 začala demolice trati. [2], [5], [6]

V dnešní době se s vlaky typu maglev používanými ve veřejné dopravě můžeme setkat především v Asii. V Japonsku se tento systém objevil poprvé v roce 1969, Japonsko využívalo jako základ německé technologie. Čína v roce 2004 otevřela v Šanghaji zatím nejrychlejší používaný maglev. Vlak dosahuje rychlosti 430 km/h, což je nejvyšší přepravní rychlost na běžné lince v historii. [7]

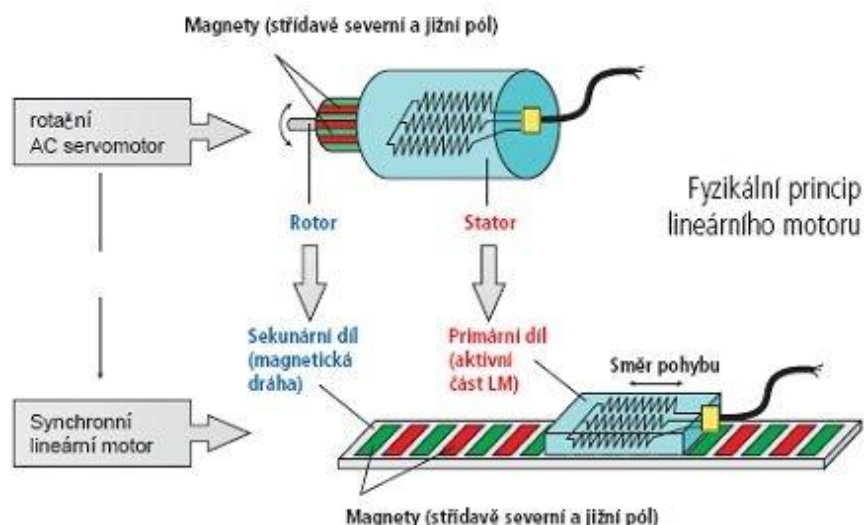
### 2.1.2 Princip pohonu a technologie

Maglev funguje na systému bezkontaktní magnetické levitace a obvykle se pohybuje po kolejích typu monorail, nebo dual rail nejčastěji umístěných v určité výšce nad zemí. Už na počátku 70. let přišel Laithwaite na způsob nového uspořádání magnetů nazývaný magnetic river, tento název označoval elektrodynamickou magnetickou levitaci. Toto nové uspořádání magnetů umožňovalo jedinému lineárnímu motoru dodávat vozidlu jak levitaci, tak i posuvný pohyb, a zároveň bylo efektivní. [8] Levitační magnety slouží ke zvedání vozidla z dolní polohy, nad vodící dráhu. Vodící magnety udržují vlak na vodící dráze a vyrovnávají odchyly mezi vlakem a kolejnicí, či stěnou, v závislosti na typu kolejnice. Oba dva typy magnetů jsou umístěny na spodní části vozidla po celé jeho délce. Pohon vlaku vpřed, zrychlování a brzdění zajišťuje synchronní lineární motor s dlouhým státorem. [9]

Lineární motor si lze představit jako točivý motor buď synchronní nebo asynchronní, u kterého se rozvine stator do plochy a rotor se nechá pohybovat vůči statoru viz. obr. 4. Lineární motor místo točivého elektromagnetického pole vytváří přímočaře se pohybující elektromagnetické pole.

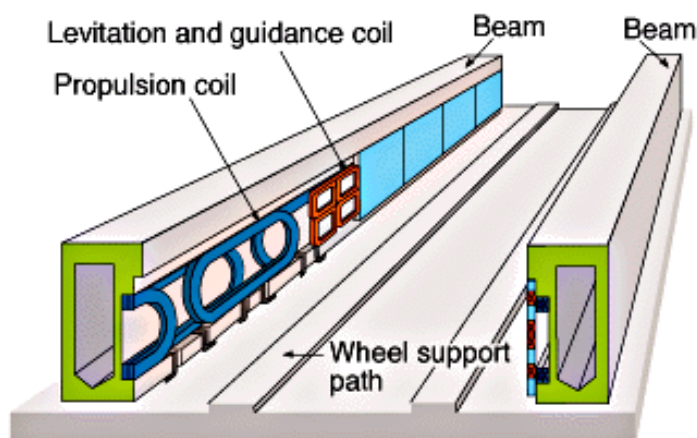


Obrázek 5: Rozdíl mezi točivým a lineárním motorem [10]



Obrázek 6: Fyzikální princip lineárního motoru [12]

Stator je u lineárních motoru označen jako primární díl a rotor jako sekundární díl. Primární díl je tvořen feromagnetickým svazkem z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí. U synchronních motorů je proti primárnímu dílu konstrukčně uspořádán sekundární díl tvořený permanentními magnety, které jsou umístěny na ocelovém podkladu. [10], [11], [12] Feromagnetické svazky s trojfázovým vnutím ve statoru jsou umístěny ve vodící dráze (trati). Levitační magnety umístěné na vozidle fungují stejně jako rotor elektromotoru, s tím rozdílem, že zde se jedná o přímočarý pohyb, nikoliv rotační. Průchodem střídavého proudu trojfázovým vinutím statoru vzniká přímočaře se posouvající elektromagnetické pole, které pohybuje celým vozidlem, které levituje. Rychlost vozidla se plynule koriguje změnou kmitočtu střídavého proudu. Umístění a výkon napájecích stanic je závislý na požadavcích na pohon, ale i na profilu trati, ve svažitéch místech je zapotřebí vyššího výkonu. [9] Což sice znamená vyšší odběr energie, ale taky možnost překonání většího stoupání, protože systém není závislý na adhezi. [21]



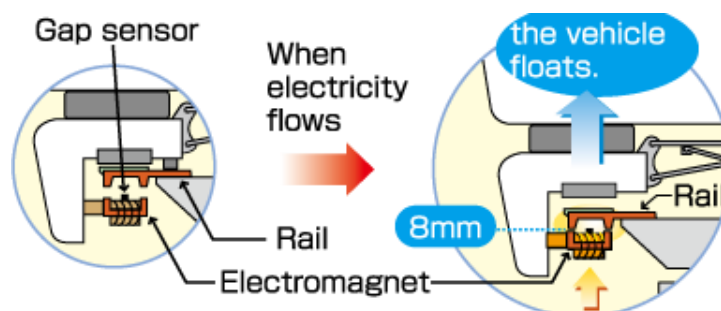
Obrázek 7: Kolej maglevu [13]



Obrázek 8: Rozložení výkonu napájecích stanic v závislosti na profilu trati [14]

Rozlišujeme dva základní druhy technologie maglev, elektromagnetické odpružení EMS a elektrodynamické odpružení EDS.

Systém elektromagnetického odpružení byl vyvinut v Německu pod názvem Transrapid. V EMS systému jsou elektromagnety vlaku umístěny na ramenech tvaru C a obepínají kolejnici z vodivého materiálu, nejčastěji ocelového. Vlak je nadzvedáván přitažlivými silami mezi magnety a kolejnicí. Magnetické pole je vytvářeno elektrifikovanými cívkami, které jsou umístěny v trati a dále buď na vnějším boku kolejnice, v případě, že se jedná o systém monorail viz obr. 10, nebo na stěnách vodící dráhy v případě systému využívající dual rail. Výhodou tohoto systému je, že může levitovat v jakékoliv rychlosti, takže i když stojí na místě, díky tomu vlak nemusí používat další dodatečné systémy odpružení na rozdíl od systému EDS. Nevýhodou toho řešení je, že ke svému provozu potřebuje neustálý zdroj napájení. V případě, když dojde k výpadku napájení je systém vybaven nouzovými bateriemi, které zajistí, aby vlak bezpečně zastavil a nedošlo k nárazu do kolejnice. [2], [13], [15]

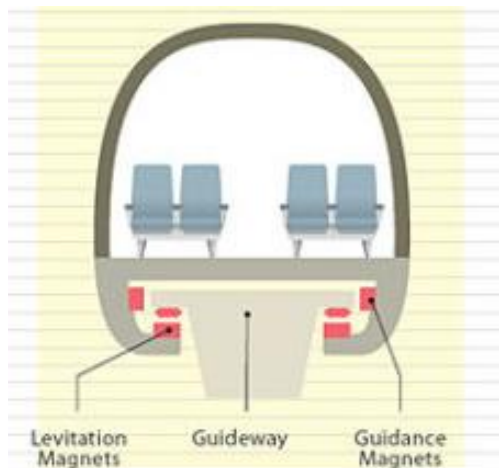


Obrázek 9: Princip systému EMS [21]

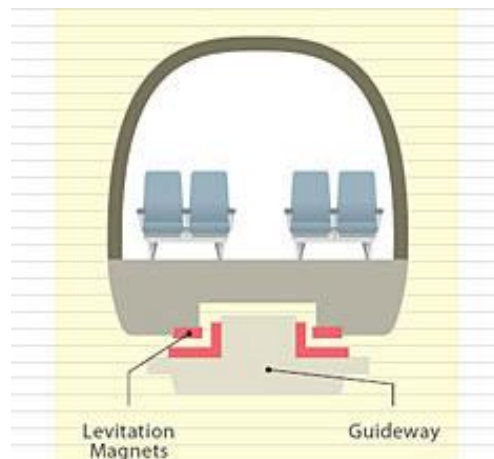
Elektrodynamicky odpružený vlak byl vyvinut v Japonsku. Tento systém používá magnety se stejnou polaritou, které vytvářejí odpudivé síly mezi magnety umístěnými na vozidle a v trati. Hlavním rozdílem oproti technologii EMS je použití chlazených supravodivých magnetů, což jsou elektromagnety vyrobené ze supravodivého materiálu. Výhodou těchto magnetů je, že nevykazují elektrický odpor, a proto mohou fungovat i když dojde k výpadku napájení. Zjednodušeně, supravodivé magnety se nabíjí (když vedou proud), následně se uzavře obvod a elektrický proud probíhá magnetem po neomezeně dlouhou dobu, než dojde k přerušení obvodu. [16] Chlazení elektromagnetů přináší výhodu v podobě nižších energetických nároků, protože jsou schopny vytvořit intenzivnější magnetické pole, než normální elektromagnet, avšak zajistit dostatečné chlazení je nákladné a obtížné. Další výhodou je, že systém EDS je při vyšších rychlostech stabilnější než EMS, protože přitažlivé síly mezi magnety jsou silnější. Nevýhodou systému je nutnost použití dodatečného podvozku, z důvodu nedostatečné velkého magnetického toku při nižších rychlostech, vlak začne levitovat při překročení 100



km/h hranice. V důsledku osazení vlaku koly musí být upravena i trať, a to tak, že dovolí vlaku vysokorychlostní, ale i pomalý provoz s podvozkem například v případě technické závady. [2], [9], [15], [16]



Obrázek 10: Rozmístění magnetů v systému EMS [15]



Obrázek 11: Rozmístění magnetů v systému EDS [15]

### 2.1.3 Využití ve světě

Maglev, jak z výše uvedeného vyplývá, je vyspělý, ale technologicky náročný systém, proto se můžeme ve světě setkat s řadou testovacích tratí, ale nevelkým množstvím komerčně využívaných vlaků.

Z testovacích tratí stojí za zmínku především zkušební centrum v japonském Yamanashi patřící JR Central (Central Japan Railway Company – Středojaponská železniční společnost). Centrum je součástí a zároveň prvním úsekem připravované trati spojující Tokio s Nagojou. Probíhá zde testování maglevu pracující se systémem EDS. Dosud postavený úsek má délku 43 km a dovoluje konstruktérům vyzkoušet chování vlaku při udržování maximální rychlosti přes 500 km/h. Jak již bylo uvedeno v úvodu v dubnu roku 2015 zde maglev s rychlostí 603 km/h překonal pozemní rychlostní rekord pro kolejová vozidla. Otevření trati ke komerčnímu užití je plánováno na rok 2027. [17] Trať bude mít celkovou délku v rozmezí 300–350 km a vlak by ji měl urazit v rozmezí 40–50 min, v závislosti na výsledně zvolené cestě. [18], [19]



Obrázek 12: Maglev na testovací trati v Yamanashi [20]

Maglev je v současné době používán komerčně jen v Číně, Japonsku a Jižní Koreji. Všechny komerčně používané vlaky pracují se systémy elektromagnetického odpružení. Maglevy používané v Číně, Japonsku a Jižní Koreji jsou koncepčně podobné a nejedná se o vysokorychlostní přepravní systémy (až na maglev s Šanghaji, viz dále), ale o alternativu k městské dopravě, která je tišší než konvenční systémy. Všechny 3 systémy využívají mostové tratě a pohybují se tedy nad zemí.

Čína uvedla svůj městský maglev do provozu v loňském roce v osmi milionovém městě Čchang-ča. Stále se jedná o zkušební provoz na 19 km dlouhé trati spojující nádraží v centru města s místním mezinárodním letištěm, vlak dosahuje maximální přepravní rychlosti 100 km/h. Provoz systému je plně autonomní, soupravy mají délku 48 metrů a nabízejí místo pro 363 cestujících. Zahájení plného provozu se očekává s velkým zájmem, protože doposud jediné spojení železnice s letištěm autobusy zkrátí ze současné hodiny na 20 minut. Během tříměsíčního zkušebního provozu bylo přepraveno 560 000 pasažérů. [27], [28]



Obrázek 13: Maglev v Čchang-ča, Čína [28]

Japonský maglev se nachází blízko Nagoji a byl postaven primárně pro účely EXPA 2005. Po skončení výstavy dostal jméno Linimo a zůstal v provozu dodnes. Na 9 km dlouhé trati spojuje 9 zastávek a dosahuje maximální rychlosti 100 km/h. Linimo byl první plně autonomní systém maglev, bez nutnosti obsluhy. [2], [21], [22]

Jihokorejský systém, opět autonomní, byl dokončen v roce 2016 a spojuje Mezinárodní letiště Inčchon (největší v JK) s vlakovou stanicí, odkud odjíždí vlaky do 50 km vzdáleného Soulu. Délka trati je 6,1 km a vlak na ní dosahuje rychlosti až 110 km/h. Souprava sestavená ze dvou vozů s celkovou délkou 24 metrů pojme 186 pasažérů. [2], [23], [24]



Obrázek 14: Depo pro vozy Linimo, Japonsko [21]

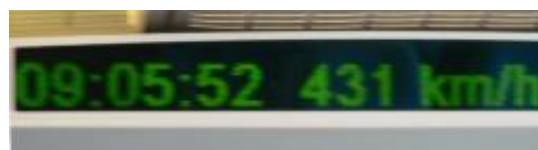


Obrázek 15: Maglev na letišti v Inčchonu, JK [25]

V Číně jako jediné se můžeme setkat také s vysokorychlostním využitím maglevu, a to konkrétně v Šanghaji. Mostová trať zde byla otevřena již v roce 2003 a spojuje šanghajskou stanici metra Longyang ve středu města, se zdejším mezinárodním letišťem Pchu-tung, její celková délka je 30,5 km a vlak tuto vzdálenost urazí za 7 minut a 20 sekund. Maglev využívá německou technologii Transrapid, kterou dodala firma Siemens, jedná se tedy o systém EMS. Vlak dosahuje běžné přepravní rychlosti 430 km/h a to z něj činí nejrychlejší vlak v komerčním užívání, vlak tuto rychlost udržuje podobu 90 sekund, než je nucen začít brzdit před konečnou stanicí. Takto krátké setrvání na maximální rychlosti je důvod, proč většina nákladů na provoz vlaku jde právě na energii. Kabina vlaku dlouhého 153 metrů pojme 574 sedadel. Nízká hluchost systému je v Šanghaji opět hodnocena kladně, obzvláště při krátkých jízdních intervalech. [2], [7], [26]



Obrázek 16: Maglev v Šanghaji [7]



Obrázek 17: Ukazatel rychlosti ve vlaku [7]

#### 2.1.4 Ekonomika

Vlaky maglev, jak je výše uvedeno, jsou v dnešní době provozovány v malém počtu, a to pouze v Asii, proto je poměrně těžké získat přesné informace o finanční stránce provozovaných systému. Zejména pak zjistit náklady na provoz těchto vlaků je velice obtížné.

V Japonsku budovaná supermoderní trať prodlužující testovací dráhu v Yamanashi má předpokládané celkové náklady na dokončení, ve výši 1,2 bilionu korun. Při délce 300–350 km

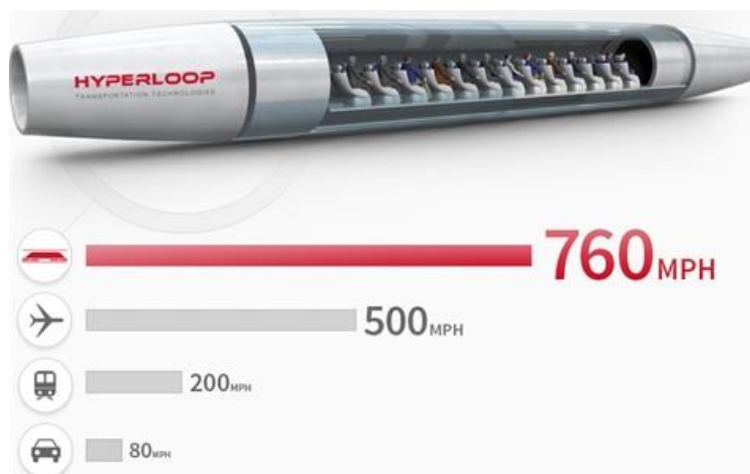


se dostáváme na cenu 3,4 miliardy korun na km trati, což je v porovnání s konvenční železní vyšší částka. [18], [19]

Doposud veřejně provozované systémy maglev se ve většině případů neprojevily rentabilně, například testovací trať v Německu byla v roce 2011 zavřena. Vysokorychlostní maglev v Šanghaji, podle některých zdrojů, je ztrátový a musí být každoročně dotován. Městský systém Linimo provozovaný v Japonsku zůstává dnes v provozu spíše jako turistická atrakce než usnadnění dopravy místním. Provoz vlaku je nákladný a jízdenka je výrazně dražší než u konvenční přepravy. Nedávno zprovozněné systémy v Číně a Jižní Koreji jsou provozovány pro cestující bezplatně. Dle oficiální zdrojů je Jihokorejský systém o 80 % úspornější než srovnatelné konvenční systémy. [2], [21], [22], [24], [27]

## 2.2 Hyperloop

Hyperloop je koncept vysokorychlostního transportního systému, který navrhl jihoafrický podnikatel a vynálezce Elon Musk. Jedná se o systém dálkové přepravy, který by měl být schopen dosahovat běžně rychlostí za hranicí 1220 km/h. Princip Hyperloopu je založený na pohybu přetlakových kapslí s pasažéry v podtlakových hermeticky (vzduchotěsně) uzavřených tubusech. Kapsle se pohybují na vzduchovém polštáři, který vzniká odsáváním vzduchu před kapslí kompresorem, vzduch se stlačuje a vypouští pod kapsli. Zrychlování a brzdění kapsle zajišťují lineární motory. [29]

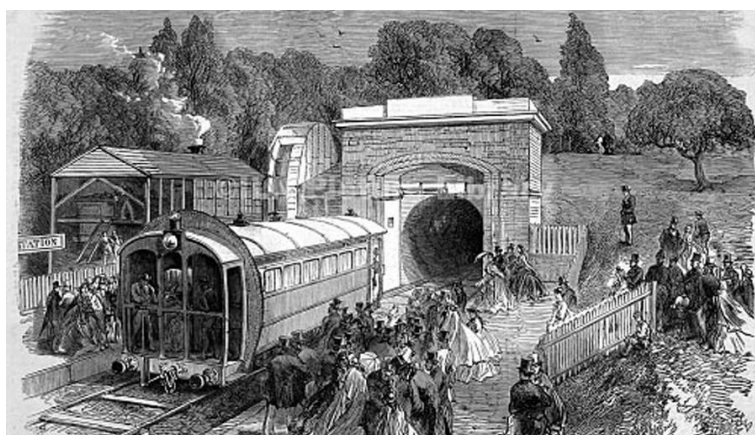


Obrázek 18: Kapsle Hyperloopu [35]

