



**FAKULTA  
ŠTROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**

**Studie proveditelnosti autonomního  
tramvajového vozidla s dvounápravovým  
pojezdem**

**Feasibility study of a 2-axle autonomous  
tramcar**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2020**

**Bc. Matěj DYNBYL**

**Studijní program:** DOPRAVNÍ, LETADLOVÁ A TRANSPORTNÍ TECHNIKA

**Studijní obor:** KOLEJOVÁ VOZIDLA

**Vedoucí práce:** ING. TOMÁŠ HEPTNER

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dynybyl** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **457676**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Studie proveditelnosti autonomního tramvajového vozidla s dvounápravovým vozidlem**

Název diplomové práce anglicky:

**Feasibility study of a 2-axle autonomous tramcar**

Pokyny pro vypracování:

1. Vypracujte rešerše k tématům
  - a) tramvaje s bezpodvozkovými (dvounápravovými) vozidly
  - b) infrastruktura tramvajové sítě na území Prahy se zaměřením na vztah dvojkolí-kolej.
2. Popište režim, v jakém bude autonomní tramvajové vozidlo provozováno. Provedte rozbor funkčních požadavků souvisejících s jeho provozem v síti pouliční dráhy a navrhnete možnosti jejich řešení.
3. Navrhněte uspořádání dvounápravového vozidla pro autonomní provoz a jeho pojezdu tak, aby bylo kompatibilní s infrastrukturou tramvajového systému v Praze.
4. Sestavte zjednodušený model vozidla pro základní výpočtové simulace MBS (SIMPACK) jízdy vozidla v koleji.
5. Provedte úvodní výpočtové simulace průjezdu vozidla určenými úseky koleje a interpretejte jejich výsledky.

Seznam doporučené literatury:

Periodikum Stadtverkehr  
firemní literatura ŠKODA TRANSPORTATION

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Tomáš Heptner, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.07.2020**

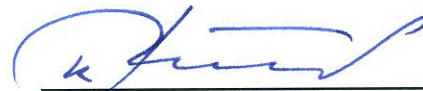
Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_



Ing. Tomáš Heptner  
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Studie proveditelnosti autonomního tramvajového vozidla s dvounápravovým pojezdem“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Tomáše Heptnera s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použitých zdrojů.

**V Praze dne 14. 7. 2020**

**Bc. Matěj Dinybyl**

Děkuji za odborné vedení Ing. Tomáše Heptnera při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantům Ing. Janu Kalivodovi Ph.D., a to především při práci s MBS programem SIMPACK a prof. Ing. Jaroslavu Novákovi CSc., za rady v oblasti návrhu trakčních akumulátorových baterií. Dále bych chtěl poděkovat oddělení vývoje a výzkumu společnosti ŠKODA TRANSPORTATION a.s. za možnost rozpracovat ideu segmentové tramvaje. V neposlední řadě děkuji za podporu své rodině.

## ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Bc. Matěj DYNYBL		
Název BP:	Studie proveditelnosti autonomního tramvajového vozidla s dvounápravovým pojezdem		
Anglický název:	Feasibility study of a 2-axle autonomous tramcar		
Rok:	2020		
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství		
Obor studia:	2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika		
Ústav:			
Vedoucí DP:	Ing. Tomáš Heptner		
Bibliografické údaje:	počet stran	115	
	počet obrázků	155	
	počet tabulek	138	
	počet příloh	3	
Klíčová slova:	autonomní tramvaj, dvounápravový pojezd, dynamická doprava v MHD, ŠKODA TRANSPORTATION a.s.		
Keywords:	autonomous tramcar, 2-axle running gear, dynamic transport in public transport, SKODA TRANSPORTATION a.s.		

### Anotace:

Tato diplomová práce je studií proveditelnosti autonomní tramvaje s jednonápravovými podvozky určené k provozu v režimu dynamické dopravy po stávající tramvajové infrastruktuře v Praze.

Práce řeší základní koncepci vozidla, provedení pojezdu, napájení vozidla a jízdní vlastnosti vozidla.

### Abstract:

This diploma thesis is a feasibility study of an autonomous tram with single-axle bogies intended for operation in the mode of dynamic transport on the existing tram infrastructure in Prague.

The work addresses the basic concept of the vehicle, the design of the vehicle, power supply of the vehicle and running characteristics of the vehicle.

## OBSAH

Anotační list .....	4
Obsah.....	5
ÚVOD .....	2
REŠERŠE .....	3
1. Přehled vozidel související s DP .....	3
1.1. Tramvaj typu „Ringhoffer“ .....	4
1.2. Tramvaj T2000 BXL.....	5
1.3. Tramvaj SWIMO.....	6
1.4. Tramvaj „ULF“ .....	7
1.5. Tramvaj „Lenkdreiachser“ .....	8
1.6. Tramvaj „Cobra“ .....	9
1.7. Brémská tramvaj.....	10
1.8. Další konstrukce jednonápravových tramvajových podvozků .....	11
1.8.1. 1n podvozek společnosti DUEWAG .....	11
1.8.2. 1n podvozek společnosti BREDA .....	11
2. Koncepty tramvají budoucnosti .....	12
2.1. Vozidla s technickým popisem .....	12
2.1.1. Aachener Rail Shuttle (ARS).....	12
2.1.2. Very Light Rail Vehicle - University of Warwick.....	13
2.2. Designerské koncepční studie autonomních tramvají.....	14
2.2.1. URBI – Tomáš Chludil .....	14
2.2.2. Designy dalších autonomních tramvají.....	15
2.2.3. Práce studentu v rámci projektu DESIGN + .....	15
2.3. Aptis Alstom - elektrobus .....	16
2.4. Vývoj autonomních vozidel kolejové veřejné městské dopravy .....	17
3. Alternativní napájecí systémy v městské tramvajové infrastruktuře.....	18
3.1. Napájení z napájecího pásu APS .....	18
3.2. PRIMOVE indukční napájení .....	19
3.3. Akumulátorové baterie a Superkapacitory (Superkondenzátory).....	19
3.4. Kombinace napájecího pruhu a akumulátorových baterií .....	19
4. Tramvajová kolejová infrastruktura v Praze.....	21
4.1. Obecný přehled .....	21
4.2. Referenční traťový úsek .....	22
4.3. Traťový úsek pro návrh trakčních baterií.....	23
TEORETICKÁ ČÁST .....	24
5. Dynamická doprava.....	24
5.1. Autonomní sdílená a koordinovaná mobilita v Praze - automobily .....	24
5.2. Dynamická doprava v MHD .....	27
5.2.1. Segmentová tramvaj .....	27
5.2.2. Souprava – virtuálně spřažené segmenty .....	28
5.3. Distribuovaná síť záložních segmentů .....	29
5.4. Segregace autonomních vozidel .....	29

<b>6. Autonomní provoz.....</b>	<b>30</b>
6.1. Řízení segmentu .....	31
6.2. Senzory Segmentové tramvaje .....	32
6.2.1. Senzory pro řízení autonomní vozidla .....	32
6.2.2. Senzory pro aktivní natáčení podvozků .....	33
6.3. Umístění čidel pro řízení vozidla .....	33
6.3.1. Souhrn požadavků a nových příležitostí autonomních vozidel.....	34
<b>7. Přímý pohon kol a dvojkolí .....</b>	<b>35</b>
7.1. Konstrukce sestavy pohonu:.....	35
7.2. Typ motoru:.....	36
7.2.1. PMSM s vnitřní rotorem .....	36
7.2.2. PMSM s vnějším rotorem .....	36
<b>8. Základní požadavky na jednotlivé části vozidla .....</b>	<b>37</b>
8.1. Dílčí konstrukční sestavy .....	37
8.1.1. Dveře okna .....	37
8.1.2. Sedadla .....	37
8.1.3. Prostory pro pohybově omezené .....	37
8.1.4. Obrazovky, displeje .....	39
8.2. Bezpečnostní a zdravotní pohled na koncept vozidla.....	39
8.2.1. Vnější nebezpečí .....	39
8.2.2. Vnitřní nebezpečí .....	40
8.3. Propojení článků .....	40
8.4. Virtuální spřáhlo .....	41
<b>9. SWOT analýza .....</b>	<b>42</b>
<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>43</b>
<b>10. Rozměrové omezení vozidla .....</b>	<b>44</b>
10.1. Úhel natočení dvojkolí vůči spodku vozidla .....	44
10.2. natáčení podvozků.....	45
10.3. Rozměrové ověření dle ČSN 28 0318.....	46
<b>11. Uspořádání vozidla .....</b>	<b>50</b>
11.1. Typový výkres .....	50
11.2. Varianty uspořádání vozidla .....	51
11.2.1. Varianta 1 .....	51
11.2.2. Varianta 2 .....	52
11.2.3. Varianta 3 .....	53
11.2.4. Varianta 4 .....	53
11.2.5. Varianta 5 .....	54
11.2.6. Varianta 6 .....	54
11.2.7. Varianta 7 .....	55
<b>12. Hmotnostní bilance.....</b>	<b>56</b>
12.1. Nápravové zatížení .....	58
<b>13. Dílčí sestavy vozidla .....</b>	<b>61</b>
13.1. Hrubá stavba vozidla.....	61

13.2.	Elektrická výzbroj.....	63
13.2.1.	Pohon .....	64
13.2.2.	Akumulátorové baterie .....	65
14.	Podvozek.....	66
14.1.1.	Přenos podélných a příčných sil .....	67
14.1.2.	Princip natáčení podvozků:.....	68
14.1.3.	Natáčení podvozků při průjezdu obloukem .....	69
14.1.4.	Princip řízení servoaktuátoru .....	69
14.1.5.	Návrh servoaktuátoru: .....	69
14.1.6.	Uložení servoaktuátoru .....	71
14.1.7.	Technické řešení pro snížení velikosti potřebné síly v servoaktuátoru .....	71
14.1.8.	Potřebný výsuv servoaktuátoru .....	71
14.1.9.	Zjednodušený výpočetní model pro návrh reakční tyče: .....	72
14.1.10.	Vertikální oblouk .....	75
14.1.11.	Mechanická brzda - kotoučová.....	76
14.1.12.	Kolejnicová brzda .....	76
14.1.13.	Závěr z návrhu varianty 1.....	77
14.2.	Varianta 2.....	77
14.3.	Vizualizace uspořádání pojezdu .....	78
15.	Návrh vypružení.....	79
15.1.	Svislé vypružení .....	79
15.1.1.	Frekvence souběžných a protiběžných kmitů svislého vypružení.....	79
15.1.2.	Primární vypružení .....	80
15.1.3.	Návrh sekundárního vypružení .....	81
15.2.	Příčné a podélné tuhosti vypružení.....	83
15.3.	Výpočet vlastních frekvencí svislého vypružení celé soustavy.....	83
16.	Senzory pro aktivní natáčení podvozků.....	84
16.1.	Senzory pro aktivní natáčení podvozků.....	84
16.1.1.	Mechanický senzor polohy .....	84
16.1.2.	Optický senzor polohy .....	85
16.1.3.	Ultrazvukový senzor .....	85
16.1.4.	Virtuální mapa tratě .....	85
17.	Trakce vozidla.....	86
17.1.	Jízdní vlastnosti vozidla .....	86
17.1.1.	Odpory působící na vozidlo.....	88
17.1.1.1.	Jízdní odpory .....	88
17.1.1.2.	Odpor ze sklonu .....	89
17.1.1.3.	Odpor oblouku na žlábkové kolejnici.....	89
17.2.	Energetická bilance vozidla .....	89
17.3.	Trakční charakteristika.....	90
17.4.	Brzdová charakteristika.....	90
17.5.	Tachogram.....	91
17.5.1.	Varianta 1 .....	91



17.5.1.1.	Potřebná energie pro zvolený úsek .....	93
17.5.1.2.	Baterie .....	94
17.5.2.	Varianta 2 .....	95
17.5.2.1.	Baterie .....	95
17.5.2.2.	Volba článku.....	96
18.	Vozidlo a kolej .....	98
18.1.	Popis výpočetního modelu .....	98
18.1.1.	Struktura modelu .....	98
18.1.2.	Parametry modelu .....	99
18.1.3.	Funkce řízení servoaktuatoru při průjezdu obloukem .....	100
18.1.4.	Funkce výsuvu v závislosti na čase .....	101
18.1.5.	Porovnání skokového a lineárního výsuvu servoaktuátoru .....	101
18.1.6.	Algoritmus výsuvu v programu .....	102
18.1.7.	Kontakt kolo – kolejnice .....	102
18.1.8.	Porovnání s dvounápravovou tramvají typu Ringhoffer .....	103
18.2.	Simulace jízdních vlastností vozidla .....	104
18.2.1.	Jízda obloukem o poloměru R=20 m.....	104
18.2.2.	Bezpečnost proti vykolejení YQ. ....	105
	Popis reálné trati pro simulace v programu SIMPACK.....	108
18.3.	.....	108
	závěr .....	109
	Přílohy:.....	Chyba! Záložka není definována.

Základní idea Segmentové autonomní tramvaje (SAT) ve dvounápravovém provedení je duševním vlastnictvím společnosti ŠKODA TRANSPORTATION a.s. Předmětem předložené DP je rozpracování vybraných technických aspektů této ideje.



*vizualizace Segmentové autonomní tramvaje [autor DP]*



*vizualizace Segmentové autonomní tramvaje [autor DP]*

Vizualizace byly vytvořeny pro představu možného vzhledu Segmentové autonomní tramvaje.

## ÚVOD

Cílem této diplomové práce je vytvořit studii proveditelnosti vozidla, které by mělo být univerzálnější a jednodušší než tramvaje, jež v současnosti výrobci tramvají nabízejí. Tramvaje provozované v dnešní době představují poměrně těžké a drahé stroje. Vize je taková, že tramvaj by se již neskládala z propojených článků, které jsou bez propojení pro přepravu osob nefunkční, ale z jednotlivých článků - segmentů<sup>1</sup>, které jsou schopné jezdit nezávisle na ostatních segmentech. Každý tento segment je tedy zvlášť řízen prostřednictvím umělé inteligence nikoliv řidiče. Články mezi sebou komunikují a předávají si informace. Rozpojují se a spojují dle potřeby přepravy.

Vozidlo je určeno pro tramvajovou síť v Praze. Pojezd vozidla se skládá ze dvou jednonápravových podvozků s nezávisle otočnými koly poháněnými synchronními motory s permanentními magnety. Vozidlo je napájeno z baterií. Baterie se nabíjí po ujetí traťového úseku a vyčerpání energie, v zastávkách vybavených nabíjecím pásem umístěným v kolejničovém pásu.

Hlavní předpokládané přednosti vozidla jsou shrnuty v následujících bodech:

- jednoduchost konstrukčních sestav – jeden typ segmentu tzn. téměř všechny konstrukční podsestavy u všech vozidel stejné např: bočnice, spodek, střecha, kabeláž atd.
- lehkost – jednonápravové podvozky, optimalizovaná hmotnost prázdného vozidla/hmotnost obsazeného vozidla, optimální nápravové zatížení
- komunikace s okolím a celým provozem města – Dynamická doprava města, propojení se smart zařízeními, komunikace s okolím
- lepší jízdní vlastnosti oproti dnešním tramvajím – aktivní natáčení podvozků při průjezdu obloukem = nízké opotřebování kolejí
- interoperabilita – vozidlo by vzhledem ke své délce a jízdním vlastnostem mělo být provozu schopné v libovolné kolejové infrastruktuře
- atraktivní jednoduchý design exteriéru a interiéru – konkurenceschopnost automobilům, elektrobusům, snadná údržba, nové příležitosti cestování
- cena – jeden typ platformového vozidla = přiblížení k sériové výrobě, tj. přesun z desítek kusů na stovky, nízké provozní náklady, pouze dvě nápravy, čtyři kola atd.
- ekologičnost – nové technologie, optimalizace spotřeby energie
- Bezpečnost – Hlavním důvodem, proč by měly vznikat autonomní vozidla je bezpečnost. Pokud by autonomní vozidlo bylo méně bezpečné než vozidlo řízené řidičem, tak nemá smysl.

Zadání DP vzniklo ve spolupráci se společností ŠKODA TRANSPORTATION a.s., která poskytla základní informace o "Idei segmentové autonomní tramvaje (SAT) ve dvounápravovém provedení".

---

<sup>1</sup> segmentů – Segmentová tramvaj

Práce je poměrně rozsáhlá a komplikovaná především z důvodu více témat, které popisuje. Pro přehlednost tato témata, přesahující popis zadání diplomové práce, strukturovaně uvádím.

Diplomová práce je zaměřená především na:

- Základní koncepci vozidla – Rozměry, hmotnost, kapacita
- Provedení pojezdu
- Napájení vozidla
- Vybrané základní výpočty související s jízdními vlastnostmi vozidla

Práce je členěna na

- základní rozvahu o koncepci tramvaje (zatím chybí)
- rešerši zaměřenou na
  - na tramvajová vozidla s dvounápravovými pojezdy a s pojezdy s řízením radiální polohy dvojkolí v oblouku
  - designerské koncepty tramvají budoucnosti
  - alternativní způsoby napájení vozidel nevyžadující trolejové vedení v celé trase
- analýzu podmínek a požadavků spojených s provozováním autonomních kolejových vozidel v síti pouliční dráhy
- definici požadavků na autonomní tramvajová vozidla
- popis koncepce a uspořádání navrhovaného vozidla
- podrobnější návrh pojezdu
- trakci a energetickou náročnost vozidla
- model vozidla pro výpočtové simulace - výpočtové simulace jízdy vozidla ve vybraných výpočtových případech

## REŠERŠE

V rešerši se zabývám vozidly a napájecími systémy, které jsou pro Segmentovou tramvaj použitelné a především vhodné.

### 1. Přehled vozidel související s DP

Do rešerše byly vybrány tramvaje, které jsou vhodné pro inspiraci vozidla, který tato DP popisuje. V první části jsou uvedena starší vozidla, která se v dnešní době již nevyrábí. Některé konstrukční principy jsou, velmi zajímavé a použitelné i na moderní tramvaji pro 21. století. Každá tramvaj je stručně popsána včetně základních technických parametrů. Z důvodu nedostatku veřejně dostupných informací nejsou uvedené parametry u všech vozidel ve stejném rozsahu.