### 2.2.1 Vývoj a historie

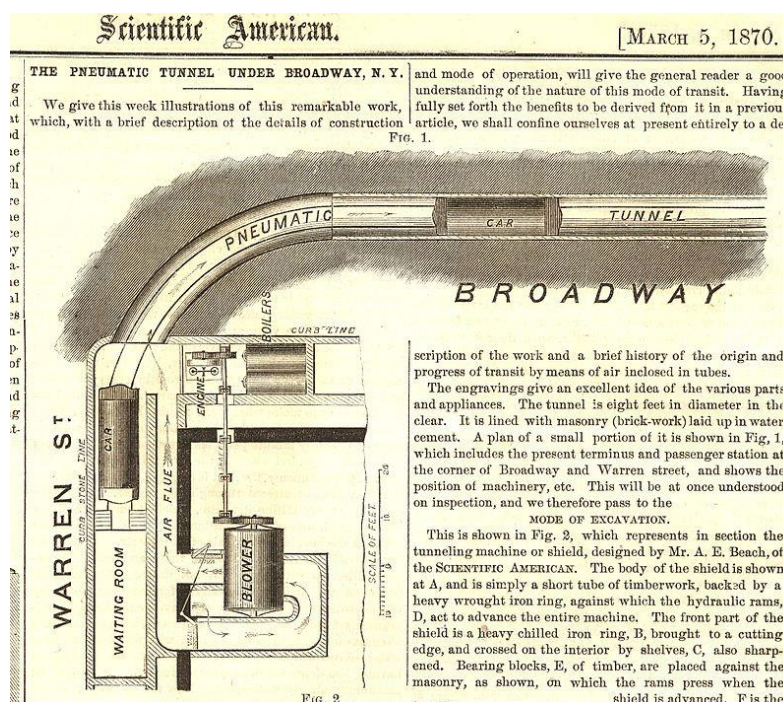
Nikoho pravděpodobně nepřekvapí, že nápad na vznik Hyperloopu vzešel z potrubní pošty (také označovaná pneumatická či vzduchová). Potrubní pošta byla inspirací pro vznik pneumatické dráhy v Londýně už v roce 1864, kde v městské části Crystal Palace byl uveden do provozu vlak tlačný vzduchem vháněným do potrubí. Vlak měl pouze jeden vagon, který byl opatřen jakýmsi límcem ze štětin, aby nedocházelo k unikání vháněného vzduchu. [30], [31]





Obrázek 19: Pneumatická dráha v Londýně [31]

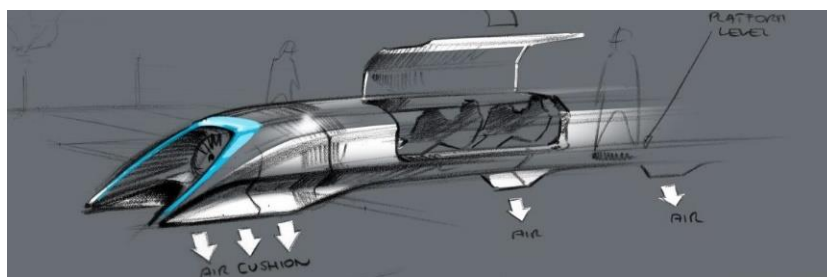
Po představení potrubní dráhy v Londýně následovala řada dalších podobných pokusů, například v Americe. Vynálezce a vydavatel časopisu Scientific American, Alfred Ely Beach navrhl pneumatický potrubní systém pohonu, který představil na výstavě v New Yorku roku 1867. Beach věřil, že by tento způsob přepravy mohl být pro New York přínosný. Po odmítnutí povolení výstavby se rozhodl postavit tunel tajně sám vlastní firmou, s přispěním investorů. Tunel byl postaven na Manhattanu za pouhých 58 dní a spojovala podpovrchově ulice Warren Street a Murray Street. Tunel byl 95 metrů dlouhý a jeho průměr činil 2,4 metru. Trať metra byla pro veřejnost otevřena v roce 1870 a byl o ní značný zájem veřejnosti, především z pohledu technické atrakce než výhodného přepravního prostředku. Provoz skončil roku 1873 v důsledku dalšího nezájmu investorů. Dodnes se nic z celého systému nedochovalo. [32], [33]



Obrázek 20: Článek z časopisu Scientific American zobrazující schéma systému pneumatické dráhy v New Yorku [32]

Další významnější nápady na využití podtlakové potrubní přepravy přišly až v 70. letech 20. století. Za jedním z nich stálo vypsání soutěže americkým ministerstvem dopravy na zrychlení pozemní dopravy mezi Los Angeles a New Yorkem. Žádný z návrhů nebyl realizován. Hlavní příčinou byl fakt, že se mělo jednat o přepravu na vzduchovém polštáři a v té době neexistoval odpovídající pohon. Použití spalovacího motoru nebylo vzhledem k uzavřenému tunelu možné a elektrický motor také nemohl být použit, protože by potřeboval baterie, a ty v té době nebyly na dostatečné úrovni. [34]

Vývoj lineárních motorů a baterií s dostatečnou kapacitou umožnil Elonu Muskovi vrátit se k původní myšlence vakuové tunelové dopravy. Ve spolupráci s inženýry ze své společnosti SpaceX sídlící v Kalifornii představil svůj plán v roce 2013 pod názvem Hyperloop Alpha. Jedná se o koncept dálkové nadzvukové potrubní přepravy. Dle Muskova návrhu by se měly vzduchotěsným tunelem pohybovat kapsle pro 28 pasažérů rychlostí 1220 km/h. Účelem tohoto konceptu bylo přilákání pozornosti vědců, inženýrů a investorů, kteří by se podíleli na realizaci celého projektu. Tento záměr vyšel, a dnes již existují dvě společnosti, Hyperloop One a HTT (Hyperloop Transportation Technologies), vyvíjející funkční prototypy. [30], [34]



Obrázek 21: Hyperloop Alpha [29]

První jmenovaná společnost byla založena pod jménem Hyperloop Technologies v roce 2014 v Los Angeles. Dnes se společnost jmenuje Hyperloop One a má více než 200 inženýrů, designérů a techniků, pracujících na prvních prototypech. V roce 2016 došlo k prvnímu testu lineárního motoru na testovací trati v Nevadě. Hyperloop One plánuje v roce 2020 začít s nákladní přepravou a od roku 2021 s přepravou cestujících. [34], [35]



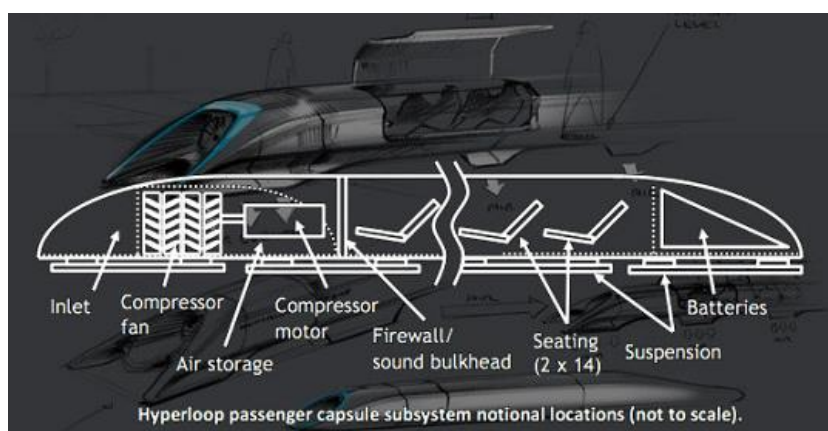
Obrázek 22: Testovací trať Hyperloop One, Nevada [36]

Druhá jmenovaná společnost Hyperloop Transportation Technologies, sídlící opět v Kalifornii, byla založena v roce 2013. Společnost zaměstnává přes 800 specialistů, od dělníku, přes IT specialisty po inženýry a architekty, zabývajících se realizací projektu. V roce 2018 má být představena první funkční kapsle skutečné velikosti, schopná pohybovat se maximální rychlostí 1220 km/h. Společnost uvádí, že již zahájila budoucí spolupráci s velkými světovými městy, jako např. Abú Dhabí, Jakarta, Toulouse, nebo Brno a Bratislava. [37]

### 2.2.2 Princip pohonu a technologie

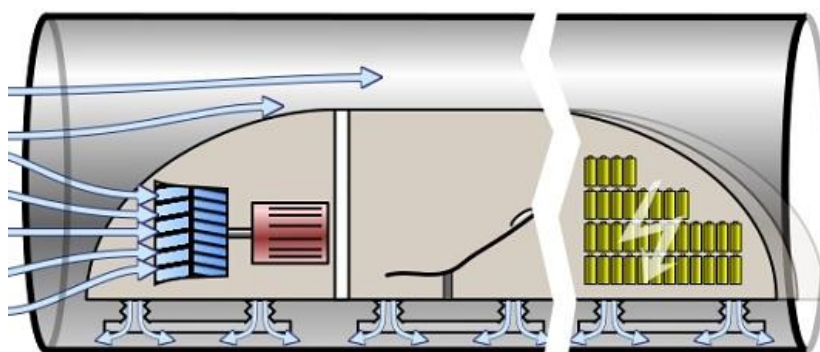
Trať Hyperlooppu neboli pevná část systému je tvořena tubusem o průměru 3,3 m. Trať by měla vést buď pod zemí nebo nad zemí na betonových pylonech v rozestupu přibližně 30 metů. Tlak uvnitř tubusu je snižen na 100 Pascalů. Pohon kapsle, akceleraci a deceleraci zajišťuje lineární motor [38], jedná se podobný motor jako v případě technologie maglev. Spodní část tubusu tvoří stator, spodní část kapsle tvoří rotor lineárního motoru v podobě hliníkové desky dlouhé 15 m, široké 45 cm a vysoké 50 mm. energii pro lineární motory zajišťují solární panely umístěné na horní části tubusu, tyto panely by měly během dne vytvořit dostatečné množství energie, které vystačí nejen na pohon ve dne a v noci, ale i na dodávky elektrické energie do místních sítí. [29]

Pohyblivá část – kapsle, která bude sloužit pro přepravu pasažérů, obsahuje nejen kabinu pro 28 cestujících, ale i další pro provoz nezbytné součásti viz obr. 23 schéma kapsle. Jak je na obrázku vidět, v přední části kapsle je kompresor, ten slouží dvěma účelům. Umožňuje kapsli odsáváním a stlačováním vzduchu před ní pohybovat se v relativně úzkých tunelech (mezera, mezi kapsli a stěnou je minimální), aniž by docházelo k „hrnutí“ vzduchu před sebou, jak to známe z metra. Druhým účelem je zásobovat vzduchová ložiska, která nesou váhu kapsle během pohybu, zjednodušeně vytváří vzduchový polštář o tloušťce 20 mm, který je pod ližinami umístěnými na spodní části kapsle a zabraňující rotaci kolem podélné osy. V zadní části jsou Li-on baterie, které napájejí elektromotor kompresoru o výkonu 325 kW a další zařízení v kabině, potřebné pro provoz či pohodlí cestujících. [29], [34]



Obrázek 23: Schéma kapsle [29]





Obrázek 24: Proudění vzduchu v tubusu (kapsle jede doleva) [38]

Urychlování a zpomalování probíhá ve třech fázích, přičemž v každé fázi je konstantní zrychlení  $0,5g$  [33], což odpovídá  $4,9 \text{ m/s}^2$ . Vyšší zrychlení s ohledem na cestující není žádoucí. V první fázi je kapsle urychlena z nulové rychlosti na rychlost  $480 \text{ km/h}$ , ve druhé fázi dojde k urychlení na  $890 \text{ km/h}$  a v poslední na rychlost  $1220 \text{ km/h}$ . Mezi každou fází vlak setrvává na ustálené rychlosti, které právě dosáhl, vždy přibližně 3 minuty (přesně  $183 \text{ s}$ ).

Dráhový tachogram jsem stanovil na základě výpočtů, ke kterým jsem použil data uvedená v dokumentu Hyperloop Alpha [29] a vztahů pro rovnoměrně zrychlený/zpomalený přímočarý pohyb.

$$t = \frac{v}{a} \quad s = v_0 t \pm \frac{1}{2} a t^2 \quad ^1$$

První fáze urychlování:

$$t_1 = \frac{v_1}{a} = \frac{480 \div 3,6}{4,9} \doteq 27,2 \text{ s}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} a t_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 4,9 \cdot 27,2^2 \doteq 1\,813 \text{ m} \doteq 1,8 \text{ km}$$

Konstantní rychlost:

$$s_{k1} = v_1 t_k = (480 \div 3,6) \cdot 183 = 24\,400 \text{ m} = 24,4 \text{ km}$$

Druhá fáze urychlování:

$$t_{a2} = \frac{v_{a2} - v_{a1}}{a} = \frac{(890 - 480) \div 3,6}{4,9} \doteq 23,2 \text{ s}$$

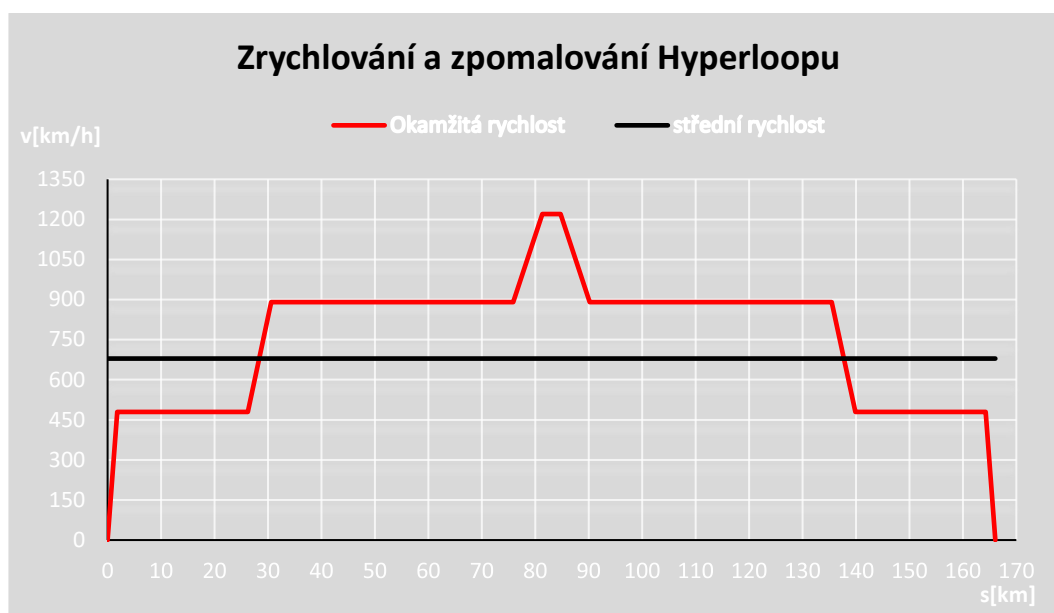
$$s_2 = v_1 t_2 + \frac{1}{2} a t_2^2 = (480 \div 3,6) \cdot 23,2 + \frac{1}{2} \cdot 4,9 \cdot 23,2^2 = 4\,412 \text{ m} \doteq 4,4 \text{ km}$$

Výpočet poslední fáze urychlování je analogický, stejně jako výpočet zpomalovacích fází.

Z dráhového tachogramu (graf 1) vidíme, že systém Hyperloop potřebuje na dosažení maximální rychlosti vzdálenost přibližně  $83 \text{ km}$ . Při uvažování setrvání na maximální rychlosti

<sup>1</sup> + pro rovnoměrně zrychlený, - pro rovnoměrně zpomalený přímočarý pohyb

po dobu 10 sekund a následném zpomalování vychází vzdálenost od rozjetí po zastavení necelých 170 km.



Graf 1: Dráhový tachogram Hyperloop s dosažením maximální rychlosti

Na základě výše uvedeného Hyperloop vypadá jako velmi dobrá alternativa ke konvenčním druhům rychlostní dálkové dopravy, ale je nutné uvést také negativa celého systému, která značně komplikují jeho využití.

Prvním problémem je, jak bylo výše uvedeno, vzdálenost minimálně 170 km, aby byl systém plně využit, je to způsobeno urychlováním a zpomalováním ve 3 fázích. S tím souvisí nemožnost Hyperloopu měnit rychlost průběžně během jízdy, jako tomu je u konvenčních systémů, ke změnám rychlosti dochází jen při rozjezdu a dojezdu kapsle.

Druhým problémem je velikost odstředivé síly při vysokých rychlostech, jakých systém dosahuje. Aby odstředivá síla působící na cestující při průjezdu obloukem nebyla na úrovni horské dráhy, což by pochopitelně snižovalo přepravní komfort, stanovili projektanti hodnotu maximálního odstředivého zrychlení stejnou, jako hodnotu maximálního zrychlení v příčném směru a tedy  $0,5g$  ( $4,9 \text{ m/s}^2$ ). Tato hodnota odstředivého zrychlení má za následek poměrně velké poloměry oblouků, jak ukazují mé výpočty. Protože velikost normálového zrychlení  $a_n$  (dostředivého  $a_d$ ) přímo odpovídá zrychlení odstředivému  $a_o$  vycházel jsem ze vztahu,

$$a_n = a_d = \frac{v^2}{R} = a_o$$

kde  $v$  je rychlost a  $R$  poloměr oblouku, který vyjádřím

$$R = \frac{v^2}{a_o}$$

po dosažení vychází

$$R = \frac{(1220 \div 3,6)^2}{4,9} = 23\,438 \text{ m} \doteq 23,5 \text{ km}$$

Hodnota poloměru zatáčky 23,5 km je poměrně vysoká a platí i pro vertikální směr pohybu, tedy nejen pro oblouky, ale i pro stoupání. Pokud budeme uvažovat provoz vlaku v krajině s minimálními převýšeními a malou zástavbou, realizovatelnost nebude velkým problémem, protože se trať navrhne tak, aby většina oblouků byla při výjezdu a příjezdu do stanice, kdy je rychlost nižší a pohyb při maximální rychlosti byl co nejvíce přímočarý. Pro představu uvádím poloměr oblouku při urychlení do první a druhé fáze, tj. na rychlost  $v_1 = 480 \text{ km/h}$  je  $R_1 = 3,65 \text{ km}$  a při  $v_2 = 890 \text{ km/h}$  je  $R_2 = 12,5 \text{ km}$ . Pokud uvážíme použití v ČR, například na trati Praha – Brno (cca 200 km tzn. možnost dosáhnout max. cestovní rychlosti) musíme překonat Českomoravskou vrchovinu, což by znamenalo buď nutnost použít velké množství tunelů, nebo vést trať nadzemně na pilířích, ale pak by pilíře musely být poměrně vysoké. Obě dvě řešení jsou nákladná, proto připadá v úvahu řešení třetí, snížení maximální cestovní rychlosti, čímž ale ztrácíme hlavní výhodu tohoto systému.

Třetím problémem, který hrozí je tepelná roztažnost. Rozdíl mezi nejnižšími a nejvyššími teplotami ve střední Evropě se uvádí 50 °C. V našich podmínkách se tedy zdá nereálné realizovat tubus, který bude schopen snést teplotní dilataci a zároveň bude po celou dobu hermeticky těsný. [38] S vlivem podnebí souvisí i problém s napájením celého systému, který je navrhován solárními panely umístěnými na tubusu [29], protože navzdory globálnímu oteplování se v Evropě stále můžeme v zimě setkat s trvalou sněhovou pokrývkou. Odstraňování sněhu ze solárních panelů, které jsou ve výšce několika metrů a délce stovek kilometrů se opět jeví jako nereálné.

Posledním velkým a dle mého názoru nejpodstatnějším problémem je spolehlivost celého systému. Hermetičnost tubusu může být porušena zemětřesením, např. v Kalifornii, kde je plánována vůbec první výstavba tohoto systému, ale i technickou závadou. Tlak uvnitř je 100 Pa = 1 hPa, což v porovnání s normálním atmosférickým tlakem kolem 1000 hPa představuje pouhých 10 % atmosférického tlaku, takže stav uvnitř tubusu se blíží vakuu. Jenom malé porušení tubusu by znamenalo tragédii. Stejně tak může dojít k porušení kabiny pro cestující, kde je udržován normální tlak 1000 hPa, protože u takto komplikovaného systému je 100% spolehlivost téměř vyloučena. U běžné konvenční jednotky, jako je například TGV, se využívá princip redundance. To znamená, že jednotka je opatřena dvěma hnacími vozy, takže dojde-li k poruše jedné lokomotivy, je tu druhá, která umožní jízdu dokončit. Ale u systému Hyperloop se tento princip nevyužívá, takže pokud by došlo k zadření vrtule kompresoru, vzduchový polštář by ihned zmizel a kapsle by se začala při rychlosti 1220 km/h dřít o stěny tubusu. [38] Nebo může dojít k výpadku napájení lineárních motorů v tubusu a kapsle se zastaví a bude nutná následná evakuace cestujících, která bude vzhledem k hermetičnosti tubusu opět velmi problematická a pokud se porucha protáhne, za jak dlouho dojde cestujícím kyslík, uvnitř kabiny také nikdo neví. [38]

### 2.2.3 Využití ve světě

Hyperloop je v současné době konceptem, který by měl být realizován v blízké budoucnosti, proto zde uvádím pouze plánované projekty, které uvažují použití Hyperlooppu.



Obrázek 25: Vizualizace systému Hyperloop v San Franciscu [35]

První realizací Hyperlooppu má být spojení Los Angeles se San Franciscem v Kalifornii, ostatně na tomto spojení byl projekt Hyperloop poprvé představen, konkrétně v již několikrát zmiňovaném dokumentu Hyperloop Alpha [29]. Celková délka trati je plánována na 570 km a předpokládaný dojezdový čas činí 35 minut. Kapsle s kapacitou 28 pasažérů mají opouštět stanice každé 2 minuty. Trať by měla být vedena převážně nadzemně na pylonech vysokých od 6 do 30 metrů, případně tunely v místech, kde je nezbytné překonat větší převýšení a pylony by musely dosahovat nereálných výšek. [29]

Společnost Hyperloop Transportation Technologies (HTT) na svých webových stránkách uvádí několik budoucích realizací toho systému. Realizovatelnost alespoň některých z těchto projektů v blízké budoucnosti dokazují dohody se zástupci a představiteli známých světových měst, která by od tento druh vysokorychlostní přepravy měla zájem. Zde zmíním dle mého názoru nejzajímavější projekty.

Abú Dhabí na konci 2016 uzavřelo dohodu se zástupci HTT, aby vypracovali studii na vysokorychlostní spojení dvou největších měst emirátů, Abú Dhabí s Al Ajn. Od projektu si slibují nejen ekonomický přínos pro oblast, ale i ulehčení silniční dopravě mezi těmito 170 km vzdálenými městy. Studie má zjistit celkovou realizovatelnost, případnou analýzu trati a finanční výhodnost celého projektu. Na základě zveřejněných výsledků, což by mělo být v průběhu roku 2017, bude rozhodnuto o výstavbě. Zajímavé je, že zástupci HTT ještě před zahájením studie slíbili dvakrát rychlejší výstavbu trati, než tomu je v případě konvenční

železnice, pokud projekt dostane zelenou. Toto dokazuje, jak moc tomuto systému autoři věří.  
[39]



**Obrázek 26: Vizualizace trati v SAE [40]**

HTT na začátku roku 2016 podepsala dohodu se zástupci slovenské vlády o možnostech vybudování systému Hyperloop z Bratislavy do okolních měst jako jsou Vídeň, Budapešť a Brno. Jedná se o vůbec první plány na výstavbu toho systému v Evropě a pro samotnou společnost, jsou dle jejich prohlášení velice důležité, z hlediska získání širšího zájmu o tento druh vysokorychlostní přepravy v Evropě. Dle dosavadních informací by mělo dojít k významnému urychlení přepravy mezi výše zmíněnými městy. Konkrétně mezi Bratislavou a Vídní na 8 minut a mezi Bratislavou a Budapeští na 10 minut. [41]

V lednu 2017 se objevily zprávy v českých médiích o možné výstavbě systému Hyperloop na území ČR. Přesněji o propojení Brna s Bratislavou. HTT podepsala s Brnem dohodu o okamžitém zjištění realizovatelnosti projektu, tato dohoda navazuje na již podepsanou podobnou dohodu s Bratislavou, jak je uvedeno výše. Pokud by došlo k realizaci, jednalo by se o první mezinárodní trať systému Hyperloop. Brněnský starosta Petr Vokřál uved, že jeho představou je spojení až do Prahy. [42]

Ke všem zmíněným potenciálním realizacím systému Hyperloop je dle mého názoru nutné dodat, že žádný z těchto projektů zatím nedostal zelenou ani se nenachází ve fázi výstavby a ani nebyla dokončena žádná z uvedených studií zabývajících se proveditelností. Nejbližší uvedení systému Hyperloop do provozu je společnost Hyperloop One. Ta dokončila 500 metrů dlouhou testovací trať v Nevadě, ale doposavad nezkonstruovala kapsli odpovídající velikosti schopnou dosáhnout maximální rychlost [43], ale to asi zatím ani není možné s ohledem na délku trati.





Obrázek 27: Testovací trať Hyperloop One v Nevadě [36]

#### 2.2.4 Ekonomika

Protože žádný ze systému nebyl zatím uveden do provozu a ani nedošlo k realizaci jakékoliv části systému, jako je funkční kapsle, nebo trať umožňující dosažení maximální rychlosti. Je velice obtížné hodnotit ekonomickou stránku systému Hyperloop. Všechny dostupné informace týkající se finanční stránky jsou stejně jako technické informace, pouhou teorií, která může být v realitě naprosto odlišná. Zde uvedu především kalkulace obsažené v dokumentu Hyperloop Alpha [29] publikovaném v roce 2013, který jako jediný dostupný materiál obsahuje konkrétní částky. Všechny zde uvedené částky jsou tedy platné k roku 2013, ale přepočítány podle kurzu k datu 25. 6. 2017, kdy střední hodnota 1 USD odpovídala 23,548 Kč.

Kapsle s kapacitou 28 míst, prostorem pro zavazadla a možností přepravy jednoho osobního automobilu má stát 35 910 700,-. Z čehož vychází cena na sedadlo 1 282 525,-, pro porovnání cena na sedadlo v případě konvenčního systému Siemens Railjet je přibližně 780 000,-. [29], [44]

Trať se dvěma tubusy spojující Los Angeles se San Franciscem o délce 570 kilometrů má předpokládané celkové náklady ve výši přibližně 165 miliard korun, což je 290 milionů korun na kilometr. Tato částka obsahuje všechny náklady k trati schopné provozu, tj. výstavbu tunelů, pylonů, zástavbu lineárních motorů, ale i solární panely napájející systém [29]. Odhaduji, že cena na 1 km trati Hyperloopu v ČR by byla podobná ceně v Kalifornii, kde je větší kopcovitost, ale řidší zástavba na rozdíl od ČR.

Uvážím-li, jakými technickými parametry se autoři projektu prezentují, je dle mého názoru téměř jisté, že údaje o ceně uvedené v dokumentu Hyperloop Alpha [29], se budou při realizaci lišit. Pokud bych se ale mýlil a náklady by byly opravdu na úrovni, jakou uvádějí autoři a byla

by zachována energetická soběstačnost systému. Znamenal by Hyperloop revoluci nejen ve vysokorychlostní kolejové přepravě, ale ve všech odvětvích přepravy.

## 2.3 Srovnání s konvenčními systémy a zhodnocení

Nekonvenční kolejové systémy byly jsou a budou zajímavou alternativou k běžně používaným kolejovým systémům, přinášející nesporné výhody, ale také řadu překážek stojící jim v cestě. V minulosti nikdy nedošlo k velkému rozšíření jakéhokoliv z těchto systémů, především protože náklady na realizaci byly příliš vysoké, anebo z ještě prostšího důvodu, konvenční systémy byly zkrátka i lepší.

Za posledních 20 let prošly nekonvenční systémy dálkové dopravy značným pokrokem a objevují se další nové projekty, jako např. Hyperloop, které slibují až neuvěřitelné zrychlení spojení, převyšující dokonce i leteckou dopravu. Abych zjistil, jestli se dnes nebo v blízké budoucnosti může vývoj obrátit a budeme se stále více setkávat s novými druhy kolejové přepravy, je nezbytné udělat srovnání. Cílem srovnání je porovnat nejvyspělejšího zástupce konvenční vysokorychlostní železnice a konvenční systém používaný v České Republice dosahující nejvyšší možné rychlosti, s tím, co nabízí zástupci nekonvenčních systémů a ověřit smysl jejich realizovatelnosti v podmínkách České Republiky. Do srovnání jsem zvolil čtyři systémy, dva nekonvenční a dva konvenční.

Hned v úvodu je důležité je zmínit, že ať už se jedná o konvenční, či nekonvenční systémy, jednu věc mají společnou, a to, že jsou všechny poháněny elektřinou. V dnešní době se už skoro nesetkáme s pohonem spalovacím motorem, alespoň co se dálkové přepravy týká. Prvním zástupcem nekonvenčních vlaků je šanghajský maglev, dnes jediný běžně používaný systém toho druhu ve vysokorychlostní přepravě. Druhým netradičním systémem je Hyperloop, který je sice ve fázi výstavby, ale dle autorů, by neměl být zprovozněn déle než za 5 let. Množství technických informací, které o systému vím, mi dává možnost zařadit ho do srovnání.

Nejvyspělejším zástupcem klasické železnice jsem zvolil francouzské TGV, jedná se o systém, který je a byl vyvíjen francouzským koncernem Alstom od 70. let minulého století. Dodnes bylo vyrobeno několik set souprav těchto vlaků a můžeme se s nimi setkat prakticky v celé západní Evropě. Za skoro 40 let produkce prošlo TGV průběžným vývojem, dnes je nejmodernější jednotkou TGV Duplex. Jednotka může být složena až ze 4 lokomotiv a 16 dvoupodlažních vozů. O vyspělosti systému vypovídá přepravní rychlost 320 km/h, nebo přepravní kapacita více jak 1200 pasažérů. Překonání světové rychlostního rekordu pro kolejová vozidla (574,8 km/h) jen potvrzuje, že dnes nenajdeme konvenční systém s lepšími parametry.



Obrázek 28: TGV Duplex [45]

Systémem reprezentujícím vysokorychlostní kolejovou přepravu v České Republice jsem zvolil Siemens Railjet používaný Českými Dráhami. Railjet jsem vybral a jako nejlepší v ČR, protože vyniká poměrem mezi provozními náklady, kapacitou a rychlostí. České Dráhy vlastní celkem sedm jednotek. Maximální přepravní rychlost činí 230 km/h, ale současný stav českých tratí neumožňuje provoz touto rychlostí, proto max. přepravní rychlost v podmínkách ČR je pouze 160 km/h, z tohoto důvodu je v tabulce technických údajů použita právě tato rychlost. [46]



Obrázek 29: Siemens Railjet ČD [47]

### 2.3.1 Tabulka technických údajů

Technické údaje obsažené v tabulce jsem zvolil ve spolupráci s vedoucím práce jako základní. Do srovnání jsem přidal měrné údaje, které jsou odlišeny modrou barvou, jako měrný výkon, a to buď vztažený na hmotnost jednotky, případně vozidla, [kW/tun], nebo ke kapacitě [kW/sedadlo]. Další měrnou veličinou je hmotnost na sedadlo [tun/sedadlo]. Zavedení měrných veličin umožňuje objektivnější srovnání všech zvolených kolejových systémů. Protože když se například podíváme na hmotnost jednotlivých systémů vidíme, že rozdíl mezi nejlehčím a nejtěžším zástupcem je více než padesátinásobný, ale při pohledu na hodnoty měrné hmotnosti vidíme, že je rozdíl minimální. Údaje obsažené v tabulce jsou dohledatelné ve zdrojích, které byly použity při vytváření rešerše.

TECHNICKÉ ÚDAJE	Maglev	Hyperloop	TGV Duplex	Railjet
Princip pohonu	elektromagnetická levitace	elektromag.levitace + vzduch. kompresor	kontakt kolo-kolejnice	kontakt kolo-kolejnice
Motor	lineární elektrický	lineár. el.+ kompresor	8 asynchronních motorů	4-pólové asynchronní motory s kotvou na krátko
Výkon [kW]	25 000	865 <sup>2</sup>	18 800	6 400
Napájecí soustava [kV]	20 AC <sup>3</sup> ; 1,5 DC <sup>4</sup>	neznámé	25 AC; 15 AC; 3 DC; 1 DC	25 AC; 15 AC; 3 DC
Nejvyšší rychlost [km/h]	600	1220	574,8	357
Cestovní rychlost [km/h]	430	1220	320	160
Maximální zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]	1,5	4,9	1,5	1,5
Provozní zrychlení/zpomalení [m/s <sup>2</sup> ]	0,8/0,66	4,9/4,9	0,35/0,2	0,45/0,2
Počet vozů jednotky	5	1	16 vozů, 4 lokomotivy	7 vozů, 1 lokomotiva
Délka [m]	128,3	25 <sup>5</sup>	400	205
Počet sedadel	446	28	1268	442
Hmotnost [tun]	247	17,1	884	437
Min. poloměr oblouku [m]	350	3 650	125	150
Měrný výkon [kW/tun]	101,2	50,9	21,3	14,6
Měrný výkon [kW/sedadlo]	56,1	30,9	14,8	14,5
Měrná hmotnost [tun/sedadlo]	0,6	0,6	0,7	1,0
Vnější hlučnost [dB]	73	0 <sup>6</sup>	85	82

<sup>2</sup> Výkon kompresoru

<sup>3</sup> AC – střídavé napětí

<sup>4</sup> DC – stejnosměrné napětí

<sup>5</sup> Odhadovaná

<sup>6</sup> Pohyb v uzavřeném tunelu

### 2.3.2 Přepravní rychlosti a časy

Rychlosti, kterých dosahují jednotlivé systémy se značně liší, to že některý systém dosahuje několikanásobně vyšší rychlosti než jiný, neznamená, že je jednoznačně lepší. Abych mohl jednotlivé systémy dálkové rychlostní přepravy porovnat a zhodnotit jejich využitelnost v rámci ČR zvolil jsem modelovou vzdálenost 100 km. Tuto vzdálenost jsem zvolil jako maximální možnou pro dálkovou dopravu v rámci ČR, protože odpovídá například vzdálenosti Praha – Liberec, Hradce Králové, Pardubice, Ústí nad Labem, Plzeň, nebo Hradec Králové – Liberec, České Budějovice – Plzeň, Ostrava – Olomouc.

Využitelnost systémů jsem porovnával pomocí zjednodušených dráhových tachogramů. Které se skládají z rozjezdu s konstantním zrychlením, jízdy maximální rychlostí a konstantního zpomalování. Důležité je zmínit, že všechny dráhové tachogramy, viz obrázky 28-31, jsou idealizované, v reálných podmínkách nemůže nastat situace, že by bylo zrychlení na cestovní rychlost po celou dobu konstantní. Protože se zvyšující se rychlostí jízdy vzrůstají vozidlové odpory a z toho důvodu zrychlení vozidla postupně klesá. Základním technickým parametrem, ze kterého jsem při výpočtu dráhových tachogramů vycházel byla maximální cestovní rychlost. Tu jsem také jako jedinou znal u všech systémů. Maximální zrychlení systémů, které je uvedeno v tabulce, jsem nemohl použít, neboť systémy maglev, TGV a Railjet v reálném prostředí zrychlují pomaleji. Proto jsem zavedl zrychlení provozní (také uvedeno v tabulce), které jsem dopočítal ze známých dojezdových časů konkrétních systémů, a na základě konzultace s vedoucím práce upravit tak, aby co nejvíce odpovídaly reálnému provozu. Zrychlení jsem vždy volil záměrně větší než zpomalení (v tabulce jako provozní zpomalení), protože i když jsou moderní systémy schopny brzdit intenzivněji, než zrychlovat v běžném provozu tomu tak není.

Zde je uveden pouze výpočet zrychlení a zpomalení, protože výpočet dráhového tachogramu je analogický k výpočtu dráhového tachogramu systému Hyperloop v části Princip pohonu a technologie. Ke stanovení zrychlení a zpomalení jsem znal délku trati v Šanghaji 30,5 km, čas využití maximální rychlosti 90 sekund a celkový dojezdový čas přibližně 7 min. [7]

$$s_k = vt_k = (430 \div 3,6) \cdot 90 = 10\,750 \text{ m}$$

$$s_a + s_z = s_c - s_k = 30\,500 - 10\,750 = 19\,750 \text{ m}$$

$$t_{a,z} = t_c - t_k = 420 - 90 = 330 \text{ s}$$

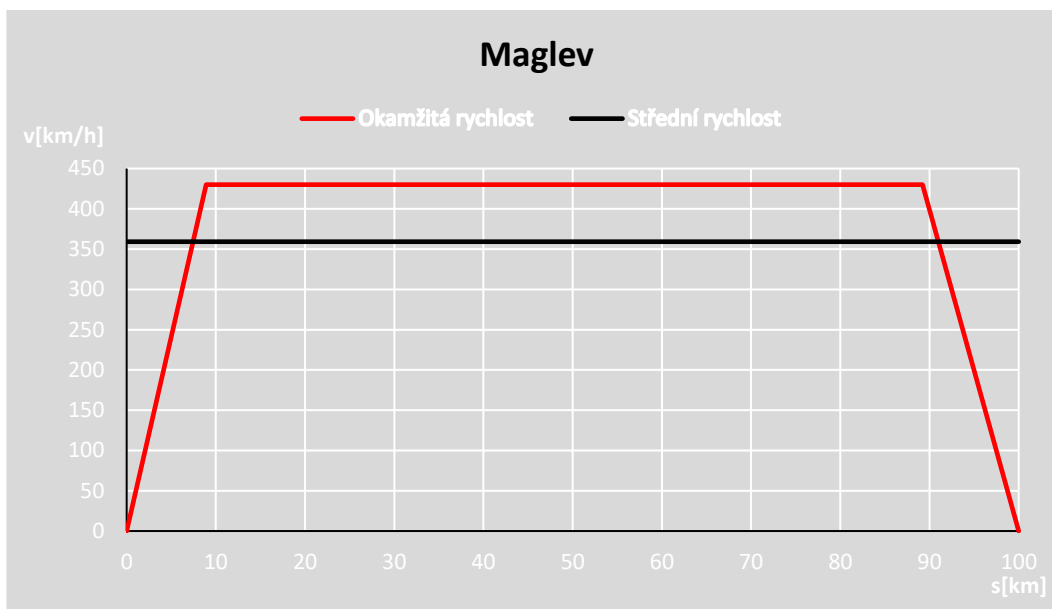
Z těchto hodnot jsem si zvolil vzdálenost  $s_a = 9 \text{ km}$  a čas  $t_a = 150 \text{ s}$  pro zrychlení

$$s = \frac{1}{2}at^2 \rightarrow a_a = \frac{2s_a}{t_a^2} = \frac{2 \cdot 9000}{150^2} = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Z toho plyne vzdálenost  $s_z = 10\,750 \text{ km}$  a čas  $t_z = 180 \text{ s}$  pro zpomalení

$$a_z = \frac{2s_z}{t_z^2} = \frac{2 \cdot 10\,750}{180^2} \doteq 0,66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

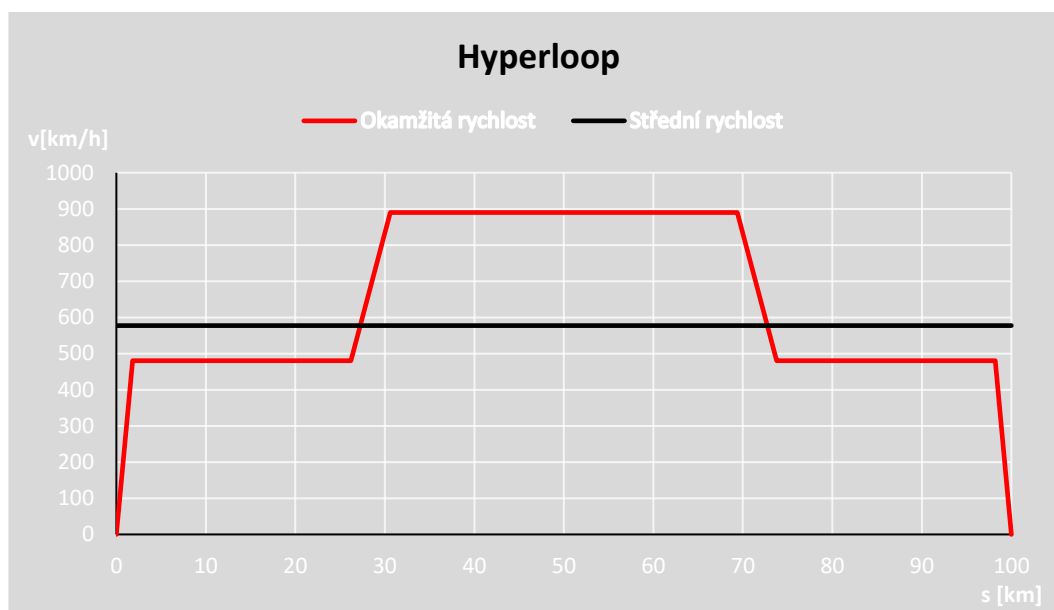
Z dráhové tachogramu systému maglev (graf 2) lze pozorovat, že vlak urazí maximální cestovní rychlostí 80 % celkové vzdálenosti. Což je dle mého názoru velmi dobrá využitelnost potenciálu toho systému, kterou potvrzuje rozdíl pouhých 16 % mezi maximální rychlostí a střední rychlostí. Dojezdový čas na 100 km je 17 minut.