Druhá část této kapitoly popisuje nové koncepty vozidel. Jedná se ve všech případech o vozidla, která jsou rozměrově a uspořádáním velmi podobná mému konceptu. Některé z těchto konceptů jsou pouze technicky nepopsanou designerskou studií.

## 1.1. Tramvaj typu „Ringhoffer“

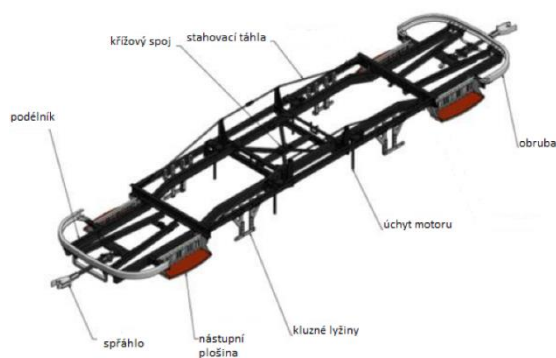
Na konci 19. století se ve mnoha městech začaly vyskytovat první tramvaje. Měly podobné konstrukční provedení, které bylo velmi jednoduché. Jedním takovým exemplářem je Ringhofferova tramvaj, která jezdila a stále jezdí v Praze dodnes. Toto vozidlo zde uvádím, jelikož jej dále v praktické části použiji pro porovnání jízdních vlastností (jízda v oblouku malého poloměru) se Segmentovou tramvají.



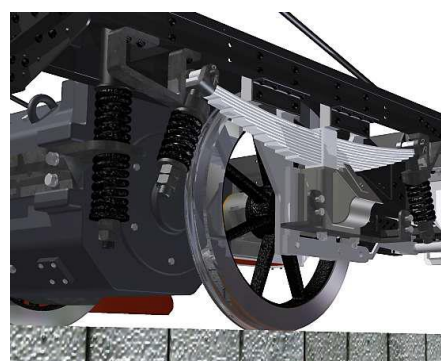
Obrázek 1. Ringhofferova tramvaj. [1]

<b>rok výroby</b>	1930
<b>délka</b>	10 820 mm
<b>šířka</b>	2 130 mm
<b>výška</b>	3 305 mm
<b>Rozvor</b>	3 100 mm
<b>rozchod</b>	1 435 mm
<b>průměr kol</b>	860 mm (780 mm)
<b>hmotnost</b>	12 000 kg
<b>trakční motor</b>	45 kW (později až 60 kW)
<b>napětí v troleji</b>	600 V DC
<b>vypružení</b>	4 listové pružiny ocelových 16 ocelové vinuté
<b>Brzda</b>	<i>EDB, mechanická špalíková,</i> tlapové trakční motory jednostupňová převodovka, kluzná ložiska

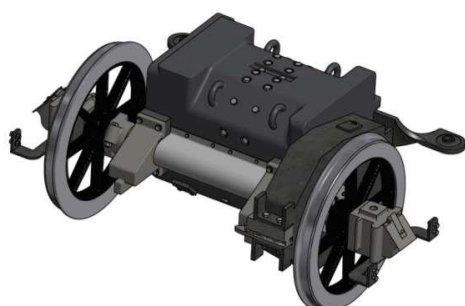
Tabulka 1. Technické parametry R. tramvaje.[1], [2]



Obrázek 2. Popis rámu R. tramvaje. [2]



Obrázek 3. Pohled na vypružení a pruž. uchycení motoru. [2]



Obrázek 4. Tlapově uložený motor. [2]



Obrázek 5. Kolejnicová brzda. [2]

## 1.2. Tramvaj T2000 BXL

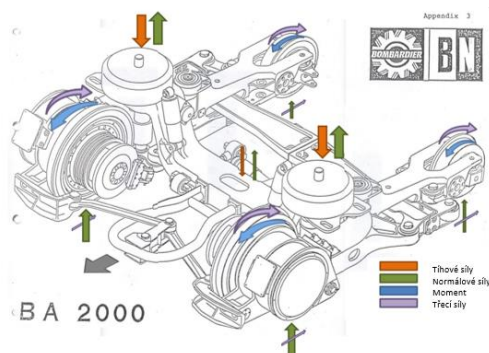
Tramvaj byla vyrobena pobočkou společnosti Bombardier v německém Mannheimu mezi roky 1993 až 1995 pro belgické hlavní město Brusel a jeho dopravní podnik v počtu 51 kusů. Firma Bombardier Inc. dodala mechanickou část. Na elektrické části spolupracovala firma GEC-Alstom. Tramvaj je konstruována jako tříčlánková obousměrná se sběračem proudu umístěným na střeše krátkého prostředního článku. Každý článek má jeden hnací podvozek, přičemž krajní podvozky jsou hnané pouze jednou nápravou. Druhá náprava prvního a třetího podvozku, blíže prostřednímu článku, je běžná, s menším průměrem kol, plní funkci rejdivání podvozku. Zatížení těchto kol je přibližně 2/3 (větší kola) a 1/3 (menší kola) tíhy na podvozek. Brzdové kotouče a třmeny kotoučové brzdy jsou umístěny zevnitř podvozků vždy u hnaných kol. Asynchronní trakční motor je na podvozcích umístěn jako nábojový neodpružený. Na podvozku je dále dvoustupňová planetová převodovka. Trakční motory jsou chlazeny kapalinou. Jsou uloženy do rámu podvozku tak, že vytváří kyvné rameno. [3]

<b>Bombardier T.</b>	
<b>Místo výroby</b>	Mannheim, Germany
<b>Provoz</b>	1993- do dneška
<b>Počet kusů</b>	51
<b>Kapacita</b>	149
<b>Délka</b>	22,80 m
<b>Šířka</b>	2,3 m
<b>Výška</b>	3,4 m
<b>Dveře</b>	8 (4 na jedné straně)
<b>Počet kloubů</b>	2
<b>Maximální rychlost</b>	70 km/h
<b>Hmotnost</b>	35,70 t
<b>Napájení</b>	750 V DC
<b>Podvozky</b>	3
<b>Rozchod</b>	1,435 mm

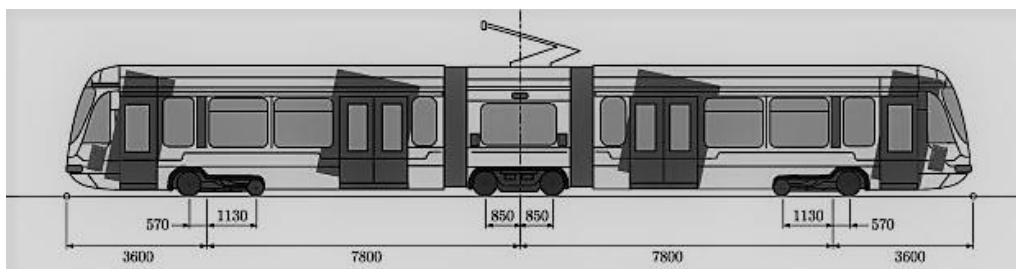
Tabulka 2. Technické parametry tramvaje T2000.[3]



Obrázek 6. Tramvaj T2000 v Bruselu. [3]



Obrázek 7. Podvozek BXL 2000. [4]



Obrázek 8. Základní rozměry tramvaje T2000. [4]

Pro tuto DP je vozidlo zajímavé především svými podvozky, které by mohly být jednoduše použité pro Segmentovou tramvaj. Nesplňují všem požadavek zadání - jednonápravový podvozek.

### 1.3. Tramvaj SWIMO

Swimo je nízkopodlažní tramvaj společnosti Kawasaki Heavy Industry, jejíž prototyp jezdil v roce 2010 ve městě Sapporo na ostrově Hokkaido v Japonsku. Počet vyrobených kusů není známý. Tramvaj se skládá ze tří článků. Tramvaj je koncipovaná stejně jako předešlá tramvaj T2000 pro Brusel. Je obousměrná se sběračem proudu umístěným na střeše krátkého prostředního článku. Každý článek má jeden hnací podvozek, přičemž krajní podvozky jsou hnané pouze jednou nápravou. Druhá náprava prvního a třetího podvozku, blíže prostřednímu článku, je běžná, s menším průměrem kola a slouží k rejdování podvozku. Pod prostředním článkem je neotočný podvozek. [4]

<b>Napájení</b>	<b>600V DC</b>
<b>Rozchod</b>	<b>1067 mm</b>
<b>Délka</b>	<b>15000 mm</b>
<b>Šířka</b>	<b>2230 mm</b>
<b>výška</b>	<b>3780 mm</b>
<b>Výška podlahy</b>	<b>360 mm</b>
<b>Šířka uličky</b>	<b>800 mm</b>
<b>Max rychlost</b>	<b>70 km/h</b>
<b>Pohon</b>	<b>3f 50kW</b>
<b>Materiál skříně</b>	<b>ocel</b>

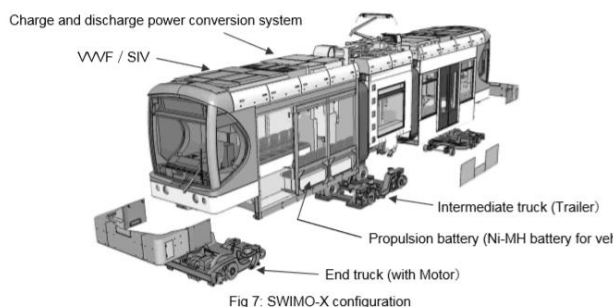
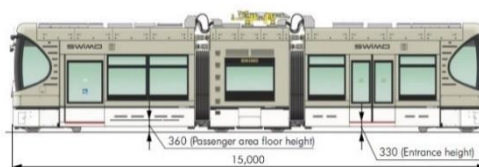
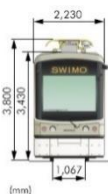
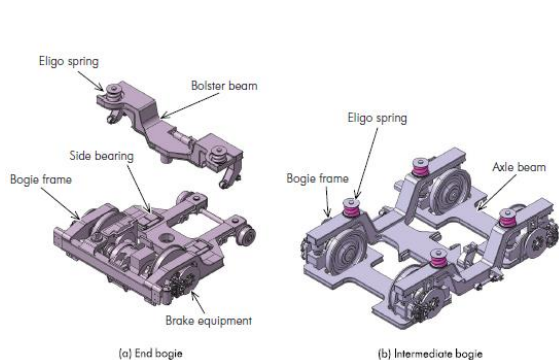


Fig 7: SWIMO-X configuration

Obrázek 9. Tramvaj SWIMO. [5]

Tabulka 3. Technické parametry tramvaje SWIMO. [4]



Obrázek 10. Boční pohled na tramvaj SWIMO. [5]

Obrázek 11. Podvozky tramvaje SWIMO. [5]

Krajní podvozky jsou velmi podobné podvozkům, které jsou pod skříní tramvaje T2000 v Bruselu. Lze však konstatovat, že jsou konstrukčně jednodušší. Tato tramvaj tedy opět poskytuje inspiraci kvůli svým podvozkům.

*Pozn. Společnost Kawasaki Heavy Industry se zabývá výrobou především vysokorychlostních a příměstských jednotek. Tramvaje (resp. LRV – light rail vehicle) jsou spíše okrajový produkt.*



## 1.4. Tramvaj „ULF“

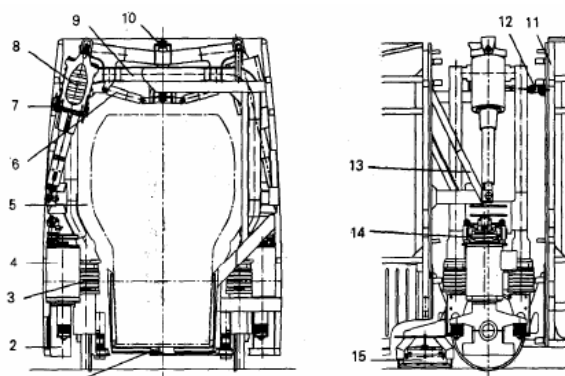
Tramvaj ULF (tj. Ultra Low Floor) byla vyráběna společností Siemens AG ve Vídni v letech 1995 až 2015. Tyto soupravy byly určeny pro dopravní podnik města Vídně – Wiener Linien, v počtu 330 kusů. Není to však jediné město, kde se tyto tramvaje užívají. Série 10 kusů byla vyrobena pro rumunského města Oradea. Tato tramvaj má velmi zajímavé řešení pojezdů, které jsou v místě mezičlánkových spojení a mezi „koncovým“ a „kabinovým“ modulem krajních článků. Trakční elektromotory jsou umístěny ve vertikální poloze a přes hypoidní převodovku a kloubový hřídel pohání jednotlivá kola. Na rám podvozku jsou zachycené skříňě jednotlivých článků. Vypružení je konstruováno pomocí šroubových pružin a hydropneumatického tlumiče. [5]

Motorizace	<b>75%</b>
Uspořádání pojezdu	1'+A'+A'+A'
Rozchod	1 435 mm
Délka vozidla	24 210 mm
Šířka vozidla	2 400 mm
Výška vozidla	3.615 mm
Maximální zatížení na nápravu	<12 t
Kapacita (4 os. / m <sup>2</sup> )	136
Maximální rychlost	70 km / h
Zrychlení	1,3 m / s <sup>2</sup>
Zpomalení	1,8 m / s <sup>2</sup>
Napájení	600 V DC
Výkon pohonu	6 x 52 kW
Průměr kola	690 / 610 mm
Nízkopodlažnost	100%
Výška vstupu	197 mm

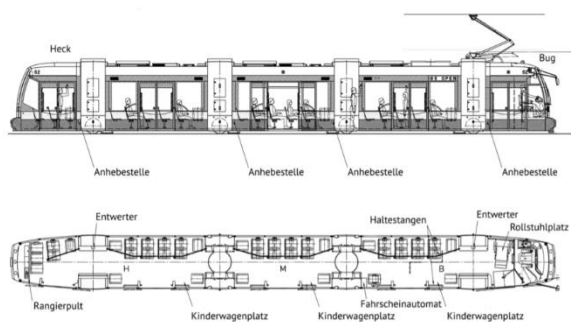
Tabulka 4. Technické parametry tramvaje ULF [5],[6]



Obrázek 13. Tramvaj „ULF“. [6]



Obrázek 12. Podvozek ULF. [7]



Obrázek 14. Boční pohled na tramvaj "ULF". [6]

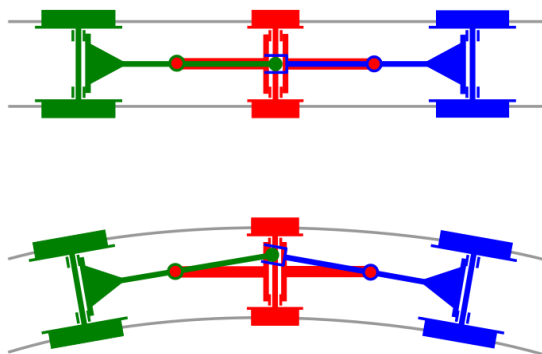
Zajímavostí tramvaje je bezpochyby především pojezd, který je v řezu a pohledu zobrazen na obr. 20.

Tramvaj jezdí také v uspořádání 1'+A'+A'+A'+A'+1' (ULF B). Svými jízdními vlastnostmi je shodná. Liší se pouze délkou (34 470 mm) a tedy i kapacitou (207 osob). [5]

Tramvaj ULF je uvedena v této DP, protože se jedná o vozidlo jezdící v městské infrastruktuře s jednonápravovými podvozky, což je v dnešní době spíše ojedinělé.

## 1.5. Tramvaj „Lenkdreiachser“

Vozidla s tímto uspořádáním pojezdu byla používána ve více městech Evropy (Mnichov, Augsburg, Vídeň, Bukurešť, Curych, Bonn atd.) v letech 1930-1960 a některých exemplářích až do přelomu tisíciletí. Tramvaje byly vyráběny firmou MAN. Pro technický popis vozidla v této kapitole využiji tramvaj ze série M s číselným označením 3445 jezdící v Mnichově. [7]



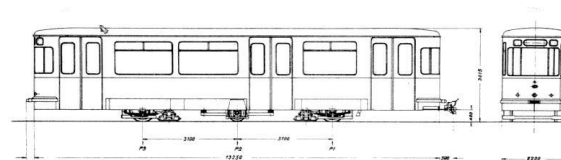
Obrázek 15 Pojezdu tramvaje v oblouku.[8]



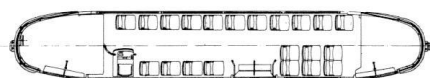
Obrázek 16. Pojezd tramvaje L. [8]

<b>Délka</b>	<b>13,25</b>
<b>Šířka</b>	2,2 m
<b>Výška</b>	3,1 m
<b>Hmotnost</b>	21 t
<b>Kapacita</b>	28 /83

Tabulka 5. Technické parametry tramvaje Lendreichachser. [7]



Obrázek 17. Typový výkres tramvaje L. [9]



Pojezd se skládá ze dvou poháněných dvojkolí, jež mají běžný průměr kol a jsou uložena do otočných podvozků, které jsou připevněny do rámu tramvaje. Tyto jednonápravové podvozky jsou umístěny na krajích vozidla. Na Obr. 15 je vidíme zeleně a modře. Uprostřed vozu je dvojkolí s menším průměrem kol, zobrazené červeně. Toto dvojkolí plní primárně funkci vedení vozidla v koleji. Není poháněno a je minimálně zatížené. Rozložení zatížení je přibližně takto: 130 kN - 30 kN - 130 kN. Pojezd je tedy uspořádán A'1'A'. Trakční podvozky jsou na ojích, které jsou kloubově spojeny uprostřed vozidla, tedy nad prostředním dvojkolím. To zaručuje, že se podvozky vždy natáčejí pod stejným úhlem.[8]

Vozidlo bylo většinou provozováno ještě s vlečným vozem, který měl stejné uspořádání pojezdu, avšak nebyl trakční. Tedy 1'1'1.

Nevýhodou vozidla byla vysoká nápravová zatížení, která činila až 130 kN a vysoké procento nevypružených hmot.[7]

Toto vozidlo zde uvádím kvůli svému pojezdu, který je pro dvounápravové vozidlo inspirativní.

## 1.6. Tramvaj „Cobra“

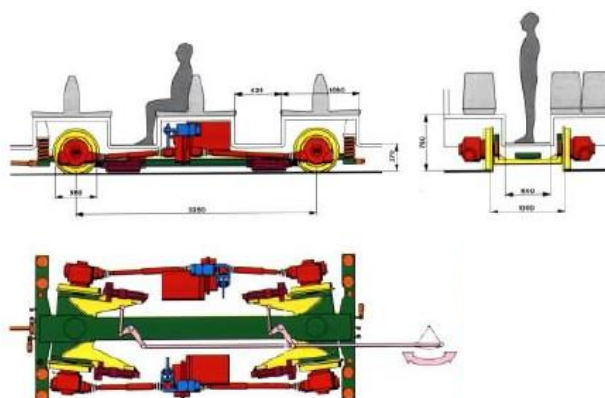
Vývoj tramvaje Cobra začal již roku 1996. Tehdy vznikla smlouva na dodávku 17-ti tramvají mezi konsorciem ABB Daimler Benz Transportation - Fiat SIG Rail Vehicles a dopravním podnikem města Zurich. Vývoj byl velmi komplikovaný jak z konstrukčního hlediska, tak i finančního. V roce 2001 však společnost Bombardier Transportation získala společnost ABB Daimler Benz a společnost Fiat SIG Rail V, získala společnost Alstom. Tyto dvě společnosti pak dokázaly společně obnovit konstrukční a výrobní práce a vyrobit zcela funkční vozidlo, a tak dostaly zakázku na dalších 68 vozidel. Tramvaje Cobra jezdí dodnes. [9]

<b>Celková délka</b>	36 m
<b>Šířka</b>	2,4 m
<b>Výška</b>	3,6 m
<b>Hmotnost</b>	39,2 t
<b>Počet sedadel</b>	90
<b>Počet míst k stání</b>	148
<b>Rychlost max</b>	70 km / h
<b>Počet dveří</b>	7
<b>Průměr kola</b>	560 mm (500)
<b>Počet dvojkolí</b>	6
<b>Poháněných kol</b>	10 (z 12)
<b>Počet poháněných ústrojí</b>	3
<b>Počet motor</b>	5
<b>Trakční výkon</b>	125 kW
<b>Výška vstupu</b>	350 mm
<b>Uspořádání pojezdu</b>	A´A´ ½A´ ½A´ A´A´.

Tabulka 6. Technické parametry tramvaje Cobra. [9]



Obrázek 18. Tramvaj Cobra. [1]



Obrázek 19. Natáčení podvozku tramvaje Cobra. [7]

### Zajímavosti této tramvaje:



- Volně otočná kola
- Rejdování kol pomocí mechanismu
- Hypoidní neodpružené převodovky spojené přes rozvodovku a spojovací hřídele
- Velký rozvor

Obrázek 20. Typový výkres tramvaje Cobra. [10]

Abnormálně velký rozvor podvozků tramvajů je možnou inspirací pro tuto práci. Dále pak také mechanismus rejdování dvojkolí.

## 1.7. Brémská tramvaj

Tato tramvaj se skládá ze tří článků. Každý z nich má pod sebou jeden neotočný podvozek. Články jsou mezi sebou svázány v místě natáčení. Dle názvu je zřejmé, že tramvaj jezdila a jezdí v Německém městě Brémy. Jedná se o jednu z prvních 100 % nízkopodlažních tramvají na světě vyráběnou společností MAN GHH.

<b>Uspořádání pohonu</b>	<b>(1Ao)' + (1Ao)' + (1Ao)'</b>
<b>Rozchod</b>	1435 mm
<b>Rozvor</b>	1850 mm
<b>Délka přes spřáhlo</b>	26 500 mm
<b>Šířka skříně</b>	2300 mm
<b>Podíl nízké podlahy</b>	100%
<b>Počet sedadel</b>	67
<b>Maximální počet cestujících</b>	170 (4 os./m <sup>2</sup> )
<b>Hmotnost prázdného vozidla</b>	26,8 t
<b>Výkon trakčních motorů</b>	3x94 kW
<b>Hmotnost podvozku</b>	2,6 t
<b>Maximální rychlost</b>	70 km/h

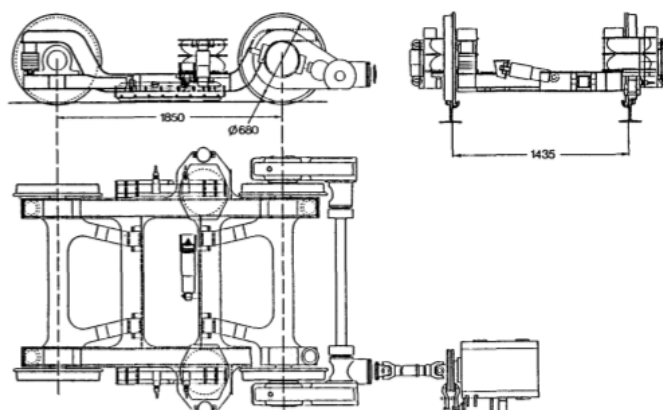


Obrázek 21. Brémská tramvaj. [11]

Tabulka 7. Technické parametry tramvaje. [10]

Zajímavostí této tramvaje je především uspořádání pojezdu, jelikož na jednu skříň připadá pouze jeden podvozek.

Nápravnice jsou zavěšeny na rámu podvozku pomocí dvojité vazby přes gumové pouzdra, což umožňuje určitou boční poddajnost při vjezdu do oblouků.



Obrázek 22. Podvozek Brémské tramvaje. [7]

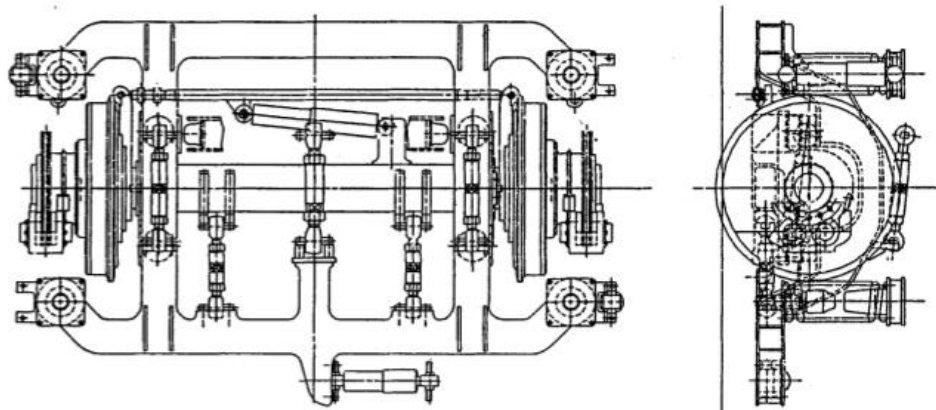
Primární i sekundární vypružení je realizováno přes gumové, kotoučové, pružné bloky.. Výkon je z motoru, který je umístěn mimo podvozek, přenášen na kola přes kloubový hřídel. Kotoučová brzda je umístěna na hřídeli motoru. Horizontální tlumič nárazů tlumí boční pohyb mezi rámem podvozku a skříní. [10]

Na jeden článek připadají pouze dvě dvojkolí. Dále je vozidlo 100 % nízkopodlažní. Proto je tato tramvaj inspirativní pro tuto DP.

## 1.8. Další konstrukce jednonápravových tramvajových podvozků

Dále jsou uvedeny jednonápravové („1n“) podvozky, u kterých nebylo možné z dostupných zdrojů dohledat informace o tom, na jakých vozidlech byly využity.

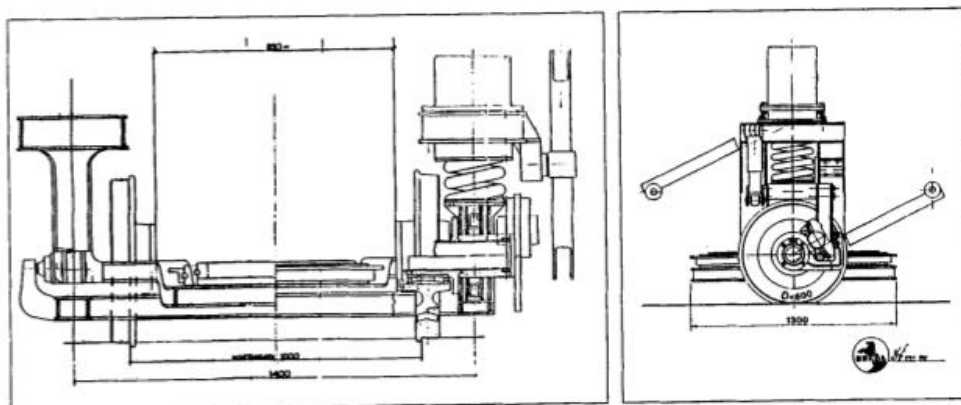
### 1.8.1. 1n podvozek společnosti DUEWAG



Obrázek 23. 1n podvozek Duewag. [12]

Kola jsou uložena do portálové nápravy, která je spojena s rámem přes čtyři gumové pružiny tvořící primární vypružení. Příčné síly přenášejí tři ojnice. Horizontální tlumič mezi rámem podvozku a skříni vozidla tlumí příčný pohyb. Dlouhé ocelové pružiny v sérii s pryžovými pružinami tvoří sekundární (flexicoil) vypružení, rovnoběžně se dvěma hydraulickými tlumiči. Kotoučové brzdy jsou umístěny mimo kola tak, aby se snížil vliv torzních kmitů. Hmotnost podvozku je 1,5 t. [11]

### 1.8.2. 1n podvozek společnosti BREDA



Obrázek 24. 1n podvozek Breda. [12]

Podvozek od společnosti Breda je velmi podobný novějšímu podvozku, který je použit u vysokorychlostních vozidel Talgo. Rovněž připomíná řešení tramvaje ULF (2.1.4.). Tento podvozek nemá primární vypružení. Sekundární vypružení tvoří pružina rovnoběžná s hydraulickými tlumiči nárazů. Kola tohoto podvozku jsou vybavená pryžovými prvky. Hmotnost podvozku je 1,5 t. [11]

## 2. Koncepty tramvají budoucnosti

V této části jsou uvedené koncepty vozidel podobných Segmentové tramvaji.

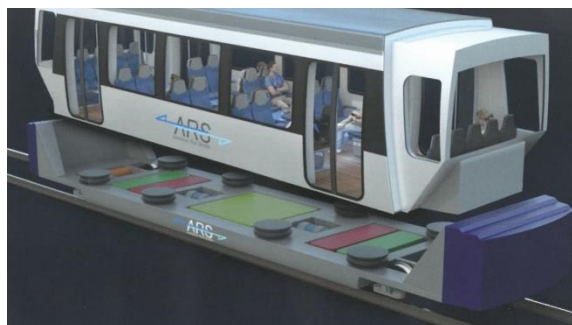
### 2.1. Vozidla s technickým popisem

#### 2.1.1. Aachener Rail Shuttle (ARS)

Aachener Rail Shuttle (ARS) je 12 m dlouhé železniční autonomní vozidlo zaměřené především na regionální popř. městskou dopravu. Vozidlo má dvě nápravy uložené do spodního rámu vozidla. Obě nápravy jsou poháněné motory o výkonech 140 kW. Veškerá výzbroj (kromě klimatizace) je umístěná ve spodku vozidla. Vozidlo je napájeno z baterií, které váží cca 4 t. Maximální rychlost vozidla je 100 km/h. Dojezd vozidla je uváděn 200 km. Vozidlo brzdí elektrodynamicky, ale také prostřednictvím kolejnicové magnetické brzdy, kterou využívají především tramvaje či vozidla s rychlostí nad 160 km/h. Vozidlo je navrženo tak, aby mohlo být modulárně skládáno pro potřebnou přepravu. Hlavní využití vozidla by měla být přeprava cestujících. Nevylučuje se ale ani využití vozidla pro nákladní dopravu. „Kapsle“ pro cestující nebo kontejnery by se teda mohly měnit dle potřeby. Na obrázku 1. jsou fialovou barvou zobrazené deformační prvky, které by v první fázi užívání vozidla byly namontovány. Vozidlo bylo navrženo Prof. Dr. Ing. Christianem Schindlerem, který působí na univerzitě v Cáchách. [12]

<b>Délka</b>	12 m
<b>Výška</b>	3250 mm
<b>Šířka</b>	3000 mm (přibližně)
<b>Max. rychlost</b>	100 km/h
<b>Vstupní výška</b>	600 mm
<b>Rozvor</b>	8 m
<b>Kapacita</b>	90 osob
<b>Hmotnost PV</b>	17 t
<b>Hmotnost cestujících</b>	8 t (88 kg/cestující)
<b>Maximální hmotnost</b>	25 t
<b>Nápravové zatížení</b>	12,5 t/náprava
<b>Trakční výkon</b>	2x 140 kW
<b>Tažná síla</b>	45 kN
<b>Dojezd na baterie</b>	200 km

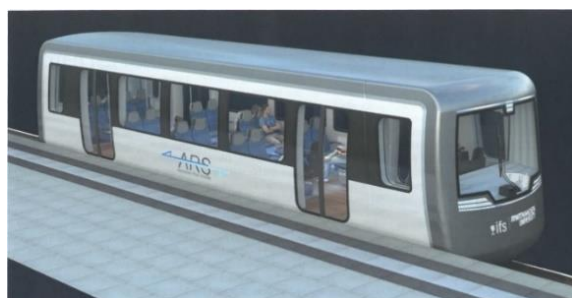
Tabulka 8. Technické parametry vozidla. [12]



Obrázek 25. ARS pro přepravu cestujících. [13]



Obrázek 26. ARS pro přepravu kontejnerů. [13]



Obrázek 27. ARS bez modulárního řešení. [13]

### 2.1.2. Very Light Rail Vehicle - University of Warwick

Projekt VLRV probíhá na univerzitě Warwick ve spolupráci s konsorciem průmyslových partnerů: Revolution VLR, Eversholt Rail, Cummins, RDM Group, Transcal Engineering a WMG. [13] Hlavní impuls pro řešení tohoto projektu vyšel ze strany města Coventry (nedaleko od Birminghamu), které nutně potřebovalo snížit emise městské hromadné dopravy.

Produktem tohoto projektu má být ekologické vozidlo, které bude používáno v městské hromadné dopravě, a to především ve středně velkých městech tj. 300 000 obyvatel. Součástí projektu je vývoj nového napájecího systému.[13]

První prototyp pro testování by měl být postaven již na podzim roku 2020.

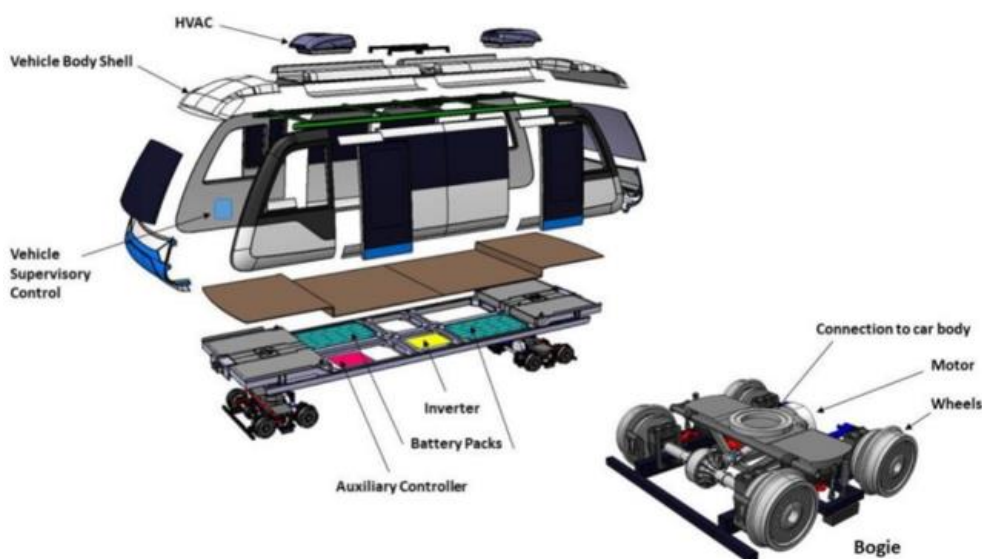
<b>Délka vozidla</b>	11 m
<b>Nápravové zatížení</b>	4 t/náprava
<b>Hmotnost</b>	Max 1 tona/m <sup>3</sup>
<b>Hrubá stavba materiál</b>	Uhlíková vlákna
<b>Kapacita</b>	20 sedících, 30 stojících
<b>Zdroj energie</b>	Baterie
<b>Řízení vozidla</b>	Řidič, později autonomní
<b>Počet dveří</b>	4



Obrázek 28. VLR.[14]

Tabulka 9. Základní technické parametry vozidla. [13]

Raritou tohoto vozidla v porovnání s jinými kolejovými vozidly je užití uhlíkových vláken v hrubé stavbě. Projektanti vozidla uvádí, že jednotlivé díly, ze kterých je vozidlo sestaveno, lze jednoduše vyměnit. Dále uvádí, že vozidlo by mělo být do značné míry recyklovatelné. [14]



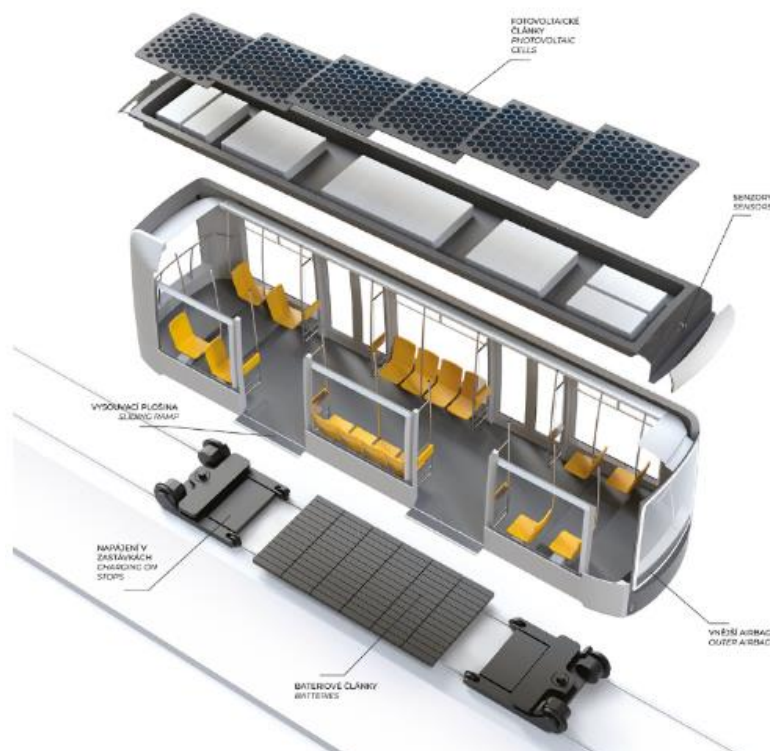
Obrázek 29. Základní popis vozidla VLR.[14]

## 2.2. Designerské koncepční studie autonomních tramvají

Hlavní částí této kapitoly je vozidlo s názvem URBI. Ostatní vozidla jsou zde uvedené pro názornost jiných možných designů moderního městského vozidla.