Graf 2: Dráhový tachogram systému maglev

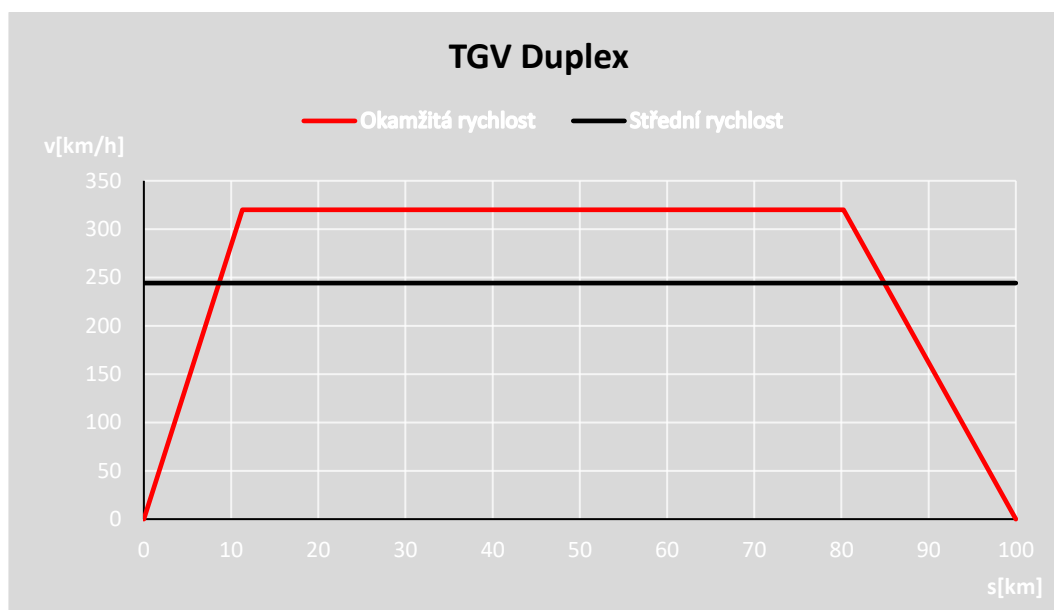
Při pohledu na dráhový tachogram systému Hyperloop (str. 31, graf 3) je vidět, že kapsle zrychluje pouze ve dvou fázích, oproti obr. 22, kde je zrychlování ve třech fázích. Je to způsobeno tím, že pokud by měla kapsle zrychlit až na maximální rychlost 1 220 km/h nestačila by na 100 km včas zastavit. Z toho důvodu jsem stanovil maximální rychlost, pro využití na této vzdálenosti, na hodnotu 890 km/h což odpovídá prvním dvěma fázím urychlování kapsle. K využití této snížené maximální rychlosti dojde na jen cca 40 % vzdálenosti, dle mého názoru se jedná nedostatečné využití možností Hyperloopu. Rozdíl mezi maximální a střední rychlostí je poměrně velkých 34 %. Ale i přesto, že systém není plně využit dosáhne dojezdového času na hranici 10 minut.





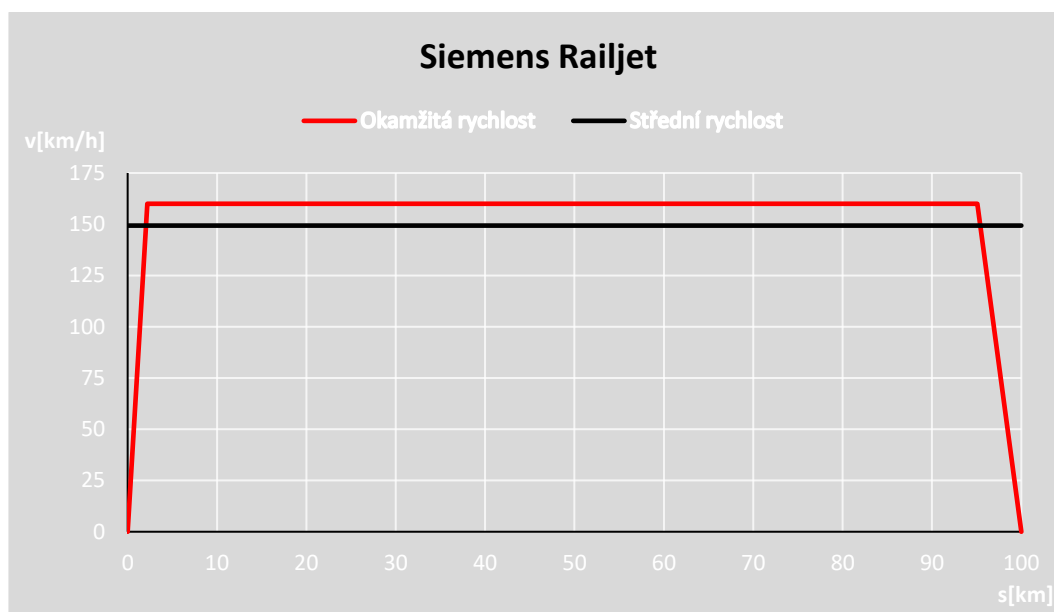
Graf 3: Dráhový tachogram systému Hyperloop

U konvenční soupravy TGV Duplex (graf 4) je vidět, že zrychlení, ani brzdění neprobíhá tak razantně jako u nekonvenčních systému. Maximální rychlost je využita na 70 % trati a rozdíl maximální a střední rychlosti činí 23 %. Dojezdový čas je 25 minut.

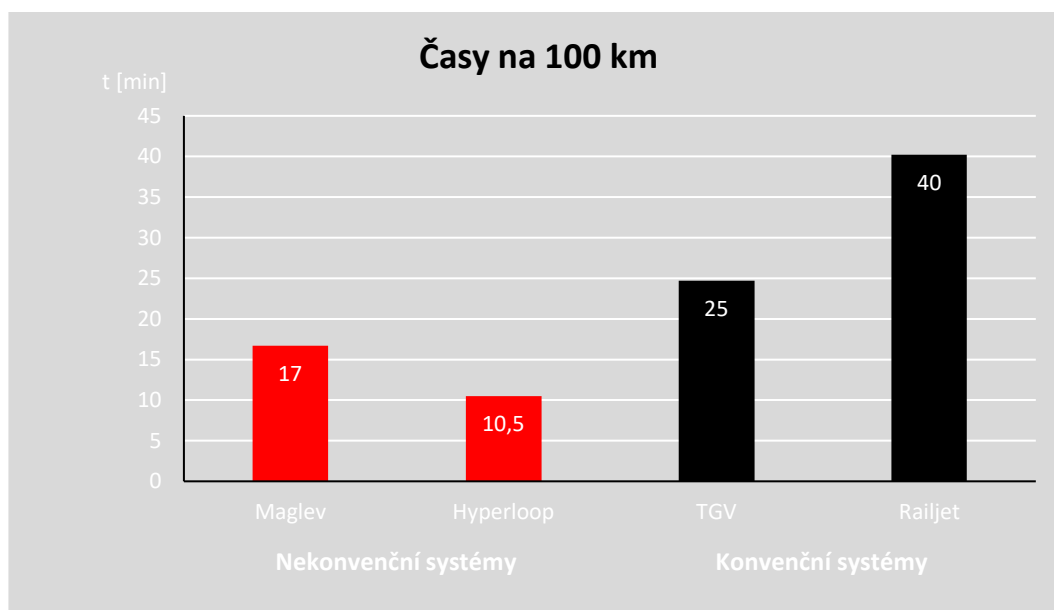


Graf 4: Dráhový tachogram jednotky TGV Duplex

Zrychlení a zpomalení Railjetu (graf 5) působí, přestože nemá lepší hodnoty než ostatní systémy, výrazně strměji. Je to dáno tím, že tento systém dosahuje maximální rychlosti minimálně o 160 km/h nižší než systémy předcházející. Maximální rychlost je využita téměř na celé délce trati a rozdíl mezi maximální a střední rychlostí je pouhých 6 %. Nejnižší maximální rychlost znamená nejpomalejší dojezdový čas s hodnotou 40 minut.



Graf 5: Dráhový tachogram soupravy Railjet



Graf 6: Srovnání dojezdových časů jednotlivých systémů

### 2.3.3 Zhodnocení

Srovnání nekonvenčních systému s konvenčními ukázalo, že nové způsoby kolejové dopravy jsou podstatně rychlejší. Otázkou zůstává, jestli vůbec Česká Republika potřebuje systémy schopné dosahovat nadzvukových rychlostí, když zde v současné době máme maximální traťovou rychlost pouhých 160 km/h. A jestli by nestačila modernizace současných tratí na rychlosti 200 km/h, nebo výstavba úplně nových vysokorychlostních tratí pro konvenční systémy. Předpokládané náklady na výstavbu nové vysokorychlostní trati v ČR jsou, pro tratě s rychlostí 300 km/h – 600 korun milionů na km. Náklady na modernizace stávající trati na rychlost 200 km/h – 400 milionů korun na km. [48] Důležité je zmínit, že tyto moderní



konvenční trati umožňují provoz jakýchkoliv vlaků a tím zlepšují návratnost investice. To samé ale neplatí pro nekonvenční systémy, kde jejich dráha nemůže být jinak využita.

Systém maglev se podle mě jeví jako lepší alternativa konvenční vysokorychlostní železnice. Mezi jeho hlavní výhody patří lepší zrychlení, nebo nižší hlučnost, která je žádoucí zejména v hustě obydlených oblastech, protože maglev na rozdíl od konvenčního systému nevyžaduje instalaci zvukových bariér podél trati. V současné době se všechny provozované vlaky maglev pohybují nadzemně. Nadzemní dráha by dle mého názoru usnadnila výstavbu potenciální tratě, především v českých městech, kde by mohla vést nad železnicí stávající. Pokud ale začneme uvažovat i s náklady na výstavbu trati, systém maglev začne rychle ztrácet své výhody. Částka potřebná na výstavbu jednoho km trati v Japonsku, nového systému maglev, schopného dosahovat rychlostí přes 500 km/h, která byla uvedena v části Maglev – Ekonomika, je 3,4 miliardy korun. Což je v porovnání s konvenční železnicí extrémní rozdíl, protože podle mého názoru bude cena na jeden km konvenční trati v Japonsku podobná té v ČR, tedy 600 milionů – 1 miliarda korun. Ano jedná se o výstavbu v Japonsku, kde jsou přírodní podmínky z hlediska seismologické aktivity nepříznivější než u nás, ale nároky na bezpečnost trati jsou všude stejné. Systém je i rychlejší než maglev v Šanghaji, jehož maximální rychlost jsem uvažoval v porovnání. Důvod, proč jsem ho neporovnával je, že trať by měla být otevřena nejdříve za 10 let a do té doby může dojít i ke zrychlení konvenčních systémů. Při pohledu na graf 6, kde je uvedeno srovnání dojezdových časů vidíme, že maglev přináší o třetinu lepší dojezdový čas než TGV. Otázkou je, jestli by se v ČR našel dostatek cestujících, kteří cestují v takovém časovém presu, že by jim nestačil dojezdový čas 25 minut, ale potřebovali ušetřit dalších 8 minut na vzdálenosti 100 km. Osobně si myslím, že takoví cestující ani neexistují, protože 8 minut rozdílu mezi nekonvenčním a konvenčním systémem je čas, který se může strávit ve frontě na jízdenku, nebo při hledání parkovacího místa na nádraží. Zkrátka v podmínkách ČR je přepravní vzdálenost příliš malá na to, aby se výrazněji projevilo urychlení přepravy, které by zvyšovalo šance na finanční soběstačnost maglevu. Můj názor potvrzuje již provozovaný vysokorychlostní maglev v Šanghaji na vzdálenosti pouhých 30,5 km, viz část Maglev – ekonomika. Když se vrátím k výstavbě trati maglevu v Japonsku, které v současné době disponuje vysokorychlostními vlaky Šinkansen schopnými dosahovat rychlostí 300 km/h. Nabízí se otázka, jestli jsou systémy maglev opravdu potřebnou alternativou ke konvenční železnici nebo jsou jen demonstrací technologické vyspělosti dané země, provozující tento nekonvenční systém. Sám se přikláním k možnosti druhé a myslím si, že vysokorychlostní maglev v ČR nemá opodstatnění.

Hyperloop se svým dojezdovým časem 10,5 minuty vysoce převyšuje zbylé 3 systémy. Tento výsledek se dal očekávat při pohledu na jeho technické parametry. V reálném provozu, ale bude celkový čas na přepravu znatelně delší. Jak bylo uvedeno systém Hyperloop funguje na principu kapslí pohybujících se v hermeticky těsném tubusu. Kapsle má předpokládanou kapacitu 28 míst, tzn., že za 10,5 minuty přepravíme jen zlomek pasažérů, které můžeme přepravit ostatními systémy. Při požadavku na přepravu skupiny 150 lidí budeme potřebovat

alespoň 6 kapslí. Autoři navrhují vypouštění kapslí do tubusu každé dvě minuty [19h], takže celkový čas na přepravu 150 lidí bude 20,5 minuty, což je minimální rozdíl v porovnání s ostatními systémy. Když uvážíme, že TGV je schopné za 25 minut přepravit více než 1200 pasažérů vychází Hyperloop jako poměrně exkluzivní druh přepravy. To může způsobit v dopravní špičce nutnost několikadenní, ne-li týdenní rezervace. Zdržení během přepravy nepochybně nastane také v dostavení se na stanici s větším časovým předstihem, než tomu je u konvenčních systémů, aby se mohla kapsle připravit k odjezdu. Uvážím-li, jakými technickými parametry se autoři projektu prezentují, je dle mého názoru téměř jisté, že systém do roku 2020, jak obě společnosti zabývající se Hyperloopem slibují, nebude dodržen. Když uvážím, že konvenční železnice má za sebou více než 200 let vývoje, nedovedu si představit, že by někdo dokázal vytvořit nový kolejový systém během 7 let. A pochybuji, jestli vůbec někdy k realizaci jakéhokoliv systému Hyperloop s parametry, s jakými je prezentován dojde. Protože dosud publikované informace byly zjištěny výhradně na základě odhadů a teoretických výpočtů, bez jakéhokoliv testování. Bezpečnost celého systému se opět nachází jen v teoretické rovině bez jakýchkoliv simulací nebo výzkumů. Náklady na systém Hyperloop uvedené v dokumentu Hyperloop Alpha [29], působí s cenou 290 milionů korun na kilometr výhodněji než konvenční systémy. Cena na sedadlo v přepravní kapsli je vyšší než u konvenčních vlaků, ale vyšší cena výstavby tratí konvenčních systémů rozdíl smazává. Velké množství dopravních projektů se oproti plánovaným odhadům prodraží, myslím si, že při realizaci tratí Hyperloopu tomu nebude jinak, minimálně v ČR. Pokud bych se ale mýlil, konstruktéři dokázali uvést systém Hyperloop do provozu v slibovaném termínu. Náklady na výstavbu by byly opravdu na úrovni, jakou uvádějí autoři a byla by zachována energetická soběstačnost systému. Znamenal by Hyperloop revoluci nejen ve vysokorychlostní kolejové přepravě, ale ve všech odvětvích přepravy. Poslední otázkou zůstává, jestli by Hyperloop našel uplatnění v ČR. Dle mého názoru by hlavní výhoda systému, kterou je přepravní rychlost nebyla využita do takové míry, aby systém jednoznačně převyšoval vysokorychlostní konvenční systémy, které mají v ČR blíže k realizaci. Problémem využitelnosti v ČR by byla i omezená přepravní kapacita.

Závěr srovnání je takový, že nekonvenční vysokorychlostní systémy jsou zajímavou a rychlejší alternativou, ale v podmínkách České republiky nenachází dostatečné opodstatnění. Ke zlepšení kolejové přepravy v rámci ČR by stačila výstavba vysokorychlostních tratí a výraznější modernizace tratí stávajících.

## 3 MĚSTSKÉ NEKONVENČNÍ SYSTÉMY

### 3.1 Monorail

Monorail je označení pro jednokolejnicovou zpravidla nadzemní dráhu. Jediná kolejnice, která je uprostřed zajišťuje nesení i vedení vlaku. Každý den monoraily přepraví stovky tisíc lidí. Můžeme se s nimi setkat po celém světě a jedná se o nejrozšířenější používaný nekonvenční systém kolejové dopravy. Systémy monorail se používají v městské dopravě, a to z důvodu jejich nadzemního vedení, díky kterému jsou plně odděleny od ostatní dopravy a chodců. Monoraily se vyskytují ve dvou hlavních verzích. První, která je zároveň rozšířenější, je verze kde se vlak pohybuje na kolejnici, tato verze bývá označována jako klasický monorail či monorail sedlový. Druhou variantou systému monorail je vlak zavěšený pod kolejnicí, tato varianta bývá označována jako visutá dráha. [49], [50], [51]



Obrázek 30: Typický monorail – Sydney [49]



Obrázek 31: Visutá dráha – Tokio [51]

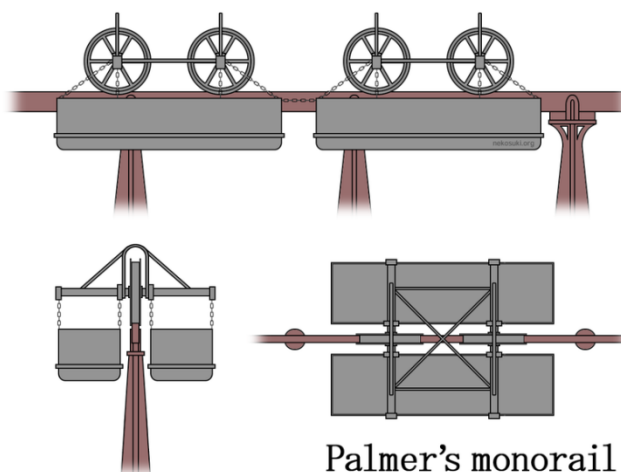
#### 3.1.1 Vývoj a historie

Pokusy využít jen jedné kolejnice v železniční dopravě se objevily už na počátku 19. století. Na rozdíl od ostatních nekonvenčních systémů uvedených v této práci, byly systémy typu monorail pro vynálezce přitažlivější a zmapování celé historie monorailů by bylo značně rozsáhlé. Proto jsou zde uvedeny, dle mého názoru nejzajímavější systémy monorail z let minulých, nebo systémy, které měly vliv na podobu monorailů dnes používaných.

První, kdo si nechal patentovat vůz pohybující se na jedné koleji byl anglický vynálezce Henry Robinson Palmer roku 1821. Pohon systému byl zajišťován koňmi, princip nesení vozů je na obr. 36. Na základě Palmerova patentu byla v roce 1825 otevřena první monorail trať v anglickém Cheshuntu. Zajímavostí je, že systém byl určen pro přepravu cihel, ale do historie se zapsal jako první monorail přepravující cestující, které vozil v den otevření. [50], [53]

V roce 1876, na světové výstavě ve Filadelfii, představil Generál LeRoy Stone svoji představu monorailu. Vozidlo se pohybovalo po centrální kolejnici, která zajišťovala vedení i nesení, pohyb byl umožněn dvěma hlavními koly o průměru 711 mm. Zadní kolo bylo

poháněno parním motorem, který byl stejný jako parní motory používané u konvenčních parních lokomotiv té doby. Konstrukce vozidla, jak je vidět na obr. 34, byla dvoupatrová, kabina strojvedoucího se nacházela na konci a pod ní byla nádrž na vodu a zásobník uhlí. Design byl vyveden ve stylu art deco, aby na výstavě vzbuzoval větší zájem o tento druh kolejové přepravy. [50], [54]

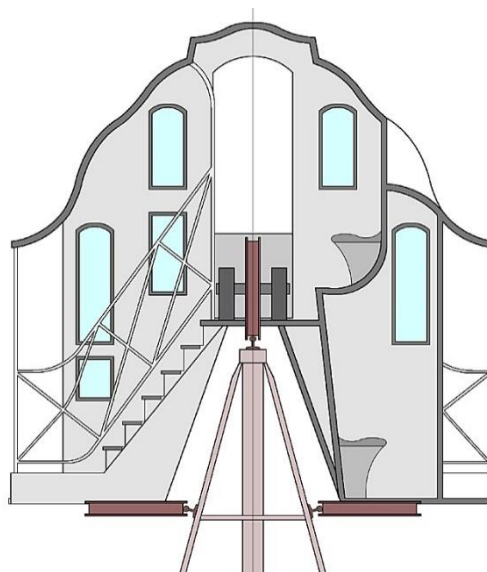


Palmer's monorail

Obrázek 32: Palmerův monorail [53]



Obrázek 33: LeRoyův parní monorail [54]



Obrázek 34: Řez parním monorailem [54]

Vysutá dráha využívající jedné kolejnice se objevila prvně v roce 1886 v Greenville, prezentovaná firmou Enos Electric Company. Jednalo se o testovací trať tvořenou kompaktnější ocelovou konstrukcí k nesení kolejnice, což bylo inovativní řešení, protože do té doby se využívaly masivní dřevné konstrukce. Tento konkrétní systém se nikdy nerozšířil do veřejné dopravy, ale inspiroval stavebního inženýra Eugena Langena, k vybudování vysuté dráhy v německém Wuppertalu. Výstavba začala v roce 1898, slavnostní otevření proběhlo v roce 1901. Zajímavostí je nadčasovost celého systému, protože trať je vedena nad řekou, takže nezabírá žádný prostor pro městskou výstavbu. Dráha ve Wuppertalu přežila obě



světové války a je v ziskovém provozu dodnes. Další visuté dráhy se ve světě začaly objevovat až v 50. letech 20. století a všechny vycházely z tohoto německého systému. Vylepšení zavěšení vozidel přineslo konsorcium francouzských společností nazývané SAFEGE, ve kterém byly například firmy Renault nebo Michelin (vylepšení je podrobněji rozvedeno v části princip pohonu a technologie). [50], [55], [56]

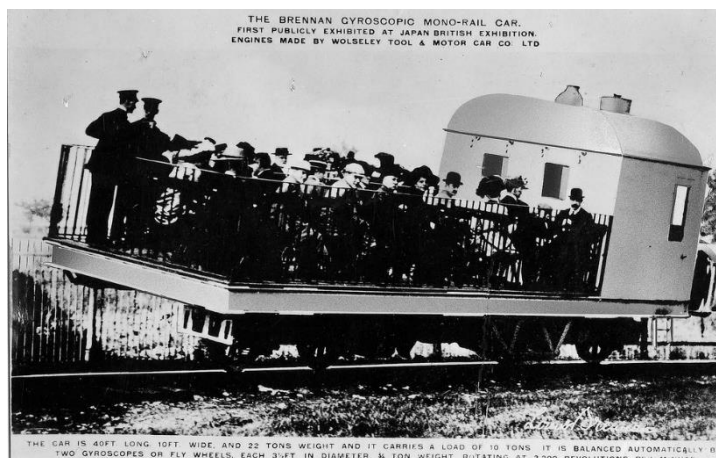


**Obrázek 35: Historický vůz visuté dráhy ve Wuppertalu [55]**

Gyroskopický vyvažovaný funkční monorail, ve skutečné velikosti, byl poprvé představen v Anglii roku 1909. Hlavním podnětem k vývoji tohoto vozidla bylo armádní využití, protože trať pro gyroskopicky vyvažované vozidlo umožňovala rychlou a poměrně snadnou výstavbu. Trať byla tvořena pouze jedinou kolejnicí podobnou kolejnicím používaným konvenčními systémy. Vozidlo bylo opatřeno dvěma gyroskopy dostatečně silnými na to, aby udržely vozidlo vyrovnané, i když byli pasažéři jen na jedné straně kabiny. Přestože testy byly úspěšné, strach z toho, že by se gyroskopy mohly porouchat a vozidlo by ztratilo stabilitu převážil, a k uvedení do provozu nikdy nedošlo. [50]

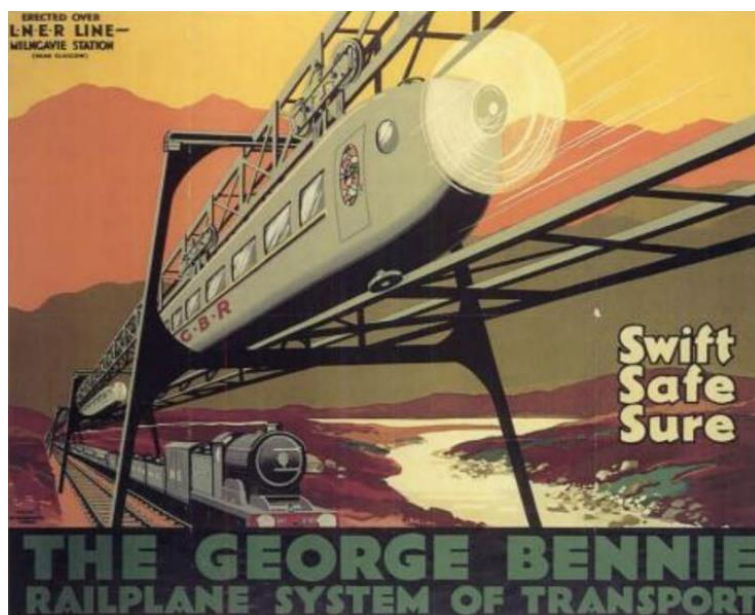


**Obrázek 36: Gyroskopicky vyvažovaný monorail [49]**



**Obrázek 37: Test gyroskopicky vyvažovaného monorailu [57]**

Roku 1929 se objevilo takzvané kolejové letadlo, jak bývá nazýván monorail skotského inženýra George Bennieho. Pohon vozidla byl zajišťován dvěma elektromotory o celkovém výkonu 240 koní, které poháněly vrtule umístěné na obou koncích vozidla. Maximální rychlost se dle autora projektu měla pohybovat na hranici 100 mil/h tedy 160 km/h. Za účelem představení tohoto systému odborníkům a veřejnosti byla postavena krátká trať, která vedla nad konvenční železniční tratí, aby dále zdůraznila výhody toho systému. Představení systému po první světové válce znamenalo nedostatek finančních prostředků na další vývoj a systém tedy začal a zároveň skončil u testovací dráhy, která se nedochovala. [50]

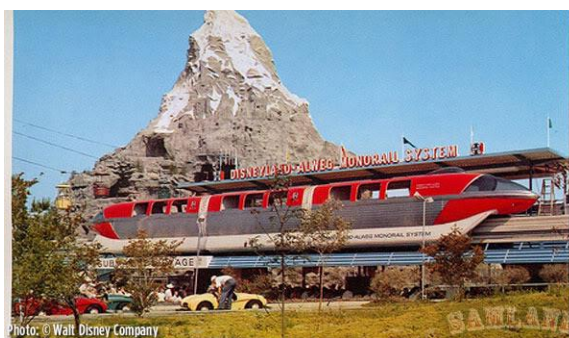


Obrázek 38: Propagační plakát k tzv. kolejovému letadlu [58]

V 60. letech minulého století založil Švéd, Dr. Axel Lennart Wenner-Gren společnost Alweg sídlící v Německu. Tato transportní společnost byla první, která po druhé světové válce obnovila myšlenku kolejového systému využívajícího jedné kolejnice k nesení a vedení vozidla. Monoraily se staly primární činností Alwegu, všechna vozidla, které opustily brány společnosti byly klasické monoraily, tzn., že se pohybovaly po jedné nadzemní kolejnici, která byla uprostřed dráhy. První prototyp ve zmenšené velikosti společnost představila v roce 1952, jednalo se o vysokorychlostní systém, který na oválné testovací trati dosahoval maximální rychlosti 160 km/h. Přestože testovací provoz probíhal v pořádku, k realizaci nedošlo. Společnost Alweg zaznamenala úspěch až v roce 1957, kdy na své testovací dráze představila funkční monorail skutečné velikosti. Tento testovací prototyp se stal předobrazem většiny dalších monorail systémů, které následovaly. Monorail od Alwegu dokonce zaujal i samotného Walta Disneye, který nechal obdobný systém postavit v kalifornském Disneylandu, tato realizace způsobila, že jsou monoraily často spojovány se zábavními parky a železnicí zážitkovou než jako plnohodnotný prostředek městské přepravy. Přestože společnost Alweg už neexistuje, byla největším průkopníkem monorail systémů a vytvořila koncept, který je v dnešní době rozšířen po celém světě. [50], [59]



Obrázek 39: Alweg monorail 1957 [59]



Obrázek 40: Monorail v Disneylandu [60]

### 3.1.2 Princip pohonu a technologie

Monoraily, jak bylo uvedeno, můžeme rozdělit na dva základní typy, na více rozšířenou variantu, kde se vozidlo pohybuje po kolejnici (sedlový nebo klasický monorail), a na méně se vyskytující visutou dráhu, kde je vozidlo zavěšeno pod kolejnicí. Pohyb obou základních typů systému monorail je zajištěn odvalováním kol po kolejnici. U obou typů je kolejnice vedena nadzemně buď na ocelových konstrukcích nebo na betonových sloupech. Dráhy se zpravidla staví nad vozovkou či řekou, ale vždy tak, aby zabíraly co nejméně městské plochy.



Obrázek 41: Trať monorailu v městské zástavbě [63]

Zaniklá společnost Alweg inspirovala řadu výrobců, kteří dnes vyrábí podobné systémy, jako kdysi tato firma. Mezi největší a nejznámější výrobce patří kanadský koncern Bombardier a japonská společnost Hitachi. Obě společnosti vyrábí vozidla, která jsou ve většině případů plně autonomní, bez nutnosti řidiče. Dnešní monorail systémy se pohybují po kolejnici, která je zpravidla tvaru I, vyrobená z oceli nebo ze železobetonu a její šířka se nejčastěji pohybuje v rozmezí 600–900 milimetrů. Kolejnice monorail systémů jsou podstatně masivnější než kolejnice konvenčních systémů, z tohoto důvodu je změna jízdní dráhy značně komplikovanější. Výhybky jsou veliké a jejich použitelnost značně složitější a nákladnější než



například u tramvají. Protože se jedná o nadzemní městskou dráhu musí být zaručeno, že nebude docházet k únikům maziva, které by mohlo ohrozit lidi a dopravu pohybující se pod kolejištěm. Projektanti se obvykle snaží omezit použití výhybek, pokud je ale použití nezbytné, nejčastěji se vyskytují u stanic, kde je více prostoty pro jejich realizaci. V dnešní době vyskytuje se celá řada výhybek pro monorail systémy, jako například segmentová výhybka, či výhybka otočná. V případě segmentové výhybky dochází k pohybu jednoho celého segmentu trati viz obr. 41. V případě výhybky otočné je systém změny dráhy poměrně zajímavý, výhybka je tvořena jedním (v případě rozdvojení jedné trati) nebo dvěma segmenty (v případě spojení dvou jiných tratí). Při propojení dvou tratí musí vést obě tratě stejným směrem a musí být rovnoběžné. Segmenty mají kolejnici umístěnou z obou stran (spodní a horní), z jedné strany je kolejnice rovná, z druhé je oblouk, takže když se současně oba segmenty otočí o 180 ° (rovná část je nahrazena obloukem) dojde k přerušení kolejnic stávajících a spojení kolejnic rovnoběžných, otočná výhybka je vidět na obr. 42. [49], [50]



Obrázek 42: Segmentová výhybka [61]

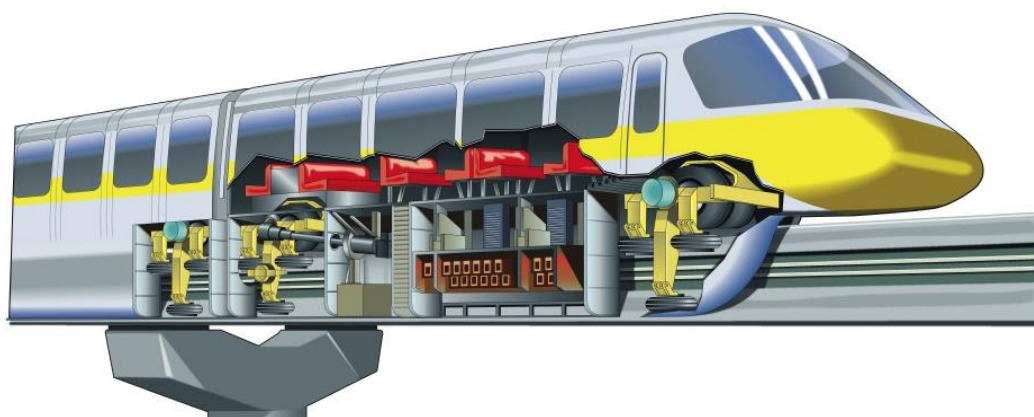


Obrázek 43: Otočná výhybka [62]

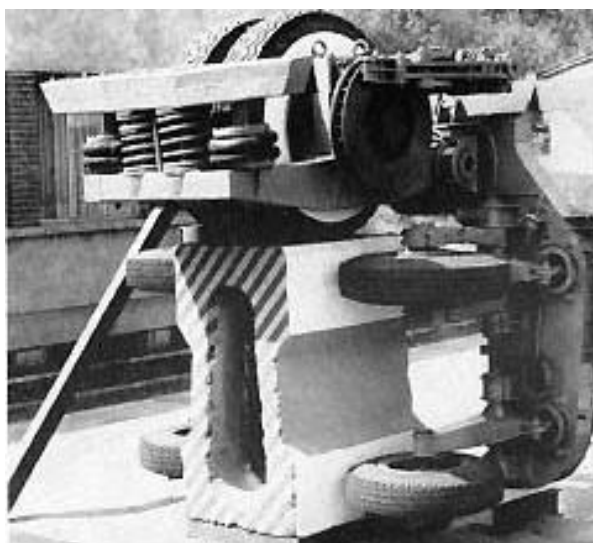
Trakci vozidla a nesení jeho hmotnosti zajišťují kola, která jsou umístěna ze spodu vozidla a odvalují se po horní straně kolejnice, jak je vidět na obrázku 44. Kola jsou opatřena pneumatikami, což nejenže snižuje nežádoucí hlučnost systému, ale především zvyšuje trakční schopnosti a umožňuje překonání vyššího stoupání než u méně rozšířených systémů vybavenými koly ocelovými. Maximální možné stoupání dnešních monorail systémů je 6 % [63]. Aby se při jízdě vozidlo nekymácelo ze strany na stranu, je opatřeno vodícími koly, která jsou umístěná uvnitř vozidla a odvalují se po bočních stranách kolejnice viz obr. 44. Vodící kola mají také pneumatiky. Všechna nosná a trakční kola vozidla jsou schopna natáčení, které je zajištěno právě koly vodícími. Přestože je natáčení pod malým úhlem, zajišťuje jednak, aby byl průjezd obloukem plynulejší, ale také aby nedocházelo ke žvýkání pneumatik. Moderní systémy monorail umožňují minimální poloměr oblouku 46 metrů. Odpružení vozidla je vzduchové a automaticky udržuje konstantní výšku podlahy v závislosti na aktuálním zatížení. Vodící kola jsou opatřena hydraulickými tlumiči. Vozidla jsou poháněna vždy minimálně dvěma elektromotory a fungují na principu redundance, takže, když dojde k poruše jednoho z motorů vozidlo může stále pokračovat v jízdě. Elektromotory jsou napájeny tzv. třetí kolejnicí, jak bývá



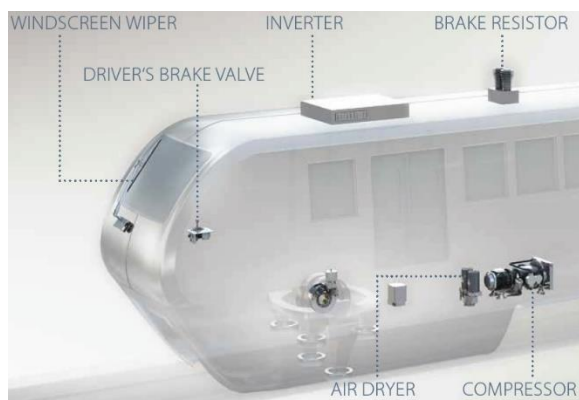
často označována napájecí kolejnice, která je umístěna buď v hlavní kolejnici (vodící a nosné), nebo je k ní připevněna pomocí izolátorů. Napájení vozidel elektrické trakce pomocí napájecí kolejnice se využívá především v městské kolejové dopravě, kde jsou kladeny vyšší nároky na spolehlivost systému. Nevýhodou tohoto řešení je malé maximální možné napětí, které je v rozmezí 600–750 V DC. Maximální rychlost takto napájených vozidel je 80 km/h. Odběr energie z trakční kolejnice zajišťují botkové sběrače umístěné na spodní části vozidla. Brzdění vozidla je zajištěno částečně elektromotory, které přejdou do generátorického režimu a přemění mechanickou energii na energii elektrickou. Každé kolo odvalující se po horní straně kolejnice je opatřeno kotoučovou brzdou. Moderní brzdné systémy dnes dokáží rekuperovat elektrickou energii i z brzdění kotoučovými brzdami a tuto energii využít například pro pohon klimatizace, stěračů nebo dveří, viz obrázky 46 a 47. Všechny součásti podvozku, tedy kola nosná a vodící jsou včetně odpružení a brzd umístěna v konstrukci (ocelových rámech) tvořící podvozek (obrázek 45), ke konstrukci jsou v některých případech přidělaný i elektromotory. Celé osazené konstrukce jsou připevněny ke kabině vozidla ze spodu na jeho koncích. [49] [64], [65], [66], [67], [68]