### 2.2.1. URBI – Tomáš Chludil

Koncept vozidla URBI je diplomová práce absolventa UMPRUMu MgA. Tomáše Chludila. Dle inspirace od pana Ing. Jiřího Vokouna - ŠTRN<sup>2</sup> vytvořil propracovanou designerskou studii vozidla pro městskou hromadnou dopravu v Praze roku 2030. Vizualizace z jeho práce byla dále využita v této DP v kapitole 8, k popisu jednotlivých částí vozidla.



Obrázek 30. Autonomní tramvaj URBI. [15]



Obrázek 31. vizualizace URBI. [15]

*„Sít hromadné dopravy je nezbytnou součástí každého velkého města. Poskytuje jeho obyvatelům dostupný a udržitelný způsob dopravy, který jim pomáhá zkracovat vzdálenosti ve městě. Zejména v metropolích s rychle rostoucí populací bude její úloha v budoucnu nadále stoupat a je nezbytné nabídnout obyvatelům pohodlnou a kvalitní službu, kterou budou chtít využívat.“* [15]

<sup>2</sup> ŠKODA TRANSPORTATION a.s.



### 2.2.2. Designy dalších autonomních tramvají

Podobných studiích lze dohledat více. Tyto studie jsou však technicky nepopsané. V této podkapitole jsou uvedené pouze dva koncepty pro demonstraci nevyhovujícího vnějšího designu a uspořádání vozidla. První koncept na Obrázku 33. nevyhovuje sklonem čela, který je pro případnou srážku s chodcem velmi nebezpečný. Koncept na obrázku 34. je nevyhovující, jelikož disponuje pouze jedinými dveřmi v bočnici. Z hlediska rychlé výměny nastupujících a vystupujících cestujících je toto řešení nevhodné.



Obrázek 32. Autonomní tramvaje - Szymona Skiba [16]



Obrázek 33. Autonomní tramvaj - Tomáš Bláha [17]

### 2.2.3. Práce studentu v rámci projektu DESIGN +



Obrázek 34. Tramvaj 1 z projektu DESIGN+ [18]

Jedná se o vozidla, která byla navrhnutá dle zadání ŠTRN – Ing. Jiří Vokoun studenty ze Západočeské univerzity.



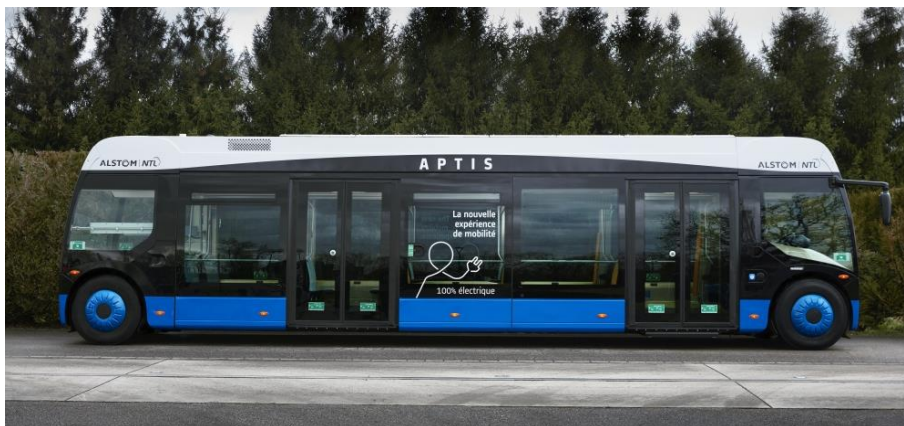
Obrázek 35. Tramvaj 2 z projektu DESIGN+ [18]

Na projektu se podíleli studenti z více fakult: z fakulty zdravotních studií (ergonomie vozidla a bezpečnost), ekonomické fakulty ekonomická proveditelnost a fakulty designu (vzhled). Studenti byli rozdělení do dvou skupin. Viz dvě vizualizace na obrázcích.

### 2.3. Aptis Alstom - elektrobús

Toto vozidlo je zde uvedeno přesto, že se nejedná o kolejové vozidlo a je tak zdánlivě velmi odlišné. Svými rozměry a uspořádáním je totiž velmi podobné Segmentové tramvaji. Některé části tohoto vozidla mohou být inspirativní.

Dne 9. 3. 2017 společnost Alstom ve spolupráci se společností NTL představila v alsaském Duppingheimu vozidlo s názvem Aptis. Jedná se o elektrobús, který je dlouhý 12 m, vysoký 3,1 m a široký 2,55 m. Výška podlahy v nízkopodlažním oddíle činí 330 mm. Maximální rychlost je stanovena na 70 km/h, přičemž výkon vozidlu předávají elektromotory o celkovém výkonu 180 kW. Kapacita má činit až 95 osob. Elektrobús by měl na jedno nabití zvládnout ujet až 200 km. [16]



Obrázek 36. Elektrobús Aptis. [19]

Výrobci uvádí, že při konstrukci vozidla byly využity zkušenosti z výroby tramvají (například ve stavbě vozové skříně, při konstrukci dveří atp.). Do prototypu je umožněn nástup skrze dvoje dvoukřídlé dveře, vozidlo lze ale nabídnout i ve třídvéřovém provedení. Nad přední nápravou se nachází vyvýšené stanoviště řidiče, nad zadní, kde je podlaha rovněž vyvýšená, jsou sedadla uspořádána naproti sobě a je k nim nutné překonat dvojici schůdků. Plocha pro cestující má mít rozlohu  $20m^2$ . [16]



Obrázek 37. Čelní pohled na vozidlo Aptis. [19]



Obrázek 38. Interiér vozidla nad podvozky. [19]

## 2.4. Vývoj autonomních vozidel kolejové veřejné městské dopravy

Vývojem autonomních vozidel se nezabývají pouze automobilové společnosti, ale i společnosti vyrábějící kolejová vozidla. Hlavními průkopníky v tomto odvětví, soudě dle veřejně dostupných informací, jsou společnosti BOMBARDIER [17], SIEMENS [18] a PC Transport Systems (ruská společnost) [19].

V rámci rešerše se mi nepodařilo zjistit konkrétní technické informace ohledně těchto projektů. Je však z dostupných informací zřejmé, že tato vozidla využívají lidar, radar a kamery pro sběr dat. Tyto senzory mají rozmístěné především na čele vozidla. Všechny tyto senzory jsou zabudovány do stávajících vozidel. Vozidlo společnosti SIEMENS je již od roku 2018 testováno v Postupimi. Přesný rok začátku testování vozidla BOMBARDIER se mi nepodařilo zjistit. Testování autonomního provozu na vozidlu od společnosti PC Transport Systems začalo v roce 2019.

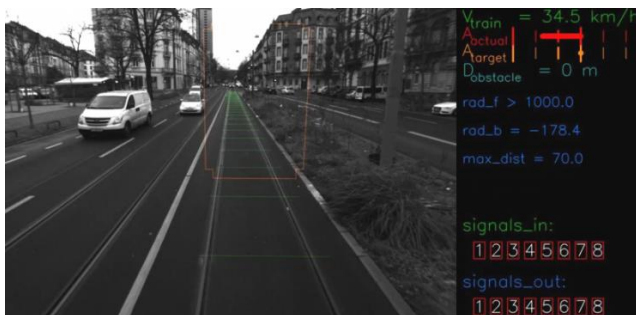
Níže uvedené obrázky (56-61) zobrazují vizualizace vozidel nebo vozidla a jejich řízení v reálném provozu.

### 2.4.1. Bombardier

*Celosvětový výrobce transportní techniky. Pravděpodobně druhý nejvýznamnější společnost v odvětví tramvajových vozidel.*



Obrázek 39. Tramvaj vybavená senzory pro autonomní řízení v reálném provozu. [20]



Obrázek 40. Proces vyhodnocení dat ze senzorů. [20]

### 2.4.2. Siemens

*Celosvětový výrobce kolejových vozidel. V oblasti tramvajů za celosvětovou špičkou poměrně ztrácí.*



Obrázek 41. Tramvaj vybavená senzory pro autonomní řízení v reálném provozu. [21]



Obrázek 42. Vizualizace vyhodnocování dat. [21]

### 2.4.3. PC Transport Systems

Z uvedených se jedná o nejmenší společnost s méně zřejmými plány a budoucností.



Obrázek 43. Tramvaj společnosti vybavená senzory pro autonomní řízení v reálném provozu. [22]



Obrázek 44. Kabina řidiče vybavená lidarem a kamerami. [22]

## 3. Alternativní napájecí systémy v městské tramvajové infrastruktuře

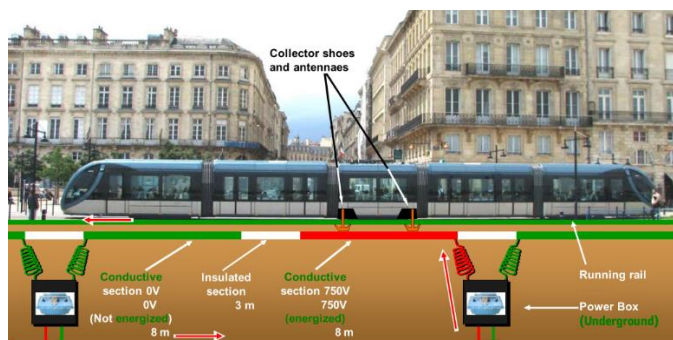
Vozidlo nebude vybaveno konvenčním sběračem na střeše. Je proto potřebné udělat přehled alternativních napájecích systémech, které se již prakticky využívají.

### 3.1. Napájení z napájecího pásu APS

Tuto technologii vyvinula a nabízí společnost Alstom. Tramvaje s tímto druhem napájení jezdí např. ve francouzském městě Tours. Nejedná se o třetí-napájecí kolejnici tak, jak ji známe u metra. Tedy stranou umístěný vodič, ze kterého vozidlo sbírá proud přes tzv. „lízátko“. Napájecí „pruh“ systému APS je umístěn uprostřed kolejnicového pásu, tak aby ji vozidlo zakrývalo.



Obrázek 45. Řez napájecím pruhem. [23]



Obrázek 46. Schéma využití napájení ze třetí koleje. [23]

S ohledem na bezpečnost provozu musí být zajištěno odpojení koleje od elektrické sítě v době, kdy je kolejiště přístupné pro okolí. Bezpečnost je zajištěna rozdělením koleje na více úseků, které jsou řízeny rádiovým signálem a jsou aktivní pouze v případě, že tramvaj zakrývá daný úsek. Projekt APS vznikl v roce 2001-2003, jeho první realizace byla roku 2011. [20]

### 3.2. PRIMOVE indukční napájení

Dalším posunem ve zvýšení bezpečnosti provozu a snížení dopadu na vzhled infrastruktury je provoz na indukční napájení. V současnosti je technologie vyvíjena a testována firmou Bombardier na trati dlouhé 0,8 km ve městě Augsburg. Podobně jako v případě napájení ze třetí koleje, je trať rozdělena do více úseků, které jsou řízeny rádiem a spouštěny pouze při průjezdu tramvaje. I když při indukci úraz elektrickým proudem nehrozí, zamezí se zbytečnému vysílání elektromagnetického vlnění.

Premiéra toho produktu byla roku 2008 na Inno Transu v Berlíně. [21]



Obrázek 47. PRIMOVE. [24]

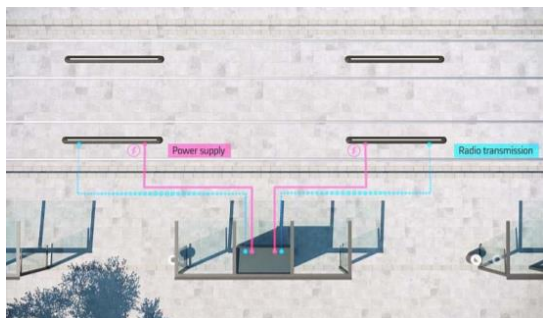
### 3.3. Akumulátorové baterie a Superkapacitory (Superkondenzátory)

V dnešní době jsou již běžně v provozu tramvaje, které jsou schopné ujet úsek trati bez napájení z trolejí. Jedná se ale převážně o krátké úseky tratě. Limitem je kapacita akumulátorových baterií či superkapacitorů, která stále není dostatečná pro trakci tramvaje. Ve svém portfoliu takové tramvaje nabízí téměř každá společnost zabývající se výrobou tramvají včetně společnosti ŠTRN.

Superkapacitor má odlišné vlastnosti (a tedy i využití) než akumulátorová baterie. Obecně je hlavní předností superkapacitoru oproti akumulátorovým bateriím výrazně rychlejší doba nabíjení a delší životnost. Nevýhodou je měrná energie, která je výrazně nižší a nekonstantní (klesající) oblast použitelného výkonu. Další nevýhodou je podstatně rychlejší „samovybíjení“.

### 3.4. Kombinace napájecího pruhu a akumulátorových baterií

Z těchto tří uvedených variant se jeví jako nejvhodnější varianta kombinace těchto dvou technologií. Tuto myšlenku popsala společnost Alstom viz obr. 44-16. Princip tohoto systému spočívá v tom, že tramvaj přijede do zastávky na místo, kde se v zemi nachází napájecí pruh. Z podvozku se vysune vodič, skrz který prochází proud nabíjící baterie. Toto nabíjení trvá pouze po dobu výstupu a nástupu cestujících. Lokalizace tramvaje vůči napájecí koleji je realizována prostřednictvím rádiových vln. Napájecí vodič by se pravděpodobně mohl místo z vozidla, vysunout ze země. Čímž by se snížily náklady na vozidlo a také jeho hmotnost.



Obrázek 48. Infrastruktura pro napájení na zastávce. [25]



Obrázek 49. Detail napájení baterií. [25]



Obrázek 50. Vizualizace napájení baterií během stání tramvaje v zastávce. [25]

### Shrnutí alternativních napájecích systémů v městské tramvajové infrastruktuře

Jedná se o hrubé shrnutí. Reálná data o provozních podmínkách a vlastnostech vozidla nejsou veřejně dostupná. Tento přehled je tedy vytvořen především z informací poskytnutých výrobcí dle zdrojů [20] a [21].

Níže uvedený přehled shrnuje jednotlivé alternativní napájecí systémy a popisuje, kde jsou realizované. Dále popisuje základní náhled na údržbu systému a technické vlastnosti systému.

		Realizace	Údržba	Technické vlastnosti
<b>PRIMOVE</b>	Bombardier	Augsburg	Nízké náklady na údržbu. Vysoké pořizovací náklady	-Rychlost vozidla 80 km, -Použití šifrovaných signálů k řízení toku energie, pouze když vozidlo projíždí. -Vysoce spolehlivé elektronické komponenty -Nízká míra poruchovosti, -vysoké ztráty
<b>APS</b>	Alstom	Bordeaux, Sydney, Dubai, Rio de Janeiro	Vysoké náklady na držbu, vysoké pořizovací náklady.	-Rychlosti 50 km -Ovládání napájení signálem zapnuto / vypnuto DC spínačem, musí být plošně uspořádáno každých 22 metrů -vysoká poruchovost DC vypínače
<b>Baterie, Supercapacitor</b>	Siemens, Alstom a další	Ženeva, Nice, Paris, Rio de Janeiro a další.	Vyměněna superkapacitátoru po skončení jejich životnost	-Rychlé nabíjení -Bezúdržbové -Rychlý vývoj baterií, superkapacitátorů -Nevýhoda zdroj energie je vezen ve vozidle

## 4. Tramvajová kolejová infrastruktura v Praze

Segmentová tramvaj je vozidlo určené pro Prahu. Proto je vhodné nejprve sepsat a ověřit okrajové podmínky infrastruktury, na kterém bude vozidlo provozováno. Tato kapitola vychází z informací a dokumentů, poskytnutých při konzultacích v Dopravním podniku hl. m. Prahy.

### 4.1. Obecný přehled

#### základní informace o síti tramvajové dopravy v Praze

Celková délka trati	142,7 km
Celková délka linek	557,3 km
Maximální sklon	75 ‰
Minimální oblouk	19,976 m
Rozchod koleje	1435 mm
Napájecí systém	600 V
Maximální rychlost	60 km/h <sup>3</sup>
Auomatizované řízení	System EMA <sup>4</sup>

Tabulka 10. Základní parametry tramvajové tratě v Praze.

#### kolejnice

V Praze jsou používány tři hlavní typy kolejnic. Jejich popis a procentuální zastoupení v Praze je uvedeno v tabulce 11:

Typ kolejnice	Poloměr zaoblení [mm] <sup>5</sup>	Četnost [%]
NT1	R10, R6	50
S49E1	R13	15-20
B3	R6	30-35
B1	R10	

Tabulka 11. Zastoupení typů kolejnic v Praze.

Pro tyto typy kolejnic byly provedeny výpočetní simulace v programu MBS Simpack v kapitole 18. V dnešní době jsou blokové kolejnice na ústupu. V infrastruktuře se uplatňují kolejové konstrukce, kde vozidlo je nesené vrcholem okolku. Kolejové konstrukce mají mělké žlábký.

#### Nástupiště

Délka nástupišť	65 m
Šířka nástupišť	2,4 m, ve stísněných poměrech 1,7 m
Výška nástupní hrany	200 mm sdružené zastávky
	340 mm zastávky pro segregované tratě
Šířka vodorovné mezery	70 – 120 mm

<sup>3</sup> Tato rychlost je přípustná na tratích vedených na samostatném tělese.

<sup>4</sup> Více v kapitole 16.1.4

<sup>5</sup> Poloměr zaoblení hlavy kolejnice.

## Tramvajové obřatířtě

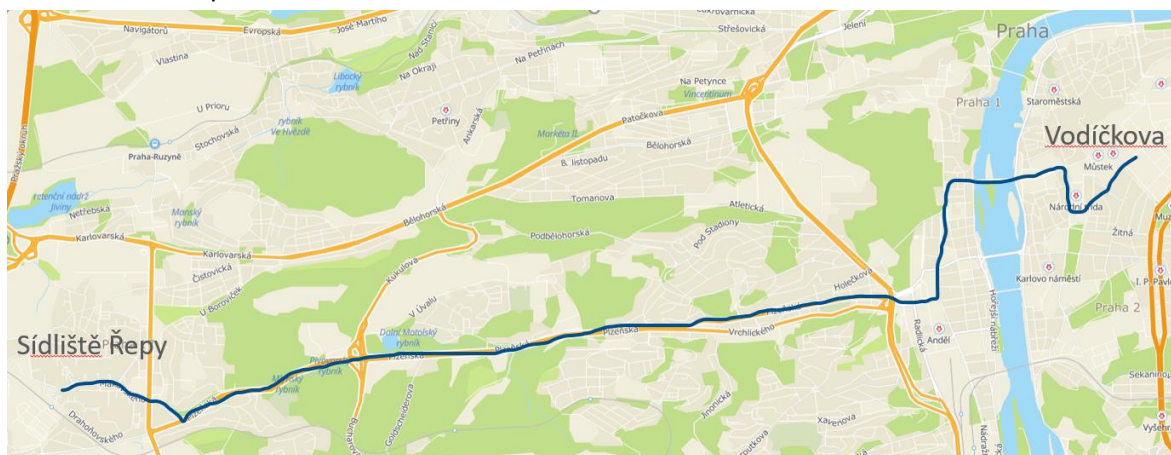
V Praze jsou využívány jednosměrné smyčky. V nevhodnějším pŕípadeř se spojeným nástupiřtěm. Další možné varianty jsou: Jednosměrná pásmová smyčka, Úvratové hlavové obřatířtě, smyčka se sloučenými zastávkami. Nevhodné varianty pak jsou: Obousměrná smyčka s rozděleným nástupiřtěm a úvratový trojúhelník.<sup>6</sup>

## 4.2. Referenční traťový úsek

Popis celé tramvajové sítě by byl značně rozsáhlý proto bylo rozhodnuto, že konkrétnější popis se bude vztahovat pouze na zvolený úsek.

### Mapování traťě

Výkresová dokumentace, poskytnutá Dopravním podnikem hl. m. Prahy pro tramvajové trať detailně popisuje trať, vedoucí od zastávky Vodíčkova až po tramvajovou smyčku v Sídliřtě Řepy. Viz níže uvedená mapa:



Obrázek 51. Mapa zobrazující poskytnuté výkresy tramvajové sítě hl. m. Prahy [26]



Obrázek 52. Detail mapy. Vodíčkova-Újezd. [26]



Obrázek 53. Detail mapy Újezd-Bertramka. [26]

Ukázka poskytnuté výkresové dokumentace je uvedena v příloze 1. Délky kolejí jsou uvedené s přesností na 1 mm.

<sup>6</sup> Více informací z: <https://1url.cz/yz3dN> (str. 126)



## Vyhodnocení poskytnutých výkresů

Z výkresové dokumentace jsem vypsál všechny poloměry oblouků, které se na trati vyskytují. Následovně jsem je rozdělil do intervalů dle poloměru oblouků. K intervalům jsem pak přiřadil četnost, s jakou se na celé poskytnuté trati oblouky o daném poloměru vyskytují. Příklad poskytnutých výkresových dokumentů je uveden v příloze č 1.

Dále jsem vyhodnotil délku tratě z hlediska procentuálního zastoupení oblouků. Poloměry oblouků jsem rozdělil do tří intervalů. Výsledky jsou zobrazeny níže:

R [m]	Intervaly R	ČETNOSTI [ks]	%
20	(0; 20)	4	3,0
25	(20; 25)	7	5,2
30	(25; 30)	0	0,0
50	(30; 50)	22	16,4
80	(50; 80)	7	5,2
100	(80; 100)	5	3,7
150	(100; 150)	10	7,5
200	(150; 200)	5	3,7
500	(200; 500)	32	23,9
1000	(500; 1000)	25	18,7
2000	(1000; 2000)	17	12,7

Tabulka 12. Četnosti oblouků na vybraném úseku

Z tabulky 12 je tedy zřejmé, že největší zastoupení v daném úseku mají oblouky o poloměru 200 až 500 m. V dominantním zastoupení jsou přímé trati, resp. oblouky s velkými poloměry. Malé oblouky tvoří minoritní část daného úseku trati.

<b>R 200 - 1000</b>	<b>75,60</b>	<b>%</b>
<b>R 200 – 30</b>	<b>23,23</b>	<b>%</b>
<b>R 30 – 20</b>	<b>1,167</b>	<b>%</b>

Tabulka 13. Procentuální zastoupení intervalů ve vybrané trati

### Výškový profil poskytnuté tratě:



Obrázek 54. Výškový profil tratě [27]

### 4.3. Traťový úsek pro návrh trakčních baterií

Tato podkapitola byla přesunuta do praktické části - kapitoly 17, zabývající se návrhem trakčních baterií. Důvodem tohoto přesunutí je přehlednost a úzká provázanost těchto dvou kapitol. Fakticky ovšem tato podkapitola patří do této části DP.

## TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části DP jsou popsány hlavní trendy a směry jakými se městská doprava vyvíjí a nadále se pravděpodobně vyvíjet bude. Dále jsou popsány hlavní výzvy, které čekají na inženýry, projektanty ale také politiky a celou odbornou společnost. Cílem této části tedy je přiblížit systém, ve kterém bude autonomní tramvajové vozidlo provozováno a vozidlo, které bude v tomto systému efektivně použitelné. Teoretická část je zakončena SWOT analýzou segmentové tramveje, kde jsou výsledky teoretické části shrnuty.

### 5. Dynamická doprava

Dynamickou dopravou můžeme chápat například jako způsob přepravy, kdy množství přepravních vozidel reaguje na množství lidí, potřebujících se přemístit z jednoho místa na druhé. K tomu, aby tento systém mohl fungovat, musí provozovatel této služby disponovat dostatečným počtem vozidel k tomu určených a umělou inteligencí, která tento systém řídí. Danou problematikou se dnes zabývá mnoho inženýrů a vědců po celém světě v téměř všech odvětvích transportní techniky.

#### 5.1. Autonomní sdílená a koordinovaná mobilita v Praze - automobily

Jedním z týmů, který na této vizi pracuje je tým pod vedením pana Ing. Martina Shaefera (FEL ČVUT). Tým se zabývá mimo jiné i vyvíjením a testováním umělé inteligence, která bude systémy řízení v budoucnu ovládat.

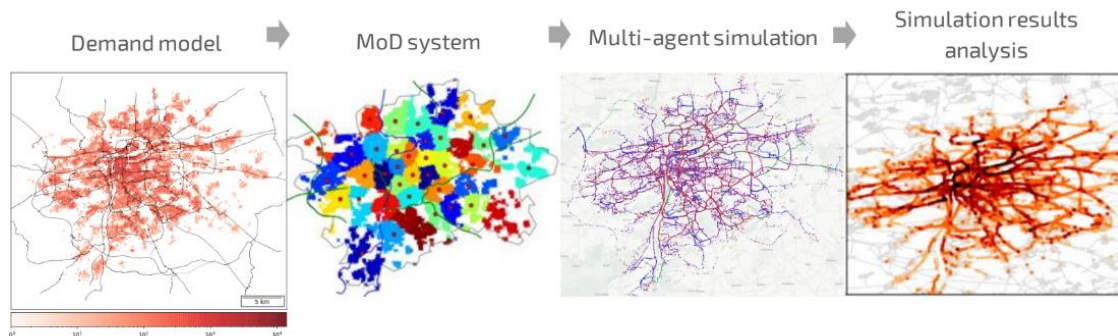
Projekt, který je výsledkem jejich práce je stručně popsán na základě přednášky k tomuto tématu, jíž jsem se zúčastnil a během, které byly posluchačům poskytnuty informace a jejich zdroje. [22]. Systém řízení dopravy byl virtuálně realizován v Praze. Tedy ve městě, pro které je určená i Segmentová tramvaj. Podobný systém řízení by mohl fungovat i pro hromadnou městskou dopravu. Proto následně pokusím velmi stručně popsat tento systém.

Jedná se o simulaci provozu v reálném čase v dopravní infrastruktuře Prahy. Na obrázku 47 jsou uvedené mapy, které byly zjednodušeny na tratě, po nichž jezdí autonomní automobily, jež reagují na požadavky cestujících v Praze. Tyto požadavky vzejdou např. prostřednictvím mobilní aplikace. Malé barevné šipky představují jednotlivé autonomní automobily pohybující se městem v reálném čase.



Požadavky na přepravu vznikly z reálného osídlení Prahy, dále z mapování každodenní přepravy osob po městě. Vytyčení vstupních dat a modely pro výpočty jsou vidět na obrázcích níže.

Obrázek 55. Pohled na dynamicky řízenou dopravu v Praze. [28]

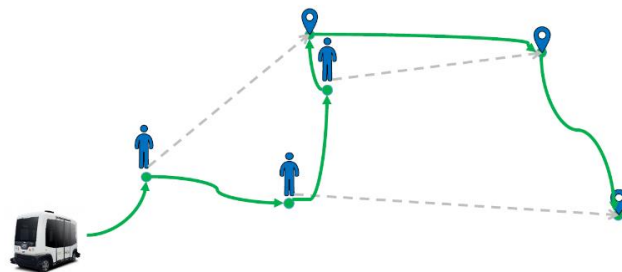


Obrázek 56. Virtuální mapy dopravy pro modelování dynamické dopravy v Praze.[28]

Velmi důležitou a přínosnou součástí provozování autonomních vozidel je tzv. Pooling.

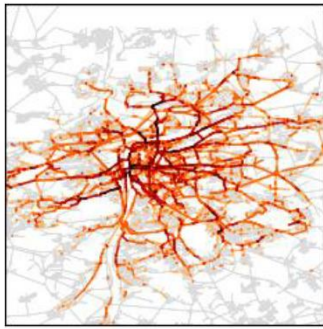
### pooling

Vozidla reagují na požadavky jednotlivých uživatelů. Aby však docházelo k efektivnějšímu využití vozidel, je nutné, jednotlivé požadavky cestujících propojovat a vytvářet tak spolujízdy, které jsou sice časově náročnější, ale ekonomicky jednoznačně přijatelnější. Tomuto systému se říká Pooling. Řešení této myšlenky je zobrazeno na obrázku 47.



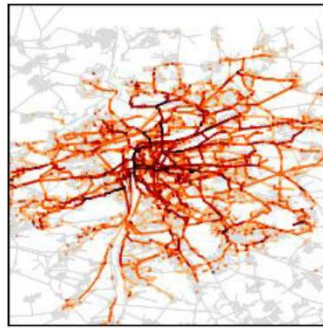
Obrázek 57. pooling [28]

Shrnutí práce je zobrazeno na následujícím obrázku 48. Níže jsou uvedeny tři způsoby přepravy v Praze: Vlastním autem, MoD a MoD s poolingem (*Mobility on Demand MoD – Mobilita na vyžádání*). Čím tmavší je barva, tím hustší je doprava. Dále je zde vidět počet ujetých kilometrů, počet potřebných vozidel, počet „ucpaných“ úseků (tedy dopravních cest, které není z důvodů převýšení kapacity možno plynule projet) a počet přetížených úseků.



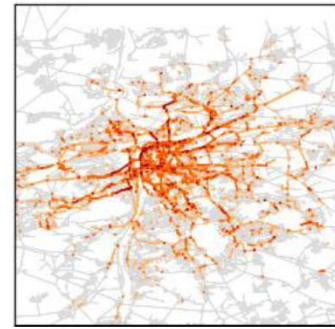
Vlastním autem

- **757 984 km**
- **122 473 used vehicles**
- 9 ucpaných úseků
- 170 přetížených úseků



MoD

- **1 002 661 km**
- **33 057 used vehicles**
- 27 ucpaných úseků
- 303 přetížených úseků



MoD s pooling

- **430 347 km**
- **13 925 used vehicles**
- 0 ucpaných úseků
- 15 přetížených úseků

Obrázek 58. Výsledky výpočtů - vlastním autem a MoD. [28]

Základní přínosy práce shrnuté v této kapitole jsou následující [22]:

- Potřeba méně vozidel, méně parkovacích míst, méně zaplněné ulice
- Příležitost využití nových technologií
- Elektrická a jiná ekologická vozidla
- Samoříditelná bezpečnější vozidla
- Pooling – spolujízda

Vývojem vozidel, sloužících k těmto účelům, se zabývá mnoho společností. Mimo automobilové výrobce i výrobci jiných dopravních prostředků. Např. Airbus, který pro tyto účely založil společnost Local Motors, vyvinul vozidlo Olli<sup>7</sup>, které je uvedené na obrázcích níže. Vzhledem k tomu, že těmito nebo podobnými vozidly se zabývají téměř všichni světoví výrobci dopravních prostředků či jejich komponent např. Toyota, Bosh, Navya atd., je zřejmé, že tato vozidla téměř s jistotou za pár let na silnicích uvidíme.



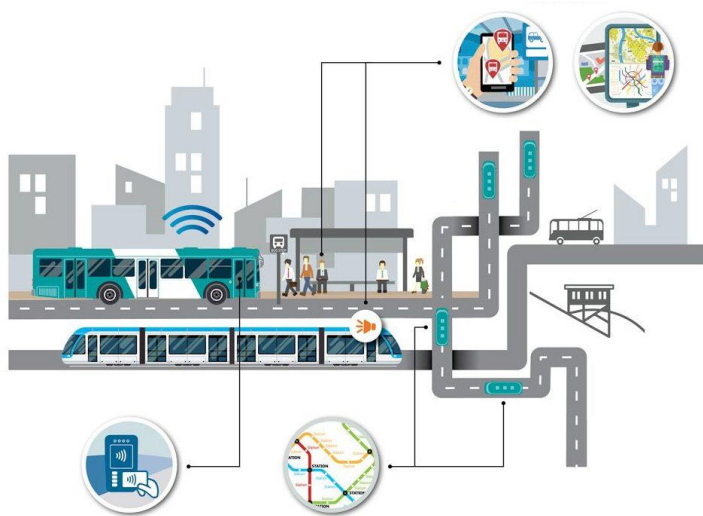
Obrázek 59. Vozidlo Olli. [29]



Obrázek 60. Vozidlo Olli v provozu. [29]

<sup>7</sup> Vozidel tohoto typu je mnoho lze je jednoduše vyhledat pod názvem Driverless Shuttles bus.

## 5.2. Dynamická doprava v MHD



Obrázek 61. Dynamická doprava v MHD. [30]

Pokud má MHD fungovat i v budoucnosti je nezbytné, aby v tomto systému jasně figurovala hromadná městská doprava, a to především kolejová, která má největší přepravní kapacity. Domnívám se, že právě spíše na hlavní dopravní uzly, po kterých jezdí kolejová vozidla, by měla vozidla fungující na principech z předešlé kapitoly reagovat. Tedy rozvážet lidi dál, kam nezasahují více kapacitní vozidla. Je tedy zřejmé, že touto či podobnou cestou vývoje dopravy se musejí zabývat i výrobci kolejových vozidel.

Dynamická automobilová doprava se neřídí žádným časovým řádem. Auta jezdí přesně tak, jak to lidé vyžadují. Myslím si však, že větší vozidla, jimiž jsou především ta, co jezdí ve městě po kolejích, tedy tramvaje, metra a příměstské vlaky, by měly mít nějakým způsobem vyhrazený časový úsek - interval, ve kterém jezdí. Pokud by tomu tak nebylo, domnívám se, že by vznikla přeprava, limitující některé věkové či sociální kategorie cestujících a obyvatel. Což je pro veřejnou dopravu zcela nepřijatelné. Zdá se mi velmi příhodné, aby tedy byly na všech zastávkách uvedené intervaly, v nichž vozidlo přijede. Stejně tak, jak je tomu dnes v časech dopravní špičky např. u metra C. Vozidlo by pak přijelo dříve či později (ale vždy v daném intervalu) v závislosti na počtu lidí, kteří tento spoj vyžadují. Vyžádání by mohlo být realizováno prostřednictvím mobilní aplikace, či senzoru rozpoznávání obličejů, který vyhodnotí počet cestujících na konkrétní zastávce.

### 5.2.1. Segmentová tramvaj

Dále bych se chtěl v uvažování zabývat pouze tramvajemi, resp. segmentovou tramvají. V již zmíněné aplikaci na vyžádání spoje by mohli uživatelé uvést i místo, kam se chtějí dostat. Ta by předala tramvaji informaci ohledně cesty, kterou se vydá. Segmentové tramvaje by pravděpodobně měly do jisté míry přebrat smysl dynamické dopravy a jezdit tam, kam si to lidé přejí.