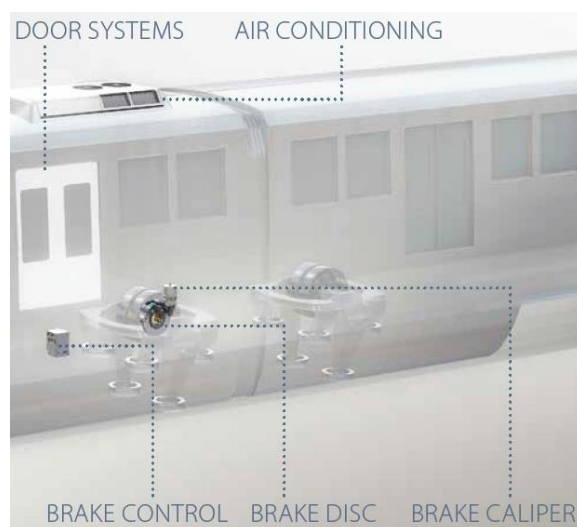
Obrázek 44: Řez vozidlem monorailu [64]



Obrázek 45: Detail konstrukce podvozku a kolejnice tvaru I [50]



Obrázek 46: Moderní brzdový systém [68]

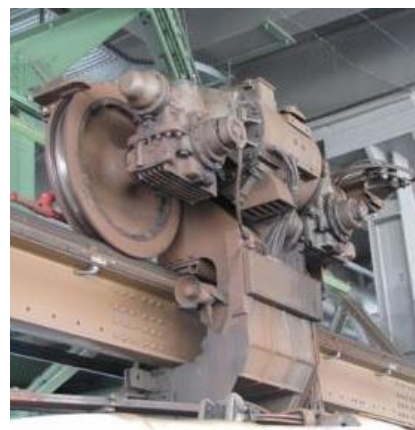


Obrázek 47: Moderní brzdový systém [68]

Visuté dráhy jsou pomalejší než monoraily klasické, ale princip jejich pohonu je podobný a liší se především uchycením vozidla ke koleji, vozy jsou výkyvně zavěšeny. Dnes se využívají 3 základní typy zavěšení. Prvním a nejstarším, je typ používaný ve Wuppertalu již od roku 1901. Systém využívá odvalování ocelových kola po kolejnici. Kola jsou připevněna, opět pomocí železného rámu, ke střeše vozidla. Pohon je zajištěn elektromotory, které jsou připevněny k rámu, jak je vidět na obrázku 48. Nevýhodou tohoto typu výkyvného zavěšení je, že celý systém pohonu není chráněn proti vnějším vlivům prostředí, a že ocelová kola nemají stejnou trakci jako systémy využívající kola gumová. I když systém prošel modernizacemi, princip pohonu je stejný dodnes a wuppertálský monorail se může chlubit velmi dobrou spolehlivostí. [50]



Obrázek 48: Zavěšení vozidla ve Wuppertalu [69]

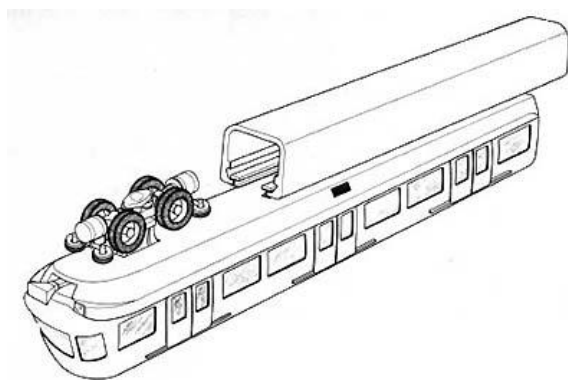


Obrázek 49: Detail zavěšení (starší vozidlo než na obr. 48) [70]

Druhým dnes používaný typ zavěšení využívá visutá dráha v Tokiu. Technologii a vozidla dodala společnosti Mitsubishi, která používá moderní verzi zavěšení SAFEGE. To využívá gumové pneumatiky, které se pohybují uvnitř duté ocelové kolejnice (nosníku), aby se pneumatiky nedřely o stěny, je zavěšení opatřeno koly vodícími. Princip výkyvného zavěšení

je na obrázku 50. Výhodou tohoto systému je ochrana součástí zavěšení a pneumatik, ale i žádoucí schování napájecí kolejnice. Nevýhodou je velikost kolejnice, která dosahuje v místě výhybek větších rozměrů než samotné vozidlo, jak lze vidět na obrázku 57 v následující části, a vysoká hlučnost způsobená dutou kolejnicí. [50]

S posledním používaným typem zavěšení se můžeme setkat opět v Tokiu, konkrétně v zoologické zahradě Ueno. Tento typ používá podvozkové konstrukce, které jsou velmi podobné konstrukcím, jaké používají monoraily klasické, pohybující se po kolejnici (obrázek 45). Rozdílem je, že u klasických monorailů tato konstrukce je připevněna k vozidlu ze spodu a v případě visuté dráhy je vozidlo zavěšeno pod ní. [50], [71]



**Obrázek 50: Systém zavěšení SAFEGE, modernizované verze používány v Tokiu [50]**



**Obrázek 51: Visutá dráha v tokijské zoo Ueno [71]**

Systémy monorail a visuté dráhy bývají označovány jako velmi bezpečné systémy, a to hned z několika důvodů. Hlavním důvodem je nadzemní provoz, který zabraňuje kolizím s chodci a pozemní dopravou. Dalším důvodem je velmi silné uchycení vozidel ke kolejnici zabraňující vykolejení, ke kterým v případě monorailů dochází velmi zřídka. Například visutá dráha ve Wuppertalu za více jak sto let provozu zaznamenala jen jednu nehodu, která byla zaviněna lidskou chybou. Bezpečnost systémů zvyšuje použití pneumatik plněných dusíkem, aby v případě porušení pneumatiky bylo minimalizováno riziko vzniku požáru. Pneumatiky disponují schopností runflat, což znamená že jsou schopny pokračovat v jízdě i při úplné ztrátě plnicího média. Runflat pneumatiky mají oproti běžným pneumatikám zesílené bočnice, takže pneumatika se nesvlékne z ráfku při další jízdě a je schopna nést stejné zatížení jako před porušením. [50], [64]

### 3.1.3 Využití ve světě

Monoraily, jak bylo zmíněno, jsou nejrozšířenějším nekonvenčním systémem kolejové přepravy vůbec. Můžeme se s nimi setkat ve 42 velkých světových městech, jako například Tokio, Seattle, Las Vegas, São Paulo, Sydney, Dubaj a další města především v Číně, Japonsku a Malajsii. Monoraily našly své uplatnění i v zábavních parcích a zoologických zahradách, kde se spojují výhody spolehlivého provozu s relativně nízkými provozními náklady a vysokou



bezpečností. Celková délka všech monorail linek na světě je 260 km, což jasně značí výhradně městské použití těchto systémů. [51]

Vzhledem k velké rozšířenosti systému nebudu rozepisovat použití každého konkrétního monorailu zvlášť, jako tomu bylo u vysokorychlostních nekonvenčních systémů. Důležité je zmínit, že většina dnes provozovaných klasických monorailů je plně autonomní. Ale například nově realizovaný monorail systém používaný v malajském Kuala Lumpur je stále řízen strojvedoucím. Provozované klasické monoraily jsou nejčastěji od výrobců Hitachi, Bombardier a nově vzniklé čínské společnosti BYD. [51]

Visuté dráhy nejsou tak rozšířené. Většina už byla zmíněna v předchozích částech práce. V Evropě se s visutou dráhou můžeme setkat kromě Wuppertalu ještě v Düsseldorfu na letišti, kde je podle mého názoru jediná zcela autonomní visutá dráha. Zbylé visuté dráhy používané ve světě jsou vždy řízeny strojvedoucím. Většímu využití vysutých drah brání především jejich pomalost, vysoká hluchost a omezená kapacita v porovnání monoraily sedlovými nebo konvenčními systémy. V Číně je v současné době testována visutá dráha s vozidly akumulátorovými, která svým vzhledem připomíná pro Čínu typickou pandu, viz obr. 59.



Obrázek 52: Las Vegas [72]



Obrázek 53: Seattle [73]



Obrázek 54: Dubaj [74]



Obrázek 55: São Paulo [63]



Obrázek 56: Velkokapacitní monorail, Tokio [75]



Obrázek 57: Visutá dráha, Tokio [76]



Obrázek 58: Autonomní visutá dráha, letiště  
 Düsseldorf [50]



Obrázek 59: Akumulátorová visutá dráha, Čína  
 [77]

### 3.1.4 Ekonomika

Rozšířenost monorailů dokazuje jejich finanční výhodnost, což potvrzují i informace o konkrétních systémech. Například monorail z obrázku 56, který spojuje centrum Tokia s jeho mezinárodním letišťem Haneda, je provozován soukromou společností a každý rok vykazuje zisk. Monorail provozovaný v centru Seattlu je opět ve správě soukromé firmy, takže lze usuzovat, že systém musí být výdělečný, jinak by ho žádná soukromá společnost neprovozovala. Visutá dráha ve Wuppertalu je také výdělečná a prochází pravidelnými modernizacemi, z nichž poslední rekonstrukce celé 13 km dlouhé trati přišla na 11 miliard korun (cena byla přepočítána z eur podle kurzu platného ke dni 4. 7. 2017, kdy střední hodnota 1 eura odpovídala 26,107 Kč, a zaokrouhlena). Náklady na modernizaci 1 km trati vychází přibližně 850 milionů korun. Pro porovnání náklady na 1 km nové tramvajové trati v Praze jsou v průměru 500–700 milionů korun. [50], [55], [89], [90]

Náklady na výstavbu nové trati sedlového systému monorail se liší jednak podle různých zdrojů informací, které je uvádějí, ale také podle toho, v jaké zemi výstavba probíhala. Rozdíl v cenách je způsoben rozdílnou cenou pracovní síly a složitostí získávání pozemků potřebných pro výstavbu. Ale nikoliv tím, že by se někde ve světě používaly levnější tratě a jinde zase tratě dražší, zkrátka kvalita tratí musí být všude a vždy stejná. Průměrnou cenu trati systému



monorail na kilometr jsem stanovil z uvedených zdrojů, tak že jsem udělal průměr cen v zemích, které během posledních 10 let otevřely novou trať a z ekonomického hlediska jsou na podobné úrovni, jako je Česká Republika. Průměrná cena trati tedy je 1,8–2,5 miliardy korun na 1 km (všechny ceny jsem z dolarů přepočítal na Kč podle kurzu k datu 25. 6. 2017, kdy střední hodnota 1 USD odpovídala 23,548 Kč, a následně zaokrouhlena). [50], [78]

Monoraily občas bývají nazývány jako lehké metro [51], takže pokud takto o nich budeme uvažovat, jako o systému konkurujícím metru a nikoliv tramvajím, budou náklady na 1 km trati o něco nižší než u metra. Při dostavbě metra A v Praze se náklady na 1 km dostaly na cenu 3,6 miliardy korun. [91]

### 3.2 Kolejově vedený trolejbus

Kolejově vedený trolejbus nebo také tramvaj na pneumatikách, či lehká tramvaj je označení nekonvenčního kolejového systému městské dopravy vycházejícího z tramvajů a autobusů. Nejjednodušeji lze tento systém popsat jako tramvaj, která má podvozky s ocelovými koly nahrazeny podvozky osazenými koly autobusu (obrázek 64), tedy koly, které mají pneumatiky. Lehké tramvaje mají nejbližší, ze všech nekonvenčních systémů v této práci uvedených, ke konvenčním systémům, především z důvodu velmi podobné konstrukce buď s tramvajemi nebo s trolejbusy. Vozidla jsou vždy elektrické trakce a přívod elektrického proudu je trolejovým vedením. Konvenční tramvaje využívají k vedení i nesení tratě tvořené dvěma kolejnicemi. Systém lehké tramvaje k vedení využívá pouze jednu kolejnici, která je uprostřed pod vozidlem, nesení zajišťují kola s pneumatikami. Systémy kolejově vedeného trolejbusu nejsou příliš rozšířené a můžeme se s nimi setkat jen výjimečně. Výhodou tohoto systému je, že k přepravním schopnostem tramvaje přidává vlastnosti trolejbusu, které navíc do jisté míry vylepšuje. V dnešní době tato vozidla vyrábí jen dvě společnosti, francouzská NTL, která spadá do koncernu Alstom, a kanadský Bombardier. Lehké tramvaje od společnosti NTL jsou nazývány Translohr, toto označení se často používá pro všechny lehké tramvaje všech výrobců. [79], [80], [81]



Obrázek 60: Šestičlánkový Translohr v Paříži [81]

### 3.2.1 Vývoj a historie

Vývoji kolejově vedeného trolejbusu předcházely desítky let vývoje tramvají, ale jejich vývoj zde uveden nebude, z důvodu že se jedná o systémy konvenční. Koncept lehké tramvaje byl poprvé představen v roce 1997 koncernem Alstom, pod již zmíněným názvem Translohr. Při představení systém kombinující vlastnosti tramvaje s dopravním prostředkem využívajícím pneumatiky vzbuzoval rozporuplné reakce. Prototyp, který byl prezentován měl hliníkovou skříň, takže zaujal nižší hmotností, než jakou mají tramvaje a také výškou podlahy pouhých 250 mm (nízkopodlažní tramvaj Škoda 15T má minimální výšku podlahy 350 mm, městský autobus SOR NB 12 má minimální výšku podlahy 340 mm). Trolejové vedení pro napájení vozidla bylo totožné s vedením tramvajovým. Přestože kola měly pneumatiky a vozidlo by reálně mohlo být schopné pohybu bez vedení kolejnicí, systém přichycení to neumožňoval (vysvětleno v další části). Zajímavostí bylo, že prototyp měl zabudované baterie umožňující přesuny v místech, kde není trolejové vedení, nebo při dojezdech do depa. K prvním ostrým testům systému Translohr došlo v roce 2000. Translohry provozované ve veřejné dopravě se od původního prototypu nezměnily. K uvedení do provozu došlo v roce 2006 ve francouzském Clermont Ferrand. Dnes je systémem Translohr používán sedmi světovými městy, mezi kterými je např. Paříž nebo Šanghaj. [81], [82], [83], [84]



Obrázek 61: První realizovaný Translohr, Clermont Ferrand [81]

Firma Bombardier začala s vývoji vozidel využívající vedení jednou kolejnicí a nesení koly s gumovými pneumatikami na začátku 90. let 20. století. Podnětem k vývoji byl požadavek francouzských měst Caen a Nancy na vozidlo s větší kapacitou než autobus, ale se zachováním jeho vlastností, jako je trakce, brzdění a obratnost. Bombardier přišel s vozidlem, které je vedeno jednou kolejnicí, ale na rozdíl od Translohru, je schopné vedení opustit (přichycení ke kolejnici je vysvětleno v následující části) a být řízeno volantem, jako autobus. Tramvaje na pneumatikách od Bombardieru jsou vybavené diesellovým motorem, který vyrábí elektřinu,

jede-li vozidlo v úseku, kde není trolejové vedení. Vozidlo pro město Caen využívá k napájení standardní tramvajové trolejové vedení. Vozidlo pro město Nancy se odlišuje napájením, ke kterému slouží trolejové vedení po trolejbusech, které byly dříve ve městě používány. Tím došlo ke snížení nákladů na výstavbu trati. V současné době obě města od systému upouštějí vzhledem velké nespolehlivosti. Systémy jsou postupně nahrazovány tramvajemi. [85]



Obrázek 62: Bombardier v Caen [85]



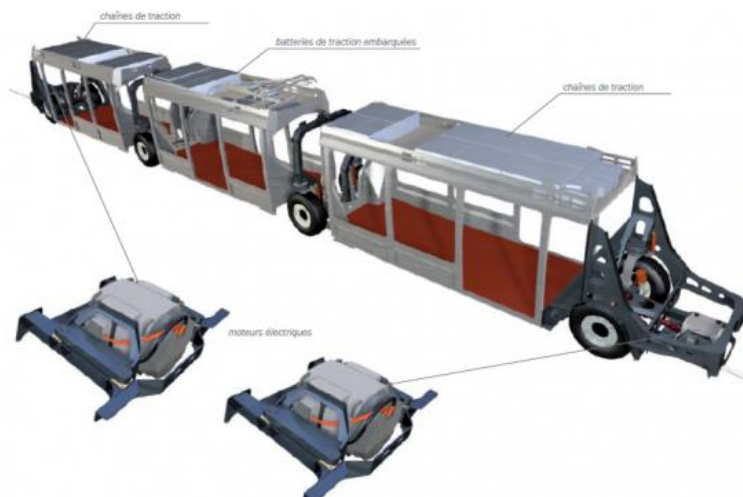
Obrázek 63: Bombardier v Nancy pohybující se mimo vodící kolejnici [85]

### 3.2.2 Princip pohonu a technologie

Z předchozí části vyplývá, že systém Translohr konstrukčně vychází z nízkopodlažních tramvají, jak lze pozorovat na obrázcích. A vozidla Bombardieru by se dala označit za tříčlánkové nízkopodlažní trolejbusy doplněné o možnost kolejnicového vedení (obrázky 66 a 67 ukazují podobnost). Oba dva systémy mají společné vedení pomocí jedné kolejnice (systém přichycení je však jiný, viz dále), výhodou kolejnicového vedení je, že vozidlo díky němu dokáže naplno využít své technické možnosti a pohybovat se na velmi omezeném prostoru. Například při průjezdu historickými centry měst nemůže šofér tříčlánkového trolejbusu s délkou přes 20 m nikdy dosáhnout stejné přesnosti a efektivity průjezdu zatáčkou jako systém kolejnicově vedený. [81]

Použití pouze jedné kolejnice umožňuje menší poloměr oblouku i v porovnání s tramvajovou tratí využívající kolejnice dvě. U systému Translohr je snížení poloměru oblouku oproti tramvajím dosaženo jinou koncepcí podvozků, každý článek je spojen otočným podvozkem, který má jen jednu nápravu. Jednotlivé podvozky jsou osazeny elektromotory, takže Translohr má možnost principu redundance. Firma NTL vyrábí lehké tramvaje v rozmezí od tříčlánkových, až po šestičlánkové, které dosahují kapacity 358 pasažérů, všechny délky mají shodný poloměr otáčení 10,5 m (městský autobus SOR NB 12 o délce 12 m, má poloměr zatáčení 11,3 m). Hmotnost se pohybuje v závislosti na počtu článků v rozmezí 23–44 tun. [81], [84], [86]





Obrázek 64: Kostra vozidla Translohr [87]



STE3 - 25 m - 178 pass.



STE4 - 32 m - 238 pass.



STE5 - 39 m - 298 pass.



STE6 - 46 m - 358 pass.