Následně představím svou vizi na konkrétním příkladu. Cestující přijde na tramvajovou zastávku Bořislavka. Otevře si mobilní aplikaci a určí zastávku, na kterou by chtěl jet. Stejně tak to udělají všichni ostatní cestující. Jelikož tramvaj, která přijíždí z vozovny, měla pouze jednu možnou cestu, přijíždí složená z pěti segmentů. Souprava je složená z pěti segmentů, protože je dopravní špička a řídicí systém má data ohledně toho, kolik cestujících vyžaduje tuto přepravní službu v daném konkrétním čase. Pětina lidí chce jet na zastávku Nádraží Podbaba. Na obrázku č. 52 a 53 směr doleva ve směru jízdy) dvě pětiny lidí chtějí jet na Petřiny a zbylé dvě pětiny na Hradčanskou. Na obr. 53 je vidět oddělení čtyř článků směrem na Prašný most). Mobilní aplikace každému cestujícímu ukáže, jaký segment, kam pojedou. Stejně tak se cílová zastávka zobrazí na každém vozidle. Pod touto zastávkou bude zobrazená další pravděpodobná zastávka, kam bude vozidlo směřovat. Cestující tedy nastoupí do zvoleného segmentu a všech pět segmentů vyjede až na zastávku Dejvická. Tam se rozpojí virtuální spřáhlo jednoho koncového segmentu, který odbočuje

směr Nádraží Podbaba. Ostatní čtyři segmenty pokračují na Vítězné náměstí. Tento proces se zopakuje na Prašném mostě před zastávkou Prašný most, resp. Hradčanská.



Obrázek 62. Souprava pěti segmentových tramvají. [27], [auto DP]



Obrázek 63. Rozdělená souprava segmentových tramvají. [27], [autor DP]

Lidé, kteří v průběhu jízdy přistupují, mohou ovlivňovat směr jízdy až po zastávce, na kterou vozidlo jede. Bylo by tedy vhodné, aby měla jednotlivá místa dojezdu (zastávky), různé váhy při vyhodnocení směru jízdy. Tyto váhy by byly určeny tak, že především zastávky, které jsou důležitým dopravním uzlem, by měly váhu nejvyšší. *Otázkou je, zda by nebylo především ekonomicky vhodné, využití možného příplatku za větší váhu volby směru jízdy. Dále, zda by větší váhu hlasu neměli mít například lidé s omezením pohybu, aby byli zvýhodněni kvůli svým hendikepům. To je otázka především na sociology, politiky atd.*

Domnívám se však, že pokud by měly být segmenty pouze volitelně jezdící, mohly by pak diskriminovat právě sociálně slabší obyvatele, pro něž by měla být veřejná doprava nejpřístupnější. Proto by bylo pravděpodobně vhodnější, aby např. z pěti vozů byly takto volitelné pouze dva a zbylé tři by měly přesně definovanou trasu.

### 5.2.2. Souprava – virtuálně spřažené segmenty

Vozidla (jednotlivé segmenty), jsou v depech připravená a mohou vyjet v soupravě, která je tvořena počtem segmentů, který je definován potřebnou přepravní kapacitou cestujících na konkrétním místě. Dalším kritériem pro počet spojených segmentů je délka nástupišť, která tento počet omezuje a legislativa vymezující maximální délku soupravy - vozidla pro provoz ve městě.

*Pozn.* Na podobném principu by měla fungovat i připravovaná linka metra D. [23]. V depu stojí více souprav, které jsou připravené vyjet. Na centrálním dispečinku se vyhodnotí potřeby přepravních kapacit a pokud je potřeba, spustí se do provozu další souprava metra.



Obrázek 64. Vizualizace depa metra D. [31]

Jednotlivá vozidla jsou společně propojená pomocí virtuálních spřáhel tak, aby byla jednoduše rozpojitelná. Zda budou segmenty rozpojovány za jízdy nebo při stání v zastávce závisí pravděpodobně hlavně na níže uvedených faktorech. Na předešlé stránce předpokládám, že oba budou splněny.

Ad1) Vyřešení úskalí technologie virtuálního spřáhla<sup>8</sup>. Tzn. nesmí dojít k srážce segmentů. Pokud první segment prudce zastaví, musí ostatní segmenty s minimálním prodlením taktéž zastavit, aniž by přišly do kontaktu. Datový tok mezi vozidly musí být dostatečně výkonný, přesný a odolný vůči vnějším nežádoucím vlivům. Jak přirozeným tzn. šum atd., tak uměle vytvořeným za účelem sabotáže vozidla - tedy trestné činnosti.

Ad2) Maximální potřebné kapacitě soupravy. Zda bude potřeba, aby bylo v daný okamžik na daném místě tolik segmentů, aby musely být spřažené a tvořily tak soupravu. Pokud by totiž jezdily zcela samostatně, zabíraly by podstatně více místa. Viz zábrzdňá dráha atd.

První segment v soupravě se stane řídicím segmentem a ostatní pouze kopírují chování prvního segmentu, pakliže nedojde k rozpojení segmentů během jízdy. Pokud dojde k rozpojení segmentů, pak se odpojený segment stane taktéž řídicím.

### 5.3. Distribuovaná síť záložních segmentů

Aby doprava ve městě mohla rychle tj. do deseti minut reagovat na aktuální potřeby přepravy, bylo by vhodné, aby vozidla nebyla rozmístěná pouze v depech ale i blízké vzdálenosti vytížených dopravních uzlů.

Jak již bylo zmíněno vozidla reagují na potřeby cestujících. Pokud je tedy dopravní špička, nebo je na určitém místě zvýšená potřeba přepravy v důsledku např. konání kulturní či sportovní akce, je třeba, aby vyjelo do infrastruktury více vozidel.

Tento proces aktivace jednotlivých segmentů by v první fázi mohl dělat centrální dispečink, který by disponoval všemi potřebnými daty. Později by ovládání celého systému mohla zcela vykonávat umělá inteligence.

### 5.4. Segregace autonomních vozidel

Vozidlo může být provozováno buďto ve smíšeném provozu nebo na segregovaných tratích. Autonomních vozidel jezdících po oddělené trati je již dnes mnoho. Tato vozidla jsou ovšem provozována jako metra, či příměstské jednotky propojující letiště s městem, kde je segregace snadná.

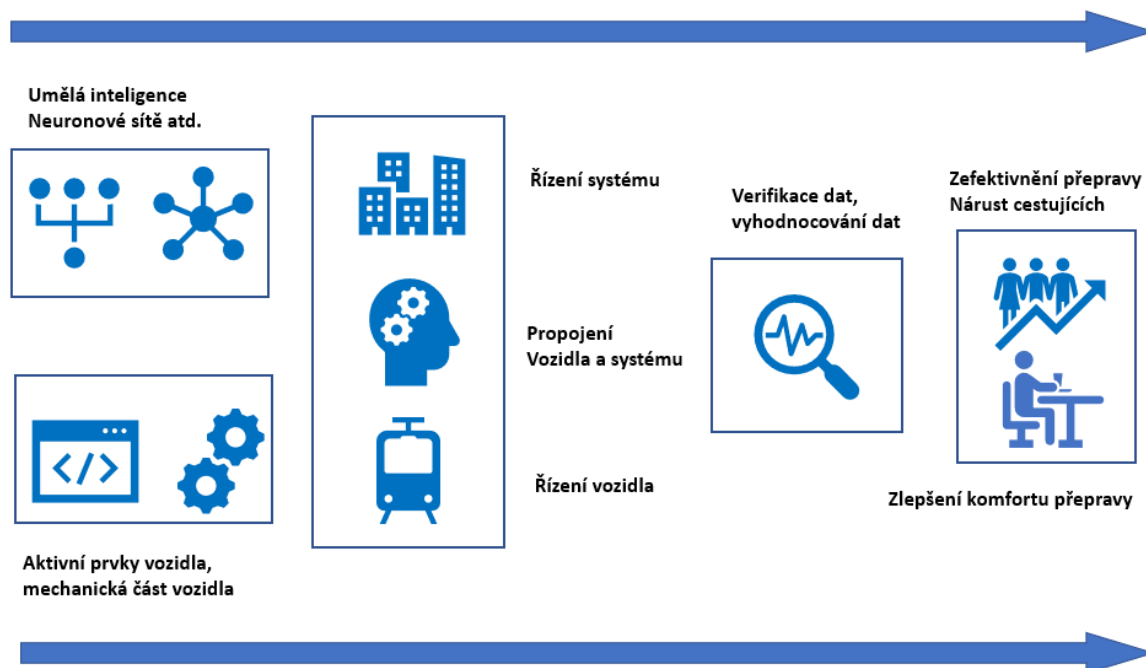
Komplikací přinášející smíšený provoz autonomních a lidsky řízených vozidel je mnoho. Je pravděpodobné, že autonomní tramvaje provozované v městské infrastruktuře budou provozuschopné až v okamžiku, kdy budou autonomní i ostatní dopravní prostředky.

---

<sup>8</sup> Virtuálním spřáhlem se dále zabývám v kapitole 8.5.

## 6. Autonomní provoz

Segmentová tramvaj je ve své podstatě nový typ vozidla, který bude výrazně „inteligentnější“ než současné tramvaje v mnoho ohledech. V této kapitole budu popisovat některé z možných funkcí vozidla. Je zřejmé, že všechny tyto funkce nebude moci využívat vozidlo najednou a v blízké době, tj. do deseti let. Důvod je ten, že jsou technicky poměrně komplikované, a především v reálném provozu nevyzkoušené. Domnívám se, že jednotlivé funkce se budou do vozidla zařazovat postupně. Jednoduchá vize, jak by mohly jednotlivé kroky postupovat, je zobrazená na níže uvedeném schématu, kde jsou taktéž zobrazeny jednotlivé podsystémy, které je potřeba vyvinout:



Obrázek 65. Schéma postupů při realizaci projektu. [autor DP]

Umělá inteligence bude hlavním řídicím prvkem řízení vozidla, ale i celého systému dynamické dopravy. K pochopení, v jakém systému a prostředí se bude pohybovat Segmentová tramvaj, je potřeba alespoň velmi okrajově porozumět základním principům aplikace některých druhů umělé inteligence. Díky konzultacím s panem Ing. Antonín Vobecký z Českého institutu informatiky, robotiky a kybernetiky, ČVUT v Praze (CIIRC) jsem popsal následující podkapitoly.

Pro ovládání autonomního vozidla a systému jsou vhodné především tyto dvě úzce související skupiny umělé inteligence:

- Řízení autonomního vozidla – neuronová síť (AI - neural networks)
- Řízení městského provozu – neuronová síť, plánování (AI - automated planning)

V rámci své práce se budu podrobněji zabývat pouze druhým bodem. Tedy popisem základních principů („filozofie“) umělé inteligence-neuronové sítě, která by mohla řídit autonomní vozidlo. Princip prvního bodu jsem již nastínil v předchozí podkapitole viz Ing. Sheafer.



## 6.1. Řízení segmentu

V oblasti algoritmů pro řízení autonomního vozidla lze vyčlenit tyto zásadní oblasti:

- Zpracování dat snímačů
- Senzorová fúze
- Lokalizace
- Plánování cesty
- Modelování okolí
- Řízení vozidla

Aby neuronová síť mohla efektivně fungovat, je potřeba získat data, ze kterých se síť může učit. Tato data je potřeba nasbírat v reálném provozu. Je nutné, aby síť znala všechny možné situace tak, aby na ně pak mohla reagovat. V případě autonomní tramvaje pak především: odbočení auta na křížení tramvajové trasy, přeběhnutí chodce přes tramvajovou trať v místech, kde je to povolené ale i v místech, kde je to zakázané, chování lidí na zastávce, zpozorování nastupujícího invalidy atd. Všechny tyto situace nastávají v dopravě pravidelně a řidiči na ně tedy musí reagovat velmi často. Proto je nezbytné, aby těmito zkušenostmi byla vybavená umělá inteligence a uměla je optimálně vyhodnotit a vyřešit. Pokud možno rychleji než strojvedoucí.

Jednou z možností, jak sbírat tato data, je umístění senzorů a kamer na tramvaje, které projíždějí Prahou. Tato vozidla by mohla zaznamenávat video, podle kterého by se neuronová síť učila, jak vypadá např.: Přechod a chodec, který přes něj přechází. Chodec, který nastupuje do tramvaje. Auto, které křížuje tramvajovou trať atd. Zmíněnými senzory myslím např. Lidar, ultrazvuk atd.

Následně by se síť mohla učit z nasbíraných reálných dat dopředu tedy „offline“. Tzn., síť by měla nahraná data ohledně jízdy vozidla v reálném provozu (např. kolem tramvaje projíždějící auta, chodci na přechodě atd.) společně s reálným řízením vozidla strojvedoucím. Síť by se tedy učila v „offline“ režimu dělat podobná rozhodnutí jako strojvedoucí. Před touto fází by bylo pravděpodobně potřeba správně filtrovat nasbíraná data a snažit se síť učit na takových datech, která by byla rovnoměrněji rozdělena. Aby se tedy v počáteční fázi například neučila pouze z 1M nezajímavých obrázků, kde vozidlo jede pouze po přímé trati, ale z 100 zajímavých obrázků, kde dochází k nějakým manévřům vozidla.

V další fázi by byla síť umístěná již v počítači v tramvaji a učila by se příkazy od strojvedoucího, který by ovšem měl stále plnou moc nad ovládním vozidla, tak jak je tomu dnes. Tato síť by si dané úkony propojovala s naučenými obrazy a úkony.

V poslední fázi by vozidlo mohlo jezdit samostatně bez strojvedoucího. Množství potřebných strojvedoucích by se tedy výrazně zmenšilo. Místo nich by byly pouze dispečeré, kteří by z ústředny kontrolovali provoz.

Jednotlivé fáze by byly pravděpodobně časově odstupňovány dle možností testování vozidla v reálném provozu. Jejich posloupnost by však měla být dodržena viz předešlé odstavce.

### Verifikace dat

Je zřejmé, že celý systém řízení prostřednictvím neuronové sítě je založen na kvalitních datech, ze kterých se vozidlo následně bude učit. V poslední době se k velkému pokroku verifikace dat nedošlo. Jedná se o velmi důležitou část pro bezpečnost používání neuronových sítí. Lze očekávat, že v nejbližší době dojde v tomto odvětví k velkému posunu.

## Shrnutí

Obecně je složité říct, že neuronová síť při řízení vozidla vždy zvolí zcela optimální řešení. Pokud například existuje i přesné řešení, tak neuronová síť pravděpodobně nikdy tak dobrá nebude. Nicméně přesné řešení v krizové situaci může být i pro velmi dobrého strojvedoucího pouze náhodou. Silná stránka neuronových sítí je mj. v dobré generalizaci na neviděné příklady. Pokud by tedy byla neuronová síť „naučená“ řídit vozidlo od „ideálního“ strojvedoucího a kvalitních verifikovaných dat, pak by v kombinaci s předpovídáním, pro strojvedoucího neviditelných nebezpečí, byla efektivnější nežli „ideální“ strojvedoucí. *Nehledě na to, že takovýchto strojvedoucí je velmi omezeně a vyučit nové stojí mnoho času a prostředků.*

## 6.2. Senzory Segmentové tramvaje

Senzory, které budou využity v Segmentové tramvaji lze rozdělit do dvou hlavních skupin. Pro konkrétní představu uvedu pár příkladů jejich funkce:

### 1) Autonomní řízení vozidla

#### a) Nezbytné k provozu vozidla – nejvyšší bezpečnost

- Interakce vozidlo – vozidlo
- Interakce vozidlo – kolemjdoucí člověk
- Dodržování předpisů dopravy
- Komunikace s centrálním řízením
- Otevírání dveří
- Požární bezpečnost

#### b) Doplnující ke komfortu cestujících – nižší bezpečnost

- Informační systém
- Regulace vzduchu – teploty
- Regulace tuhosti vzduchového vypružení
- Reakce na vandalismus

### 2) Aktivní natáčení podvozků

#### Detekce trasy jízdy

- snímání křivosti kolejnice v rovině x-y
- snímání polohy vozidla z čidel v trati

### 6.2.1. Senzory pro řízení autonomní vozidla

V přehledu senzorů a dále pak ve shrnutí požadavků a nových příležitostí autonomních vozidel (tabulka 14 a 15), byl využit materiál [24], který podrobně a přehledně popisuje danou problematiku:

Typ senzoru	Výhody	Nevýhody
<b>Kamera</b>	velký dosah; pasivní sensor	produkuje velký obsah dat; počítačově náročné zpracování; snížená funkčnost při špatném počasí či protisvětle
<b>Radar</b>	spolehlivé při různém počasí; měří i rychlost objektů	nepřesnost v pozici identifikovaného objektu; neměří ve vertikální ose
<b>Lidar</b>	přesné měření okolí s cm přesností; nejsou citlivé na osvětlení scény	vysoká cen; snížená funkčnost při špatném počasí (mlha, déšť); necitlivost na objekty s nízkou odrazivostí (tmavé vozy)
<b>Ultrazvuk</b>	nízká cena	malý dosah (metry)
<b>GPS</b>	nízká cena	nízká cena; malá přesnost; nefunguje tam, kde není přímý a dostatečně velký průhled na oblohu (tunely, města, les)

Tabulka 14. Přehled základních senzorů. [24]

Velkou výhodou segmentového kolejového vozidla je velký prostor, pro umístění senzorů. Limitujícím aspektem pro navrhnutí rozmístění senzorů tedy pravděpodobně nebude prostor, ale cena senzorů a jejich efektivní využití a správné propojení jejich výstupů.

### 6.2.2. Sensory pro aktivní natáčení podvozků

Segmentová tramvaj bude vybavena aktivním natáčením podvozků. Podvozky budou tedy v ideálním případě, během průjezdu v oblouku, stále zaujímat radiální polohu. Nebudou tedy na kolech vznikat příčné skluzy, které vznikají při nulovém úhlu náběhu. Důsledkem toho bude, v ideálním případě, docházet k výrazně menšímu opotřebenosti kolejí, ale i kol. Dále bude snížena hluková emise vozidla.

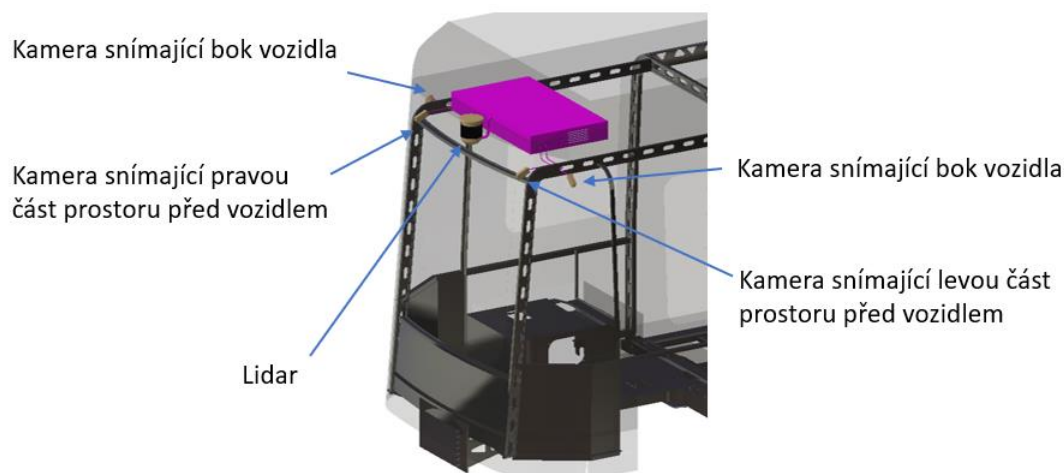
V kapitole 10.1 je geometricky popsán úhel natočení podvozku  $\alpha$ . Jedná se o úhel, při kterém podvozek zaujímá radiální polohu.

K tomu, aby se podvozek do této polohy dostal, je nutné jej aktivně natočit. Natočení bude realizováno prostřednictvím servoaktuátorů, které budou zpětnovazebně řízeny. Vstupní informace pro servoakt. jsou data změřená ze senzorů, které budou snímat křivost koleje. Detailnější popis senzorů pro aktivní natáčení kol je uveden v kapitole 16.

## 6.3. Umístění čidel pro řízení vozidla

Základní přehled těchto čidel je uveden v kapitole 6.2.1. V této podkapitole je představeno možné umístění některých z představených čidel.

Vzhledem k možným kolizím vozidla je vhodné, aby byla čidla umístěná v místech, která by měla být případnou kolizí nejméně poškozená. Proto jsem se rozhodl umístit čidla na střechu:



Obrázek 66. Rozmístění senzoru na čele tramvaje. [autor DP]

### 6.3.1. Souhrn požadavků a nových příležitostí autonomních vozidel

V závěru této kapitoly je uvedena tabulka, která shrnuje aktuální požadavky a nové příležitosti, které s sebou autonomní vozidla přinášejí. Výchozím zdrojem informací je článek popisující autonomní automobilová vozidla [24]. Tabulka byla upravená pro účely kolejového vozidla.

Oblast	Charakteristiké vlastnosti oblastí
<b>Senzory</b>	Vysoká cena Snížená citlivost v horším počasí Vysoká spotřeba energie Odolnost proti vlivu prostředí
<b>Centrální řídicí jednotky</b>	Vysoký výpočetní výkon pro náročné zpracování velkého množství dat Vysoká spotřeba energie Dostatečný prostor pro ukládání dat Datová propustnost sběrnic
<b>Algoritmy</b>	Počítačové vidění – umělá inteligence Umělá inteligence – potřeba kvalitních verifikovaných dat Senzorová fúze – kompenzace rušení a kombinace různých typů senzorů
<b>Bezpečnost</b>	Redundance klíčových systémů Verifikace nedeterministických prvků systému Testovací scénáře Nákladnost testování Odolnost proti hackingu
<b>Infrastruktura</b>	Nákladnost vybudování infrastruktury Chybějící standardy, rychle se rozvíjející technologie HiRes mapy <sup>9</sup> – dostupnost, sdílení, aktualizace Více ploch pro nástup a výstup
<b>Komunikace</b>	Standardizace V2V, V2I, V2C <sup>10</sup> Přechodné období se smíšeným provozem podporujících a nepodporujících vozidel/infrastruktury

<sup>9</sup> High Resolution mapy – vysoké rozlišení map, 3D mapy tzn. vozidlo má velmi přesné údaje o prostoru

<sup>10</sup> V2V vehicle to vehicle, V2I -vehicle to infratrucure více viz: <https://1url.cz/Lz3aI>

<b>Legislativa</b>	Chybějící legislativa, formující se společenský konsensus Definice zodpovědnosti za případné škody Legislativní rámec a regulace pro mobility operátory
<b>Společenské změny a bariéry</b>	Potřeba nových druhů vozidel Vozidlo jako vlastnictví a společenský statut Předsudky a nedůvěra

Tabulka 15. Shrnutí požadavků a nových příležitostí autonomních vozidel. [24]

## 7. Přímý pohon kol a dvojkolí

U jednonápravových podvozků lze efektivně využít koncept přímého pohonu kola bez převodovky. S inspirací z bakalářské práce kolegy Bc. Lukáše Hetfleische [25] a studijních podkladů doc. Ing. Josefa Koláře [6] bude následovně přiblížená daná problematika.

### 7.1. Konstrukce sestavy pohonu:

Konstrukční řešení přímého pohonu tramvajů a jejich kol lze rozdělit na dvě možné varianty uspořádání.

#### a) Neodpružený pohon s nábojovým motorem (kolový motor)

□

- synchronní motor bez planetové převodovky
- asynchronní motor s planetovou převodovkou



Obrázek 67. Neodpružený pohon s kolovým motorem.[7]

#### b) Odpružený pohon s integrovanými trakčními jednotkami a trakčním motorem mimo pevnou osu kola

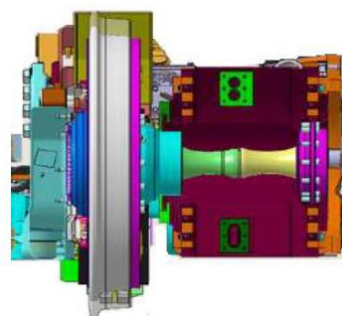
Je částečně odpružená jednotka tvořená elektromotorem a kolovou převodovkou, uloženou na kolovém čepu tramvajového kola. Tato jednotka je přes závěsku upevněna k rámu podvozku.

Zcela odpružený pohon-elektromotor s převodovkou (nebo bez ní) vytváří jeden konstrukční celek upevněný na rámu podvozku, který přes kloubový hřídel, nebo ojníčkovou spojku, případně jinou pružnou spojku, pohání tramvajové kolo.

První z uvedených se již nepoužívá, z důvodu vysokého procenta nevypružených hmot. Tato varianta se používala v dřívějších dobách, především proto, že je konstrukčně nenáročná. Motor byl zabudován do konstrukce kola. Dnes se využívá řešení, kde je motor pevně uchycen k rámu podvozku a točivý moment je přenášen na kolo prostřednictvím kloubového hřídele, či ojníčkovou spojkou.

Z výše uvedených informací vyplývá, že požadavky jsou kladeny především na elektromotor, který musí být schopen vyvinout odpovídající výkon a hnací moment. Také se rozměrově musí vejít do omezeného prostoru vně tramvajového kola. Tím se dostáváme k jednotlivým typům elektromotorů, které lze použít pro přímý pohon tramvajového kola. [6]

V Praze je tato koncepce využívána u tramvají 15T ForCity Alfa od ŠTRN. Tramvaj má čtyři plně trakční podvozky. Podvozky využívají portálové nápravy tak, aby bylo možné zaručit 100 % nízkopodlažnost. Motory jsou umístěny z vně podvozku a připevněny na konzoly ve středové části podvozku. Každý podvozek má čtyři motory o výkonu cca 45 kW<sup>11</sup>. Každý trakční motor tedy pohání pouze jedno kolo.



Obrázek 68. Řez motorem použitým v tramvaji 15T [7]

## 7.2. Typ motoru:

Synchronní elektromotor lze použít přímo pro pohon tramvajových kol, jelikož nepotřebuje k redukci točivého momentu převodovku.

U kolejových vozidel je v poslední době trend používat synchronní elektromotory s permanentními magnety z prvků vzácných zemin (zkráceně *PMSM*), v nichž jsou permanentní magnety nalepeny, případně vsazeny do drážek, po obvodu rotoru. Tím odpadá problém s napájením navíjených cívek, které se u toho typu elektromotoru vyskytují pouze ve statoru. PMSM lze rozlišit na dva typy:

### 7.2.1. PMSM s vnitřním rotorem

**PMSM s vnitřním rotorem** je elektromotor klasické koncepce, vně se nachází pevný stator s cívkami, který je připevněný k rámu podvozku a uvnitř je otočně uložený rotor v ložiscích, s připevněnými permanentními magnety. Tímto typem elektromotoru je vybavena například tramvaj Škoda 15T ForCity Alfa.

### 7.2.2. PMSM s vnějším rotorem

**PMSM s vnějším rotorem** si lze představit jako předchozí typ, ale s otočenými pozicemi rotoru a statoru; rotující část s připevněnými magnety (na které navíc příznivě působí vliv odstředivé síly) je umístěna vně, uvnitř je pevně k podvozku uložen stator s vinutou cívkou. Na Obr. 1 je patrná aplikace synchronního kolového motoru s vnějším rotorem. Na vnější straně rotoru je přišroubován brzdový kotouč provozní brzdy se třmenem a destičkami.

<sup>11</sup> Detailněji jsou parametry motoru popsány v podkapitole 13.2.1.

## 8. Základní požadavky na jednotlivé části vozidla

Kapitola popisuje dílčí části vozidla a vizi jejich realizace u Segmentové tramvaje.

### 8.1. Dílčí konstrukční sestavy

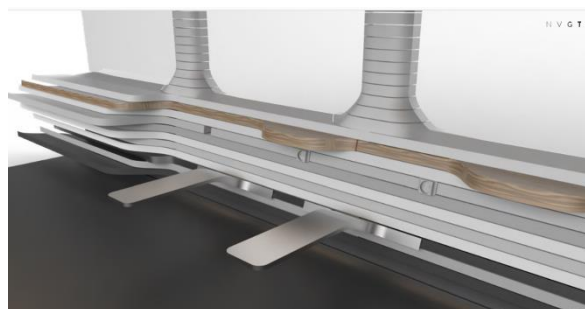
V podkapitole jsou popsány vybrané konstrukční sestavy, pro které se v novém konceptu vozidla nabízí velká kreativita.

#### 8.1.1. Dveře okna

Aby vozidlo bylo schopné převézt maximální počet cestujících a během výstupu a nástupu nemuselo setrvávat na zastávce příliš dlouho, je nutné, aby vozidlo mělo na každé bočnici dvoje široké dveře (šířka 1500 mm). Velmi krátké předstávky vozidla mají tu výhodu, že cestující nezacházejí daleko do „slepých“ konců vozidla a při výstupu se tak nemísí s cestujícími, kteří nastupují. Tento požadavek na dvoje dveře hraje důležitou roli ve volbě rozvoru vozidla. Mezi dveřmi musí být prostor, aby se dveře během otevření nesrážely ve vnější části. Okna, by měla být velká tak, aby umožňovala co největší výhled z vozidla.

#### 8.1.2. Sedadla

Vozidlo by mělo být co nejvíce flexibilní. Interiér vozidla by měl, až na jednu výjimku<sup>12</sup>, zcela záviset na provozovateli. Velmi se nabízí i variabilní sedačky, které se dají rozkládat a umísťovat dle kapacity cestujících, jež vozidlo musí přepravit. Pokud tedy vozidlo jede v denní dopravní špičce, sedačky se zasunou tak, aby se zvýšila kapacita. Mimo dopravní špičku se naopak vysunou, aby poskytly cestujícím vyšší komfort jízdy.



Obrázek 69. Vizualizace variabilního interiéru pro budoucnost.[32]

#### 8.1.3. Prostory pro pohybově omezené

Při návrhu vozidla je nutné zohlednit cestující se sníženou schopností pohybu a orientace. Těchto osob je v České republice 30 % a pravděpodobně poroste. Osoby s omezenou schopností pohybu a orientace můžeme rozdělit do následujících kategorií, kde tatáž osoba může být zahrnuta ve více kategoriích: [26]

- 51 % těhotné ženy
- 2 % děti v kočárku
- 5 % malé děti
- 14 % nemocní a tělesně postižení občané
- 18 - 20 % starší občané

---

<sup>12</sup> Prostor nad podvozky je daný viz kapitola 10.2. Tento prostor lze nejefektivněji využít tak, že se na něj umístí sedačky.

Vozidlo musí být vybaveno speciálně vyhrazenými sedadly v blízkosti provozních dveří tak, aby handicapovaný nemusel procházet celý vůz. Sedadla musí být dvě a nesmí být sklopná. Alespoň jedno takovéto sedadlo musí mít prostor pro vodičího psa a nesmí zasahovat do uličky tramvaje. Šířka sedáku musí být 220 mm na každou stranu od roviny procházející středem sedáku. Přítomnost madel je nutností – mezi vyhrazenými sedadly a provozními dveřmi musí být madlo ve výšce 800 mm až 900 mm nad úrovní podlahy tak, aby byl zajištěn bezpečný výstup a nástup. [26]

Handicapovaná osoba na invalidním vozíku potřebuje plochu o rozměru minimálně 750 x 1300 mm, která musí být protiskluzová a sklon nesmí přesahovat 5 % v žádném směru. Alespoň jedny dveře musí být určeny pro invalidní vozíky tedy s rampou nebo zdvižemi. V prostoru pro lidi s invalidním vozíkem mohou být nainstalovány sklopná sedadla pro použití v případě, kdy žádný vozíčkář právě necestuje

### **Bezbariérovost vozidla**

Vozidlo musí být co nejvíce nízkopodlažní. Ve dveřních prostorách musí být nutně zcela nízkopodlažní. Vzhledem k šířce navrhovaného vozidla (2400 mm) je nutné vyřešit výsuvný element, který by snižoval mezeru mezi nástupní hranou dveří a nástupištěm.

V prostřední části vozidla, tj. mezi dveřmi (včetně dveří), bude vozidlo 100 % nízkopodlažní. Od podvozků dále bude vyvýšená podlaha kvůli podvozku. Tato výška zůstane až na kraj vozidla, aby nevznikal další schod dolů a také touto vyvýšenou podlahou vznikne další prostor pod tramvaj pro případné potřebné komponenty.

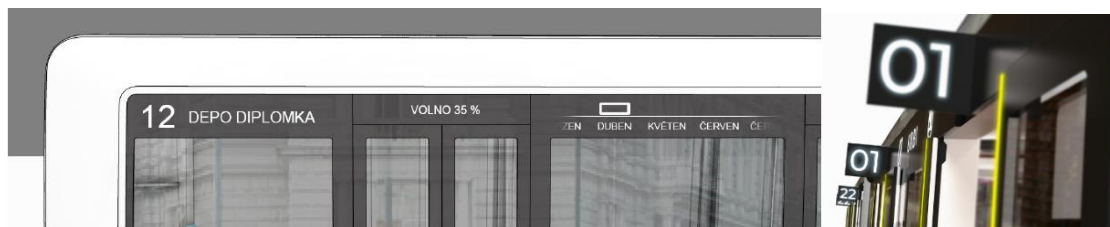
Toto převýšení může být překlenuto buď schodem nebo plošinu (sklon 8 %). V kapitole 11. uvádím dvě varianty uspořádání vozidla. První varianta (s delším prostředním oknem) kvůli dveřnímu prostoru, neposkytuje dostatek místa pro plošinu vedoucí k přední části vozidla (část nad podvozky). Proto musí být převýšení překlenuto schodem. Pokud by byla použita nakloněná plošina, pak by zasahovala až do dveřního prostoru, který je též nakloněný. Vznikly by tak dvě protínající se nakloněné plošiny, což je nepřijatelné. U druhé varianty je prostor mezi dveřmi a přední částí podstatně větší, a tak lze nakloněnou plošinu použít.

Schod je obecně velmi nepraktický prvek u jakékoliv vozidla. Především během jízdy je velmi nebezpečný, zvláště když je schodů více. Pro pohybově omezené cestující mohou být zcela fatální problémem. Proto je snaha schody vůbec nepoužívat. Z tohoto důvodu se jeví jako lepší řešení varianta 2. Domnívám se ale, že prostor v prostřední části u varianty 1 je natolik velký, že všichni pohybově omezení cestující budou mít dost místa k sezení. Vyvýšená plocha v přední části může nabízet lepší výhled z vozidla, a proto si myslím, že jeden schod (výška 100 mm) na „vyhlídku“ je i psychologicky přijatelný a možná i z tohoto úhlu pohledu vítaný.



#### 8.1.4. Obrazovky, displeje

Vozidlo bude muset reagovat na dobu, pro kterou bude vyrobeno. Je zřejmé, že to bude doba virtuální. Vozidlo by proto mělo mít velmi důkladně promyšlené a interaktivní informační plochy jak uvnitř vozidla, tak vně. Velká část exteriéru by měla dávat informace ohledně tramvaje: kam pojedete, kolik je uvnitř cestujících, volná místa k sezení atd.



Obrázek 70. Vnější informační plochy vozidla URBI. [15]

## 8.2. Bezpečnostní a zdravotní pohled na koncept vozidla

Cestující mohou být ohroženi z vně ale i zevnitř vozidla. Proto jsou následující podkapitoly rozděleny na vnější a vnitřní nebezpečí.