Obrázek 65: Translohr – vyráběné délky [81]

Vozy od firmy Bombardier jsou jiné koncepce, jejich podvozek a pohon je velmi podobný tříčlánkovým trolejbusům, takže ke snížení poloměru oblouku dochází jednokolejnicovým vedením v kombinaci s natáčením kol první a poslední nápravy. [81], [85]



Obrázek 66: Lehká tramvaj v Nancy [85]



Obrázek 67: Tříčlánkový trolejbus [85]

Jak bylo uvedeno systémy Translohr a Bombardier jsou schopné jízdy bez nutnosti napájení. První jmenovaný systém je vybaven bateriemi a druhý jmenovaný dieslovým motorem. [80], [81]

Systémy se liší i rozdílným způsobem přichycení k vodící kolejnici. Translohr je spojen s vodící kolejnici trvale dvěma ocelovými koly uspořádanými do V pod úhlem 45°, viz obr. 68. Vodící systém svírající kolejnici je umístěn na každé nápravě, aby zajistil dokonalou trajektorii. [81]

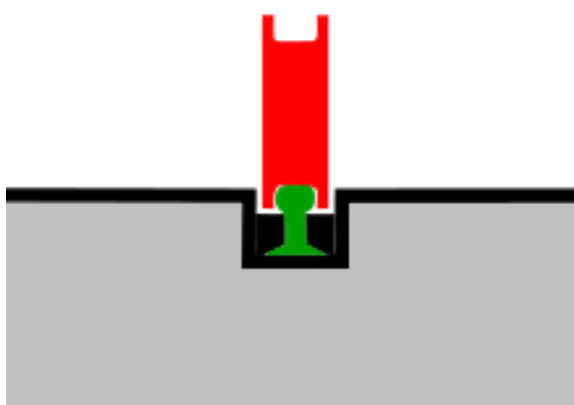


Obrázek 68: Schéma přichycení ke kolejnici, Translohr [80]



Obrázek 69: Detail vodícího systému, Translohr [81]

Vodící systém Bombardieru umožňuje vozidlu opustit vedení a pokračovat v jízdě, jako autobus. Proto jediné, co má společné se systémy Translohr, je jedna centrální vodící kolejnice. Protože vozidla byla uvedena do provozu před 15 lety a od té doby Bombardier nevyrobí tento typ, je složité najít jakékoliv technické detaily. Na obrázku 70 je vidět schéma přichycení vozidla ke kolejnici. [80]

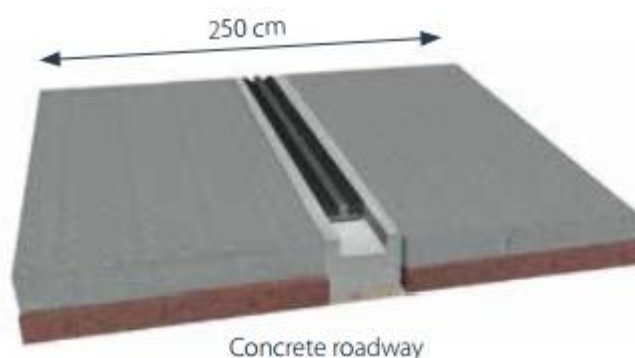


Obrázek 70: Schéma přichycení vozidla ke kolejnici, Bombardier [80]

Trakce obou vozidel je zajišťována koly opatřenými pneumatikami. Takže systémy lehké tramvaje mají výrazně kratší brzdovou dráhu než tramvaje konvenční, kde je kontakt ocelového kola s ocelovou kolejnici. Lepší trakce umožňuje oběma systémům maximální stoupání na hranici 13 %. Problémy s trakcí nastávají ale v zimě, kdy se vozidla musí vybavit zimními



pneumatikami, nebo se musí tratě udržovat čisté, avšak bez použití chemického posypu, aby netrpěla vodící kolejnice. Povrch tratí je nejčastěji betonový, ale možné jsou i povrchy asfaltové, dlážděné, nebo travnaté s betonovými pásy pod koly, celková šířka jízdního pruhu pro oba systémy je 250 cm. Právě povrchy tratí jsou největším problémem kolejově vedených tramvají, protože všechny uvedené materiály se nedokáží svou pevností a odolností vyrovnat ocelovým kolejnicím. To má za následek vyjíždění tzv. kolejí, které jsou nežádoucí. Tento problém stojí za kritikou jízdního komfortu obou systémů v porovnání s tramvajemi konvenčními. Vyjeté koleje v trati způsobují vysokou nespolehlivost vozidel Bombardieru a jejich časté vykolejování, protože vodící systém není, jak je na obr. 70 vidět, opatřen výraznější ochranou proti tomuto nežádoucímu jevu. Oproti tomu vozidla Translohr a jejich vodící systémy jsou spolehlivější. [81], [85]



Obrázek 71: Trať pro lehké tramvaje [81]

### 3.2.3 Využití ve světě

Systémy Bombardier byly vyrobeny na zakázku pro francouzská města Caen a Nancy, takže se s nimi jinde setkat nemůžeme. A pravděpodobně ani ve Francii se s nimi brzy nesetkáme, protože jsou 15 let staré vozy postupně vyřazovány z provozu a nahrazovány buď trolejbusy nebo tramvajemi. Stop jejich dalšímu vývoji vystavila vysoká nespolehlivost. [85]

Systémy od společnosti NTL jsou podstatně úspěšnější a od svého uvedení v roce 2006 se rozšířily do sedmi světových měst a jejich počet ve světě stoupá. Systémy Translohr každý den po celém světě přepraví více jak 330 000 cestujících. [86]

V Evropě se s tímto systémem můžeme setkat, ve francouzském Clermont Ferrand, od roku 2007 v italském městě Padova, kde je využíván provoz na baterie při přejezdu historického náměstí Prato Della Valle. V roce 2010 spojil Translohr pevninskou část Benátek Mestre s ostrovní částí Benátek. Na trati dlouhé 20 km operuje 20 čtyřčlankových vozidel. Posledním městem v Evropě, kde se s Translohrem můžeme setkat je Paříž. Celkem 43 tří a šesti člankových vozů je provozováno na dvou linkách celkové délky 20,6 km. [86]



Obrázek 72: Clermont Ferrand [86]



Obrázek 73: Padova, Prato Della Valle [86]



Obrázek 74: Benátky [86]



Obrázek 75: Pohled do kabiny, Paříž [86]

Mimo Evropu se poprvé Translohr objevil roku 2007 v čínském Tchien-ťin, kde byla žádoucí možnost provozu bez nutnosti napájení. Na své lince projíždí pod mostovou konstrukcí, kde nebylo možné postavit trolejové vedení. O dva roky později se mezi města provozující Translohr přidala Šanghaj. Poslední systém byl uveden do provozu v Medellínu v Kolumbii. Toto město ležící v Kordillerách si tento systém vybralo vzhledem k velkým převýšením na trati, kde je nutné překonat až 12% stoupání. [86]



Obrázek 76: Tchien-ťin [86]



Obrázek 77: Šanghaj [86]



Obrázek 78: Medellín [86]

### 3.2.4 *Ekonomika*

Ekonomickou stránku lehké tramvaje od Bombardieru je těžké popsat přesně, vzhledem k tomu, že se jedná o systém starý 15 let. Jediné, co lze o tomto systému říci je, že i když nabízel nižší cenu než tramvaje a kapacitu větší než trolejbusy, nesplnil svá očekávání. Náklady na provoz se ukázaly daleko vyšší oproti konvenčním systémům, jednak z důvodu častých oprav tratí způsobených vyjetými koleji, ale také kvůli častým poruchám a nutnosti nahrazovat porouchaná vozidla autobusy. [85]

Translohr má průměrné náklady na výstavbu 1 km trati v rozmezí 375–500 milionů korun. [85] Samotná vozidla by měla být dle některých zdrojů levnější než konvenční tramvaje, ke kterým mají nejbližší. [85] V roce 2006 stálo 20 čtyřčlankových vozidel pro Clermont Ferrand 44 milionů euro, takže jedno vozidlo vyšlo na 57,4 milionu korun (cena byla přepočítána z eur podle kurzu platného ke dni 4. 7. 2017, kdy střední hodnota 1 eura odpovídala 26,107 Kč, a zaokrouhlena). [88] Samotné náklady na provoz prodražuje častější oprava tratí z důvodu vyjíždění kolejí. [85]

## 3.3 Srovnání s konvenčními systémy a zhodnocení

Nekonvenční městské systémy se na rozdíl od nekonvenčních vysokorychlostních systémů už dokázaly stát plnohodnotnou alternativou k systémům konvenčním. A proto se v dnešní době běžné vyskytují v provozu, je-li jejich použitelnost opodstatněna. Abych zjistil, jestli by systémy monorail a kolejově vedený trolejbus dokázaly najít opodstatnění v České Republice, je opět nutné udělat srovnání s konvenčními systémy. Městský systém maglev do srovnání zahrnovat nebudu, jednak protože se ve světě vyskytuje jen ve 3 případech, ale také proto, že městské maglevy jsou v provozu spíše jako turistická atrakce, nebo prezentace technické



vyspělosti než plnohodnotná alternativa městské dopravy. I kdybych systémy maglev zahrnul, neměl bych technické údaje, které jsou ke srovnání nezbytné, protože většina informací o těchto systémech je asijskými jazyky.

Zástupcem monorailů volím systém Innovia Monorail 300 od Bombardieru, k vidění na obrázku 55. Innovia Monorail 300 je dle mého názoru, který potvrzují technická data, nejnovějším a nejmodernějším monorail systémem. Jedná se o sedlový monorail, který je plně autonomní. V současné době se tyto nové systémy vyskytují v São Paulu a Saudské Arábii. [93] Visutou dráhu jako dalšího zástupce do porovnání zařazovat nebudu z jednoduchého důvodu. Použití visuté dráhy by v ČR připadalo jen na centra měst, kde by ulehčilo silniční a tramvajové dopravě. A jsem si téměř stoprocentně jistý, že hlučnost, a především nevzhlednost celého systému, by se staly nepřekonatelnými překážkami k jeho realizaci. Jako zástupce lehkých tramvají volím Translohr, který je v současné době jediným vyráběným zástupcem. Konkrétním zvoleným typem je čtyřčlávková verze STE4.

Do srovnání zvolím pouze jediného zástupce konvenčních systémů, a to tramvaj, která je dle mého názoru jediným možným konkurentem z řady městských kolejových vozidel. Metro do srovnání záměrně nezařazuji, protože dle mého názoru tento systém nelze srovnávat s žádným nekonvenčním systémem městské dopravy. Někdo by sice mohl namítat, že by mělo být zařazeno, když jsou monoraily označovány jako lehké metro. V mém názoru nezařadit, mě utvrzuje několik důvodů. Prvním z nich je délka tratí metra, jak bylo uvedeno celková délka tratí monorail systémů ve světě je 260 km, celková délka tratí například moskevského metra je více než 300 km, takže jeden případ použití metra, převyšuje světové použití monorailů. Druhým důvodem, proč není metro zařazeno je rozdílná vzdálenost stanic. Třetím a zároveň posledním důvodem je umístění tratí, metro se pohybuje téměř výhradně pod zemí, nebo alespoň v uzavřených tunelech, takže hlučnost od provozu, který ve špičce dosahuje jízdních intervalů pouhé 2 minuty, je stále minimální. I když se Innovia Monorail 300 pohybuje po gumových pneumatikách, jsem si jistý, že by hlučnost od provozu, při jízdním intervalu každé dvě minuty byla vyšší.

Tramvaj, kterou jsem zvolil je domácí Škoda 15T, se kterou se obyvatelé Prahy setkávají už téměř 10 let. Jedná se o tříčlávkovou nízkopodlažní tramvaj vyráběnou v Plzni. Každé kolo tramvaje je poháněno vlastním elektromotorem, takže celkem má tramvaj motorů 16. Do současné doby bylo vyrobeno celkem 238 těchto tramvají. [92]



Obrázek 79: Škoda 15T v Praze [1]

### 3.3.1 Tabulka technických údajů

V technické tabulce jsou uvedeny základní technické parametry městských systémů. Údaje obsažené v tabulce jsou dohledatelné ve zdrojích, které byly použity při vytváření rešerše.

TECHNICKÉ ÚDAJE	Innovia Monorail 300	Translohr STE4	ŠKODA 15T
Princip pohonu	kontakt kolo-kolejnice	kontakt kolo-kolejnice	kontakt kolo-kolejnice
Motor	elektrický motor s permanentními magnety	3 elektrické synchronní motory	16 elektrických synchronních motorů
Výkon [kW]	neznámé	neznámé	720
Napájecí soustava [V]	750 DC	600 DC	600 DC
Počet hnaných náprav	8	3	8
Nejvyšší rychlost [km/h]	80	70	60
Maximální stoupání [%]	6	13	10
Způsob napájení	napájecí kolejnice	trolejové vedení	trolejové vedení
Jednosměrné/obousměrné	obousměrné	obousměrné	jednosměrné
Počet článků	4	4	3
Délka [mm]	50 110	32 000	31 400
Šířka [mm]	3 147	2 220	2 460
Výška skříně [mm]	neznámé	3 050	3 600
Výška podlahy [mm]	450	250	340
Podíl nízkopodlažní plochy [%]	100	100	100
Počet dveří na jedné straně	8	4	6
Min. poloměr oblouku [m]	46	10,5	20
Hmotnost prázdného vozidla [tuny]	56	28	42
Míst (stání + sezení), (4 os./m <sup>2</sup> )	356	170	180
Vnější hlučnost [dB]	76	69	82
Cena 1 km trati [miliard Kč]	1,8–2,5	375–500	500–700
Cena 1 vozidla [milionů Kč]	neznámé	57,4	65

Z tabulky technických údajů jasné vyplývá, že si jsou konvenční a nekonvenční městské systémy ve většině parametrů podobné. Z toho důvodu nemá smysl porovnávat dojezdové časy, nebo dokonce sestavovat dráhové tachogramy. Sestavení dráhových tachogramů by navíc ani nebylo příliš objektivní vzhledem k tomu, že nelze jednoznačně určit průměrnou vzdálenost mezi jednotlivými zastávkami v českých městech. Dalším problémem by bylo v městském provozu nevhodné použití idealizovaného konstantního zrychlení, zejména pak u systémů Translohr a tramvaje. Zrychlení v městském provozu je ovlivněno tolika faktory, že ani nemá smysl ho uvádět mezi technickými parametry. Faktory, které ovlivňují zrychlení jsou například, hustota okolního provozu, čekání na dobíhající pasažéry, nečekané překážky na trati, jestli jede vůz napřed nebo má zpoždění atd.



Největší rozdíly mezi jednotlivými systémy přicházejí při pohledu na náklady, zejména pak náklady na výstavbu, kterými nelichotivě vyniká Innova Monorail 300 od Bombardieru. Více než pětinasobný rozdíl v ceně, v porovnání s Translohrem, se ale může snížit na polovinu nebo na ještě méně, kdybych uvažoval i investice do údržby tratí, které budou u lehkých tramvajů pravděpodobně vyšší. Bohužel tyto údaje nelze nijak dohledat.

### 3.3.2 Zhodnocení

Nekonvenční systémy mají podobné parametry jako zvolený konvenční systém Škoda 15T, takže podle technických údajů se nedá jednoznačně určit, který systém by byl lepší a který horší. Pokud se podívám na městskou dopravu v České Republice obecně, zejména pak v Praze, jsem toho názoru, že je na velmi dobré úrovni a prostor pro zlepšení není velký.

Innova Monorail 300 a další monoraily se v dnešní době používají ve velkých rychle rostoucích městech, aby ulevily dopravě v přelidněných centrech, kde by vzhledem k úzkým nebo přeplněným ulicím nebylo možné použít tramvajové systémy. Dalším důvodem použití monorail systémů jsou bezpochybně nižší náklady a rychlejší výstavba v porovnání s metrem. To mě přivádí k otázce, jestli se vůbec v ČR nachází město, které by nutně potřebovalo tento nekonvenční systém. Monoraily v hromadné dopravě se používají ve městech, která mají počet obyvatel ve statisících., což značně snižuje počet měst, která by mohla tento systém v ČR využít. Osobně si myslím, že v úvahu připadají jen města Praha, Brno a Ostrava. V pražské městské dopravě se můžeme setkat s metrem, tramvajemi, autobusy, lanovkou, a případně i železnicí. Dle mého názoru přítomnost metra vylučuje použití monorailu, a to ani neuvažuji naprostou estetickou nevhodnost tohoto systému v historickém centru Prahy. V Brně a Ostravě se shodně můžeme setkat s tramvajemi, autobusy a trolejbusy, což je poměrně velký rozsah systémů a nejsem si jistý, jestli by se investice do monorailu, v pravděpodobně desítkách miliard, jakémukoliv z těchto měst vyplatila.

Systém Translohr mi osobně připadá jako vhodnější, z posuzovaných nekonvenčních systémů, pro použití v ČR. Velkou výhodou tohoto systému vidím v možnosti provozu na baterie, takže v historických centrech měst není nutné vést nevzhledné trolejové vedení. Další výhodou je vynikající obratnost vozidla, která by určitě našla využití v centrech českých měst. Konvenční systémy často nabírají zpoždění z důvodu neohleduplných řidičů, kteří parkují tak, že se konvenční systém zkrátka nedokáže vejít do omezeného prostoru. Translohr by pravděpodobně přinesl i vyšší bezpečnost pro nepozorné chodce, díky lepší adhezi a kratší brzdné dráze, než mají konvenční tramvaje. Všechny výše uvedené výhody, ale nejsou dle mého názoru dostatečné na to, aby česká města využívající tramvaje začala předělávat tratě pro tento nekonvenční systém. Translohr má navíc poměrně zásadní nevýhodu, kterou je pouze jediný výrobce NTL, což znamená, že kdyby došlo ke krachu a výroba vozidel by skočila, tratě by neměly další využití.

Závěr srovnání je takový, že nekonvenční městské systémy jsou rovnocennou alternativou k tramvajím, v některých aspektech je dokonce překonávají, v jiných zase ztrácejí. K použití

nekonvenčních městských systémů většinou předchází speciální požadavek na přepravu, ať už to je nadzemní provoz, nebo překonání velkého stoupání, či provoz v úzkých ulicích měst. Protože se žádný z nekonvenčních systému neprojevil, jako vyloženě nevhodný, nelze říci že by v ČR neměl být. Spíše bych jejich případnou realizaci v ČR označil jako nepotřebnou vzhledem k dobré úrovni městské přepravy, jaká zde je.

## 4 ZÁVĚR

Bakalářskou práci *Nekonvenční kolejové systémy* jsem začal řešit těchto systémů, které jsem podle přepravní rychlosti, kterou jsem v úvodu zvolil jako základní technický parametr, rozdělil na vysokorychlostní a městské nekonvenční systémy.

Po rozdělení systémů jsem se vrátil k řešení, na základě, které jsem představil zvlášť systémy vysokorychlostní a zvlášť systémy městské. Představení jednotlivých nekonvenčních systému jsem udělal pomocí podkapitol. První podkapitolou byl vždy Vývoj a historie, v této části jsem se snažil zmapovat vývoj daného nekonvenčního systému od prvních nápadů do dnešní podoby. Druhou podkapitolou byl Princip pohonu a technologie. Tato část se zabývala popisem technických vlastností nekonvenčních kolejových vozidel, jejich tratí a zdůrazněním rozdílů oproti systémům konvenčním. Třetí podkapitolou bylo Využití ve světě, jehož cílem bylo zmapovat konkrétní systémy v ostrém provozu, uvést kde je možné se s nimi setkat, případně uvést proč dostal nekonvenční systém přednost před systémem konvenčním. Poslední čtvrtou podkapitolou byla Ekonomika, kde jsem rozebral ekonomickou stránku jednotlivých systémů, a bylo-li to možné, tak pro představu, uvedl ceny systémů konvenčních.

Na konci jsem nekonvenční systémy porovnal se systémy konvenčními. V případě vysokorychlostních systémů jsem zvolil dva konvenční zástupce TGV Duplex a Siemens Railjet. Systémy jsem porovnával na základě idealizovaných dráhových tachogramů, nákladů a měrných veličin, které jsem si zvolil. Výsledky porovnání potvrdily mé předpoklady a dokázaly, že v České Republice, by použití nekonvenčních vysokorychlostních systémů Maglev a Hyperloop, nemělo opodstatnění. Ke stejnému závěru jsem došel i ve srovnání systémů městské dopravy, kde jsem nekonvenční systémy monorail a Translohr porovnal s tramvají Škoda 15T. Jediným rozdílem bylo, že systémy by vzhledem k jejich technickým parametrům mohly být bez problému použity v ČR, ale úroveň městské přepravy jaká tu je, to nevyžaduje.

## 5 SEZNAMY

### 5.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Typický nekonvenční systém – monorail, Malajsie [49].....	7
Obrázek 2: Typický konvenční systém – lokomotiva Emil Zátpek, Slovensko [1].....	7
Obrázek 3: Emile Bachelet a jeho prototyp levitujícího vozu [3] .....	9
Obrázek 4: Maglev v Birminghamu roku 1984 [2] .....	9
Obrázek 5: Rozdíl mezi točivým a lineárním motorem [10] .....	10
Obrázek 6: Fyzikální princip lineárního motoru [12] .....	11
Obrázek 7: Kolej maglevu [13].....	11
Obrázek 8: Rozložení výkonu napájecích stanic v závislosti na profilu trati [14] .....	12
Obrázek 9: Princip systému EMS [21] .....	12
Obrázek 10: Rozmístění magnetů v systému EMS [15].....	13
Obrázek 11: Rozmístění magnetů v systému EDS [15] .....	13
Obrázek 12: Maglev na testovací trati v Yamanashi [20] .....	13
Obrázek 13: Magvel v Čchang-ča, Čína [28] .....	14
Obrázek 14: Depo pro vozy Linimo, Japonsko [21].....	15
Obrázek 15: Maglev na letišti v Inčchonu, JK [25] .....	15
Obrázek 16: Maglev v Šanghaji [7] .....	15
Obrázek 17: Ukazatel rychlosti ve vlaku [7].....	15
Obrázek 18: Kapsle Hyporloopu [35] .....	16
Obrázek 19: Pneumatická dráha v Londýně [31].....	17
Obrázek 20: Článek z časopisu Scientific American zobrazující schéma systému.....	17
Obrázek 21: Hyperloop Alpha [29] .....	18
Obrázek 22: Testovací trať Hyperloop One, Nevada [36].....	18
Obrázek 23: Schéma kapsle [29].....	19
Obrázek 24: Proudění vzduchu v tubusu (kapsle jede doleva) [38] .....	20
Obrázek 25: Vizualizace systému Hyperloop v San Franciscu [35].....	23
Obrázek 26: Vizualizace trati v SAE [40] .....	24
Obrázek 27: Testovací trať Hyperloop One v Nevadě [36].....	25

Obrázek 28: TGV Duplex [45].....	27
Obrázek 29: Siemens Railjet ČD [47] .....	27
Obrázek 30: Typický monorail – Sydney [49].....	35
Obrázek 31: Visutá dráha – Tokio [51] .....	35
Obrázek 32: Palmerův monorail [53].....	36
Obrázek 33: LeRoyův parní monorail [54] .....	36
Obrázek 34: Řez parním monorailem [54].....	36
Obrázek 35: Historický vůz visuté dráhy ve Wuppertalu [55] .....	37
Obrázek 36: Gyroskopicky vyvažovaný monorail [49].....	37
Obrázek 37: Test gyroskopicky vyvažovaného monorailu [57] .....	37
Obrázek 38: Propagační plakát k tzv. kolejovému letadlu [58] .....	38
Obrázek 39: Alweg monorail 1957 [59] .....	39
Obrázek 40: Monorail v Disneylandu [60] .....	39
Obrázek 41: Trať monorailu v městské zástavbě [63] .....	39
Obrázek 42: Segmentová výhybka [61] .....	40
Obrázek 43: Otočná výhybka [62].....	40
Obrázek 44: Řez vozidlem monorailu [64].....	41
Obrázek 45: Detail konstrukce podvozku a kolejnice tvaru I [50].....	41
Obrázek 46: Moderní brzdový systém [68] .....	42
Obrázek 47: Moderní brzdový systém [68] .....	42
Obrázek 48: Zavěšení vozidla ve Wuppertalu [69] .....	42
Obrázek 49: Detail zavěšení (starší vozidlo než na obr. 48) [70] .....	42
Obrázek 50: Systém zavěšení SAFEGE, modernizované verze používány v Tokiu [50] .....	43
Obrázek 51: Visutá dráha v tokijské zoo Ueno [71].....	43
Obrázek 52: Las Vegas [72] .....	44
Obrázek 53: Seattle [73] .....	44
Obrázek 54: Dubaj [74] .....	44
Obrázek 55: São Paulo [63].....	44
Obrázek 56: Velkokapacitní monorail, Tokio [75] .....	45
Obrázek 57: Visutá dráha, Tokio [76] .....	45



Obrázek 58: Autonomní visutá dráha, letiště Düsseldorf [50] .....	45
Obrázek 59: Akumulátorová visutá dráha, Čína [77] .....	45
Obrázek 60: Šestičlánkový Translohr v Paříži [81] .....	46
Obrázek 61: První realizovaný Translohr, Clermont Ferrand [81] .....	47
Obrázek 62: Bombardier v Caen [85] .....	48
Obrázek 63: Bombardier v Nancy pohybující se mimo vodící kolejnici [85] .....	48
Obrázek 64: Kostra vozidla Translohr [87] .....	49
Obrázek 65: Translohr – vyráběné délky [81] .....	49
Obrázek 66: Lehká tramvaj v Nancy [85] .....	49
Obrázek 67: Tříčlánkový trolejbus [85] .....	49
Obrázek 68: Schéma přichycení ke kolejnici, Translohr [80] .....	50
Obrázek 69: Detail vodícího systému, Translohr [81] .....	50
Obrázek 70: Schéma přichycení vozidla ke kolejnici, Bombardier [80] .....	50
Obrázek 71: Trať pro lehké tramvaje [81] .....	51
Obrázek 72: Clermont Ferrand [86] .....	52
Obrázek 73: Padova, Prato Della Valle [86] .....	52
Obrázek 74: Benátky [86] .....	52
Obrázek 75: Pohled do kabiny, Paříž [86] .....	52
Obrázek 76: Tchien-ťin [86] .....	52
Obrázek 77: Šanghaj [86] .....	52
Obrázek 78: Medellín [86] .....	53
Obrázek 79: Škoda 15T v Praze [1] .....	54

## 5.2 Seznam grafů

Graf 1: Dráhový tachogram Hyperloop s dosažením maximální rychlosti .....	21
Graf 2: Dráhový tachogram systému maglev .....	30
Graf 3: Dráhový tachogram systému Hyperloop .....	31
Graf 4: Dráhový tachogram jednotky TGV Duplex .....	31
Graf 5: Dráhový tachogram soupravy Railjet .....	32
Graf 6: Srovnání dojezdových časů jednotlivých systémů .....	32

### 5.3 Seznam použité literatury

- [1] *Škoda* [online]. Plzeň [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/>
- [2] Maglev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev>
- [3] *Emile Bachelet* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.maglevboard.net/en/facts/inventors/119-emile-bachelet>
- [4] *Nasa takes up idea pioneered by Briton* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/uk/1999/oct/11/timradford>
- [5] Transrapid 05. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: [https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid\\_05](https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid_05)
- [6] Lathen train collision. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lathen\\_train\\_collision](https://en.wikipedia.org/wiki/Lathen_train_collision)
- [7] Shanghai Maglev Train. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Shanghai\\_Maglev\\_Train](https://en.wikipedia.org/wiki/Shanghai_Maglev_Train)
- [8] Magnetic river. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_river](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_river)
- [9] *Šanghajský vlak Maglev* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.svazdopravy.cz/html/cz/maglev.html>
- [10] VUES Brno. *Lineární motory* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupný na www: [http://www.vues.cz/file/424/CZ\\_LIN-OBECNE\\_020909.PDF](http://www.vues.cz/file/424/CZ_LIN-OBECNE_020909.PDF)
- [11] TU Liberec. *Lineární pohony* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupný na www: [https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni\\_materialy/.../linear\\_motor.pps](https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/.../linear_motor.pps)
- [12] *Lineární motory* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/806>
- [13] *Maglev Trains* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/maglev-train.htm>
- [14] Maglev monorails. *Monorails Australia* [online]. 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.monorailsaustralia.com.au/maglev.html>
- [15] *Maglev Suspension Systems* [online]. [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://emt18.blogspot.cz/2008/10/maglev-suspension-systems.html>

- [16] *Supravodivé magnety* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://z-moravec.net/chemie/supravodice/supravodive-magnety/>
- [17] Land\_speed\_record\_for\_rail\_vehicles. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Land\\_speed\\_record\\_for\\_rail\\_vehicles](https://en.wikipedia.org/wiki/Land_speed_record_for_rail_vehicles)
- [18] *Yamanashi Perfectural Maglev Exhibition Center* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://linear-museum.pref.yamanashi.jp/english/index.html>
- [19] Chūō Shinkansen. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ch%C5%AB%C5%8D\\_Shinkansen](https://en.wikipedia.org/wiki/Ch%C5%AB%C5%8D_Shinkansen)
- [20] *Maglev Train Sets Record* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://northeastmaglev.com/news/wall-street-journal-maglev-train-sets-record>
- [21] *Linimo* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.linimo.jp/en/about/>
- [22] Linimo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Linimo>
- [23] Incheon Airport Maglev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Incheon\\_Airport\\_Maglev](https://en.wikipedia.org/wiki/Incheon_Airport_Maglev)
- [24] INCHEON AIRPORT MAGLEV LINE. *Incheon Airport* [online]. Incheon, 2016 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: [http://www.airport.kr/pa/ko/file/maglevLine\\_leaflet\\_en.pdf](http://www.airport.kr/pa/ko/file/maglevLine_leaflet_en.pdf)
- [25] File:Incheon Airport Maglev 1-04.jpg. *Wikimedia Commons* [online]. 2016 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Incheon\\_Airport\\_Maglev\\_1-04.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Incheon_Airport_Maglev_1-04.jpg)
- [26] *Shanghai Maglev Transportation Development* [online]. Shanghai, 2017 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: <http://www.smtdc.com/en/index.html>
- [27] *China's maglev* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.railprofessional.com/magazine/june-2016/chinas-maglev-a-bright-future><http://www.linimo.jp/en/about/>
- [28] *Changsha Maglev Express* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: [http://english.gov.cn/news/photos/2016/08/12/content\\_281475415089184.htm](http://english.gov.cn/news/photos/2016/08/12/content_281475415089184.htm)
- [29] Hyperloop Alpha. *SpaceX* [online]. Los Angeles: SpaceX, 2013 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)
- [30] *SpaceX* [online]. Los Angeles, 2013 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.spacex.com/about>

- [31] Crystal Palace pneumatic railway. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Crystal\\_Palace\\_pneumatic\\_railway](https://en.wikipedia.org/wiki/Crystal_Palace_pneumatic_railway)
- [32] Beach Pneumatic Transit. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Beach\\_Pneumatic\\_Transit](https://en.wikipedia.org/wiki/Beach_Pneumatic_Transit)
- [33] *Beach Pneumatic Transit* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: [http://www.nycsubway.org/wiki/Beach\\_Pneumatic\\_Transit](http://www.nycsubway.org/wiki/Beach_Pneumatic_Transit)
- [34] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-inovace/hyperloop-otevira-nove-metody-transferu-technologie\\_40084.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-inovace/hyperloop-otevira-nove-metody-transferu-technologie_40084.html)
- [35] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://hyperloop.global/>
- [36] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://hyperloop-one.com/>
- [37] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://hyperloop.global/capsule-first/>
- [38] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/6371-Hyperloop/>
- [39] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://hyperloop.global/abu-dhabi-department-municipal-affairs-transport-signs-agreement-hyperloop-transportation-technologies-study-develop-high-speed-transportation-abu-dhabi-al-ain/>
- [40] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.thenational.ae/uae/abu-dhabi-to-dubai-in-12-minutes-worlds-first-hyperloop-coming-to-uae>
- [41] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://hyperloop.global/bratislava-slovakia/>
- [42] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://hyperloop.global/brno-czech-republic/>
- [43] *Hyperloop* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://hyperloop-one.com/hyperloop-one-reveals-first-images-nevada-desert-development-site-devloop-middle-east-rail>
- [44] Railjet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Railjet>
- [45] Vlaky ve Francii v roce 2010. *Foto doprava* [online]. 2010 [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: [http://www.fotodoprava.com/vlaky\\_francie\\_foto3.htm](http://www.fotodoprava.com/vlaky_francie_foto3.htm)

- [46] Viaggio Comfort pro České dráhy. *Siemens* [online]. 2017 [cit. 2017-06-18]. Dostupné z: [http://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/railjet/Pages/viaggio\\_comfort\\_cd.aspx](http://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/railjet/Pages/viaggio_comfort_cd.aspx)
- [47] ČD railjet [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/5301-CD-railjet-svezl-prvni-cestujici/>
- [48] Vysokorychlostní železnice v ČR [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.vysokorychlostni-zeleznice.cz/vysokorychlostni-zeleznice-v-cr/>
- [49] Monorail. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-1]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Monorail>
- [50] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.monorails.org/index.html>
- [51] Když se nad velkoměsty tiše vznáší bezobslužné monoraily. *TECHNICKÝPORTÁL.cz* [online]. Praha: Business Media CZ, 2017 [cit. 2017-07-01]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/prumysl/kdyz-se-nad-velkomesty-tise-vznasi-bezobsluzne-monoraily\\_39678.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/prumysl/kdyz-se-nad-velkomesty-tise-vznasi-bezobsluzne-monoraily_39678.html)
- [52] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <https://tokyorailwaylabyrinth.blogspot.cz/2011/10/the-longest-suspension-monorail-in-world.html>
- [53] Monorail history. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Monorail\\_history](https://en.wikipedia.org/wiki/Monorail_history)
- [54] Centennial Monorail. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Centennial\\_Monorail](https://en.wikipedia.org/wiki/Centennial_Monorail)
- [55] Wuppertal Suspension Railway. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wuppertal\\_Suspension\\_Railway](https://en.wikipedia.org/wiki/Wuppertal_Suspension_Railway)
- [56] Suspension *monorail* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www.wuppertal.de/microsite/en/tourism/schwebebahn/102370100000140310.php>
- [57] *Louis Brennan's Gyro-car* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://blog.sciencemuseum.org.uk/louis-brennans-gyro-car/>
- [58] Bennie Railplane. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bennie\\_Railplane](https://en.wikipedia.org/wiki/Bennie_Railplane)



- [59] *The ALWEG-Bahn* [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.disneyhistoryinstitute.com/2014/01/the-alweg-bahn.html>
- [60] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://discuss.micechat.com/blogs/samland/7380805->
- [61] Monorail Track switch. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KL\\_Monorail\\_Track\\_switch.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KL_Monorail_Track_switch.jpg)
- [62] *Monorail rotary track switch* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=DISmny7UoZk>
- [63] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/transportation-systems/automated-monorails.html>
- [64] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.howitworksdaily.com/how-monorails-work/>
- [65] Napájecí kolejnice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Nap%C3%A1jec%C3%AD\\_kolejnice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Nap%C3%A1jec%C3%AD_kolejnice)
- [66] *Tramvaje APS* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/175.php>
- [67] Electric motor / Linear motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_motor#Linear\\_motor](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor#Linear_motor)
- [68] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [http://www.knorrbremse.com/media/documents/railvehicles/product\\_broschures/rail\\_systems/Monorails\\_P\\_1268\\_EN.pdf](http://www.knorrbremse.com/media/documents/railvehicles/product_broschures/rail_systems/Monorails_P_1268_EN.pdf)
- [69] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [http://www.skf.com/binary/21-273582/full/2016-05\\_SKF\\_AB\\_Wuppertaler+Schwebebahn\\_Bild+8b%C2%A9WSW-th\\_small.jpg](http://www.skf.com/binary/21-273582/full/2016-05_SKF_AB_Wuppertaler+Schwebebahn_Bild+8b%C2%A9WSW-th_small.jpg)
- [70] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.iguadix.es/content/wuppertal-schwebebahn>
- [71] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://muza-chan.net/japan/index.php/blog/first-zoo-monorail-in-the-world>
- [72] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://in.pinterest.com/startreatment/vegas/>

- [73] *Seattle Monorail* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.seattlemonorail.com/about/>
- [74] *Monorail Systems* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [http://www.hitachi-rail.com/products/rolling\\_stock/monorail/index.html](http://www.hitachi-rail.com/products/rolling_stock/monorail/index.html)
- [75] *Monorail* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: [http://www.hitachi-rail.com/pdf/tokyo\\_monorail.pdf](http://www.hitachi-rail.com/pdf/tokyo_monorail.pdf)
- [76] *Reddit - Tokyo uspension monorail* [online]. 2017 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: [www.reddit.com](http://www.reddit.com)
- [77] *Panda-shaped 'Sky Train' Rolls into Operation in Chengdu* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://www.shanghaidaily.com/viral/cute/Pandashaped-Sky-Train-Rolls-into-Operation-in-Chengdu/shdaily.shtml>
- [78] *Monorail Construction Costs. Pedestrian Observations* [online]. 2013 [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <https://pedestrianobservations.com/2013/08/24/monorail-construction-costs/>
- [79] *Translohr-tramway on tyres. Alstom* [online]. Saint-Ouen, 2017 [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/trains/products/translohr-tramway-on-tyres/>
- [80] *Rubber tyred trams*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-07-01]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rubber-tyred\\_trams](https://en.wikipedia.org/wiki/Rubber-tyred_trams)
- [81] *Translohr. NTL* [online]. France, 2017 [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: <http://www.newtl.com/en/translohr/>
- [82] *Lehká tramvaj Translohr* [online]. Praha, 1999 [cit. 2017-07-8]. Dostupné z: [http://edice.cd.cz/edice/IZD/izd2000/izd11\\_00/transloh.pdf](http://edice.cd.cz/edice/IZD/izd2000/izd11_00/transloh.pdf)
- [83] *Technické údaje vozidla. Lepší doprava v Praze* [online]. Praha, 2010 [cit. 2017-07-8]. Dostupné z: <http://strategieprojekty.dpp.cz/vozy/tramvaje/technicke-udaje-vozidla>
- [84] *Městský autobus SOR NB 12 CITY. SOR* [online]. Libchavy, 2017 [cit. 2017-07-8]. Dostupné z: <http://www.sor.cz/site/mestsky-autobus-sor-nb-12-city>
- [85] *Tramvaj na pneumatikách v nesnázích. Dopravní web: Vidíme i to, co jiní nevidí* [online]. Praha, 2011 [cit. 2017-07-8]. Dostupné z: <http://dopravni.net/mhd/12194/tramvaj-na-pneumatikach-v-nesnazich/#more-12194>
- [86] *Cities. NTL* [online]. France, 2017 [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: <http://www.newtl.com/en/#cities>

- [87] Translohr - Tramway. *La Nouvelle Génération de Transports* [online]. 2012 [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <http://newgentransp.e-monsite.com/pages/transports-ferroviaires/translohr-tramway.html>
- [88] Translohr tramway arrives in Clermont-Ferrand. *European Metropolitan Transport Authorities* [online]. 2006 [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: <http://www.emta.com/spip.php?article314&lang=en>
- [89] Do Libuše pojedou sto tramvají denně. Na novém úseku zastaví čtyřikrát. *Idnes* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: [http://praha.idnes.cz/stavba-tramvajove-trate-modrany-libus-dh5-/praha-zpravy.aspx?c=A160616\\_131639\\_praha-zpravy\\_mav](http://praha.idnes.cz/stavba-tramvajove-trate-modrany-libus-dh5-/praha-zpravy.aspx?c=A160616_131639_praha-zpravy_mav)
- [90] Němci postavili tramvajové koleje za desetinu, co Praha. *Aktuálně* [online]. Praha: Economia, 2012 [cit. 2017-07-10]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/domaci/nemci-postavili-tramvajove-koleje-za-desetinu-co-praha/r~i:article:740603/?redirected=1499625827>
- [91] A (linka metra v Praze). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/A\\_\(linka\\_metra\\_v\\_Praze\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/A_(linka_metra_v_Praze))
- [92] Škoda 15T. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-07-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda\\_15T](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_15T)
- [93] INNOVIA Monorail 300 Technology. *The Monorails society* [online]. [cit. 2017-07-10]. Dostupné z: <http://www.monorails.org/pdfs/INNOVIA%20300.pdf>