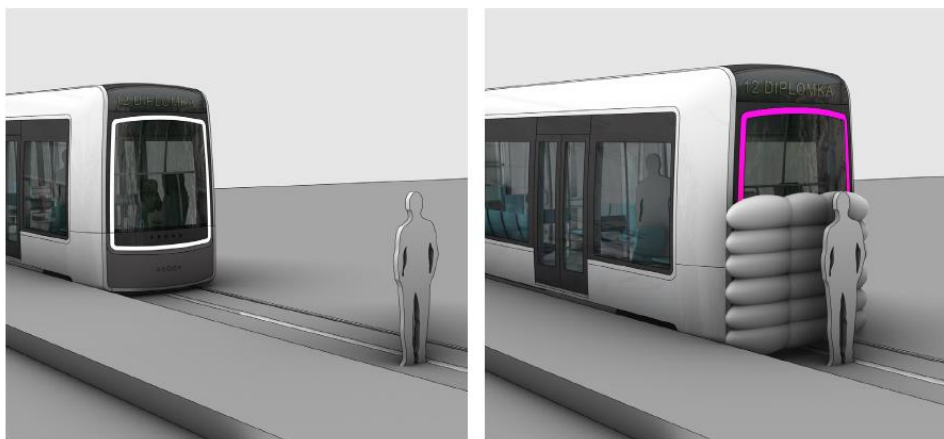
### 8.2.1. Vnější nebezpečí

Na prvním místě je vždy bezpečnost cestujících. Proto je nutné klást nejvyšší důraz na zabezpečení cestujících při nehodách. Jak vozidla samotného např. při vykolejení, tak i při srážce s jiným vozidlem. Stejně tak je důležité chránit chodce před srážkou vozidlem.

Již v dnešní době se klade velký důraz na tvar čela tramvaje kvůli čelnímu nárazu s chodcem. Čelo tramvaje je v dnešní době u všech tramvajů již velmi podobné. (Nutno podotknout, že ještě před deseti lety tomu tak nebylo). Je to dáno uspořádáním nárazníku, protišplhu, podjezdové zábrany, ale také např. stěrače, tak aby co nejméně ohrožovaly chodce při čelní srážce. Čelo tramvaje pak tedy vychází skloněné směrem do tramvaje. Tento tvar čela navíc sraženého chodce nesmete pod vozidlo ale „nadhese“, což je velmi podstatné.

Bezpečnostní prvky mohou být jak aktivní, tak i pasivní. Pasivní prvky jsou mechanické součásti konstrukce vozidla, které se nijak neaktivují při nehodě. (Uspořádání těchto prvků v mém vozidle stručně popisují v kapitole 13.

Aktivní bezpečnostní prvky se aktivují, když jim senzor – umělá inteligence dá informaci o možném nebezpečí. V budoucnu by se vzhledem k pokročilým technologiím senzorů a umělé inteligence mělo nehodám zcela předejít. Proto uvažuji tvar čela vozidla téměř kolmý k povrchu vozovky. (Jelikož tak poskytuje nejvíce prostoru pro cestující.) Je pravděpodobné, že predikce umělé inteligence nikdy nebude 100% bezpečná, ale zcela jistě spolehlivější než predikce běžného strojevodoucího. Proto by na čele vozidla mohl být umístěn např. vnější airbag pro ochranu chodců.



Obrázek 71. Vnější airbag vozidla URBI. [15]

### 8.2.2. Vnitřní nebezpečí

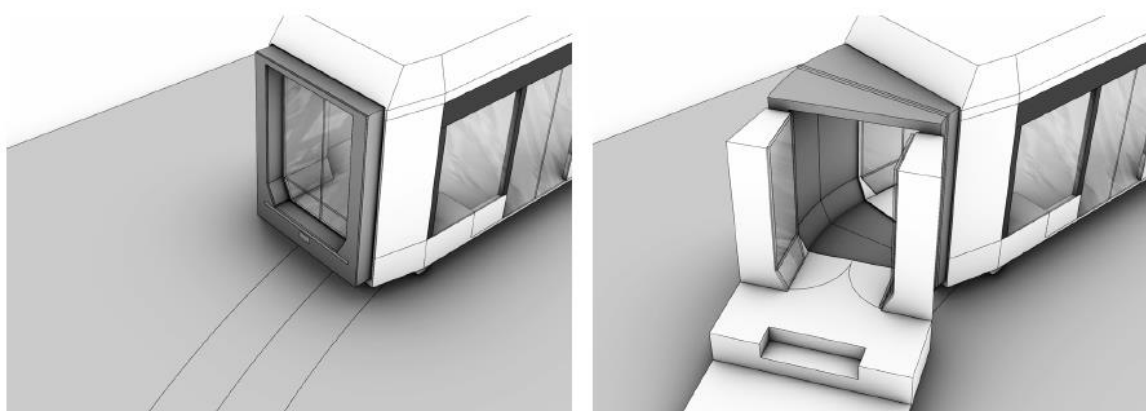
Cestující mohou být pochopitelně ohroženi i uvnitř vozidla. Z toho důvodu musí být vhodně umístěné tyče pro držení stojících osob. Tyto tyče musí být umístěny tak, aby cestující neohrožovali, ale také aby nepředstavovali překážku pro rychlou výměnu cestujících. Je nutné použít vhodný protiskluzový povrch podlahy. Dále je nutné klást velký důraz na ergonomii sedaček.

Vzhledem k již dostupným technologiím lze předpokládat, že by skla ve vozidle mohla být automaticky zatemňovaná, tak aby chránila cestující před nadbytečným světelným zářením ze vnějšku.

### 8.3. Propojení článků

Cestující v dnešní době jsou zvyklí na vozidla, jež umožňují průchod skrz všechny články vozidla, ale také na stará oddělená vozidla bez možného průchodu. Mezivozový prostor je během jízdy vozidla velmi zřídka využíván pro přepravu cestujících.

Řešení propojení vozidla by bylo technicky velmi náročné. Problém by nebyl pouze konstrukční, ale také bezpečnostní. Během rozpojování článku by muselo být důkladně promyšleno zabezpečení cestujících stojících poblíž přechodových prostorů.



Obrázek 72. Designerský návrh řešení přechodového prostoru vozidla URBI. [15]

Po dotázní několika oborově nezainteresovaných cestujících, se došlo k závěru, že cestující přecházení mezi články využívají převážně při nerovnoměrném obsazení jednotlivých článků. Pokud

by tedy byla kvalitně poskytnuta informace ohledně obsazenosti jednotlivých segmentů viz podkapitola (8.1.4), nebylo by nutné mezi články přecházet.

## Riziko

Velké nebezpečí představuje přecházení cestující v zastávce skrz soupravu segmentů. Děje se tomu tak v Praze i u spřažených souprav T3. Domnívám se tedy že u nespojených segmentů by k této nebezpečné činnosti docházelo velmi často.

Jedno možné základní řešení následně uvedu: Mezi články by byla umístěná čidla např. fotobuňky, která při zastavení vozidla snímají prostor mezi segmenty. Pokud by čidla v hlídaném prostoru zjistila osobu, houkačka či silný reproduktor by vydal hlasitý varovný signál. Vozidlo by se nemohlo rozjet, dokud by daná osoba neopustila tento prostor. Je velmi pravděpodobné, že by mohlo docházet k cílené sabotáži jízdy takto virtuálně spřažených vozidel. Tento čin by mohl být eliminován umístěním bezpečnostních kamer rozpoznávajících obličeje do těchto prostorů a následným pokutováním pachatelů.

## 8.4. Virtuální spřáhlo

Jak již bylo dříve zmíněno, vozidlo bude vybavené virtuálním spřáhlem. Důvod použití tohoto systému byl již vysvětlen. V této podkapitole je stručně popsán princip již testovaného systému:

Společnost CAF v roce 2017 představila první implementaci zařízení „Virtual Coupling“ na dvou plně funkčních tramvajích během mezinárodní výstavy InnoTrans. [27] Hlavním důvodem vzniku tohoto projektu však nejsou moderní tramvaje, ale železniční vozidla. Na železnici se totiž pravidelně vyskytuje mnoho různých typů vozidel, mezi nimiž není možné mechanické spřažení. Tento problém je především u starých vozidel. Proto je výhodné využít virtuální spřáhlo, které nevyžaduje stejné spřahovací ústrojí. Nicméně zásadní přínos by mělo i pro koncept segmentové tramvaje.

Skrze virtuální spřáhlo se přenáší informace pro ovládání např. pohonů, brzd, dveří, světel nebo informací pro cestující a o cestujících. Řízení vzdálenosti mezi vozidly je dosaženo fúzí dat ze senzorů a přenášením informací mezi oběma tramvajemi. Přenos je realizován prostřednictvím LTE signálu vycházejícího z modemu společnosti HUAWEI. [27]



Obrázek 73. Spřažené tramvaje Urbos 3 společnosti CAF při testování virtuálního spřáhla. [32]

Testovací vzdálenost mezi vozidly na Obrázku 62 je 6 m. Nepředpokládá se však, že by toto byla jediná možná vzdálenost.<sup>13</sup> Pro soupravu skládanou ze segmentů by to bylo zcela nepřijatelné.





<sup>13</sup> Pro detailnější informace lze shlédnout video: <https://vimeo.com/291454771>

Vývoj virtuálního spřáhlo vzniká v rámci iniciativy Shift2Rail, [28] tudíž se na něm podílejí i jiné společnosti než pouze CAF. Virtuální propojení vlaků bude v příštích letech pravděpodobně významným způsobem ovlivňovat železniční provoz především zvýšením flexibility a kapacity.

**Závěr:** Tato technologie v reálném provozu ještě není zcela odzkoušená. Konkrétní výsledky nejsou zveřejněné, nelze tedy vyvodit žádný konkrétní závěr. Lze pouze konstatovat okrajové podmínky systému: Především musí být kladen důraz na přesné a rychlé předávání informací mezi jednotlivými segmenty. Je nutné, aby docházelo k naprosto minimálnímu prodloužení brzdění jednotlivých článků. Pokud by první segment soupravy, jedoucí rychlostí 50 km/h tj. 13,9 m/s, detekoval překážku, začal brzdit a předal informaci poslednímu článku se zpožděním, byť jen 1 s, následky by byly fatální. Vystává zde tedy i otázka, zda vozidlo virtuálně spřažené bude schopné provozu v takové rychlosti, při navržených - malých rozestupech<sup>14</sup>.

## 9. SWOT analýza

V závěru teoretické části analyzuji autonomní segmentovou tramvaj ve SWOT analýze, která popisuje: S -Strengths (Silné stránky), W-Weaknesses (Slabé stránky), O -Opportunities (Příležitosti), T - Threats (Hrozby). Pro porovnání byl zvolen elektrobus-midibus, který je rozměrově srovnatelný.

	POMOCNÉ K dosažení cíle	ŠKODLIVÉ K dosažení cíle
VNITŘNÍ prostředí	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Vedení vozidla v kolejích</li> <li>○ Převážně vlastní trať</li> <li>○ Velká kapacita – možnost vytvářet velké soupravy (až 5 segmentů)</li> <li>○ Valivý odpor kolejového vozidla</li> <li>○ Elektrická trakce</li> <li>○ Jednoduše řešené napájení = více alternativ napájení (v porovnání se silničním vozidlem)</li> <li>○ Možnost použití neadhezní brzdy (kolejnicová brzda)</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Schopnost jízdy pouze v kolejové trati</li> <li>○ Hmotnost vozidla – podvozků</li> <li>○ Adhezní podmínky – zábrzdňá dráha</li> <li>○ Stoupavost</li> <li>○ Průjezd obloukem malých poloměrů</li> <li>○ Váha nosné struktury</li> </ul> 
VNĚJŠÍ prostředí	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nové technologie</li> <li>○ Ekologičnost</li> <li>○ Rozvoj MHD</li> <li>○ Dotace</li> <li>○ Jeden typ vozidla pro všechny města</li> <li>○ Důvěra cestujících ve vedené autonomní vozidlo =&gt; + pro marketing</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Silnější kapitál automotive společností, jejichž dceřiné firmy často produkují autobusy, elektrobusy – silný marketing</li> <li>○ Nedůvěra cestujících v autonomní provoz</li> <li>○ riziko požáru, bezpečnost v případě požáru</li> <li>○ Konkurenceschopnost Carsharingu</li> </ul> 

<sup>14</sup> V kapitole 11. je rozestup článků popsán.

## PRAKTICKÁ ČÁST

Přehled praktické (výpočetní) části Diplomové práce.

- Rozměrová rozvaha
- Kinematika jízdy obloukem
  - úhel náběhu – omezení prostoru interiéru
  - průjezd obloukem
  - natáčení podvozků
- Hmotnostní bilance
- Nápravové zatížení, návrh vypružení, bezpečnost proti vykolejení
- Trakční charakteristiky vozidla
- Model v programu MBS SIMPACK

Aby vozidlo bylo konkurenceschopné, musí být modulární a univerzální tak, aby mohlo být provozováno ve městech s odlišnými traťovými parametry. Pro tuto DP byly stanoveny okrajové podmínky, které jsou určené pro vozidla v Praze.

Níže je uvedena tabulka se základními parametry charakterizujícími Segmentovou tramvaj.

### Základní parametry vozidla

Uspořádání pojezdu vozidla:	A' A'
Rozchod	1435 mm
Celková délka vozidla	11 000 mm
Rozvor	8 000 mm
Šířka vozidla	2 400 mm +
Výška vozidla	3 400 mm
Max. nápravové zatížení	10 t
Trakční výkon	180 kW
Max. provozní rychlost	70 km/h
Průměr nových kol	650 mm
Průměr opotřeбенých kol	610 mm
Kapacita	68
Provedení	obousměrné
Aktivně natáčené podvozky	2 x
Zdroj energie	baterie
Brzda EDB, kotoučová, kolejnicová	

Tabulka 16. Parametry SAT.

## 10. Rozměrové omezení vozidla

Kapitola popisuje kinematické vlastnosti vozidla z hlediska zástavbových rozměrů a dále z hlediska legislativních omezení.

### 10.1. Úhel natočení dvojkolí vůči spodku vozidla

Úhel natočení dvojkolí vůči spodku vozidla je velmi podstatný parametr. Velikost tohoto úhlu poskytuje představu o prsotoru, do něhož nesmí zasahovat žádný díl jiné konstrukční skupiny nežli podvozku. Pro tento účel je využit vzorec **(1)**, který popisuje geometrickou závislost úhlu natočení dvojkolí (v tomto případě nápravnice s koly) s rozvorem, poloměrem oblouku a vřelí kolejového kanálu. Ze vzorce vyplývá, že největší natočení podvozku bude v oblouku s nejmenším poloměrem:

$$\alpha_n = \frac{p}{2 \cdot R} + \frac{y}{p} \quad (1)$$

Kde:

- p ... rozvor vozidla
- y ... příčná vřle v kolejnicovém kan
- R ... poloměr oblouku

V případě mého vozidla:

- p = 8 m
- y = 55 mm
- R = 20 m, 25 m

$$y_{max} = 2\sigma^* = 55 \text{ mm}$$

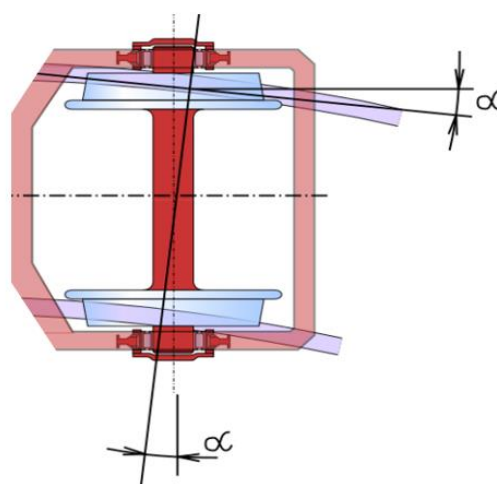
Pro:

$$R = 20 \text{ m}$$

$$\alpha_n = \frac{8}{2 \cdot 20} + \frac{0,055}{8} = 0,21 \text{ rad} = 11,85^\circ$$

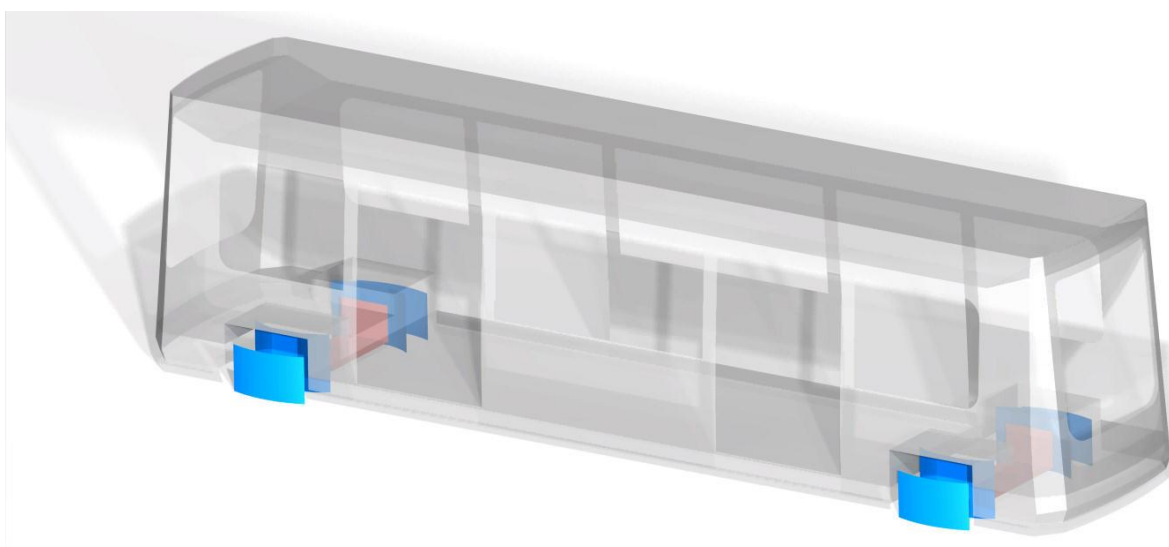
$$R = 25 \text{ m}$$

$$\alpha_n = \frac{8}{2 \cdot 25} + \frac{0,055}{8} = 0,17 \text{ rad} = 9,56^\circ$$



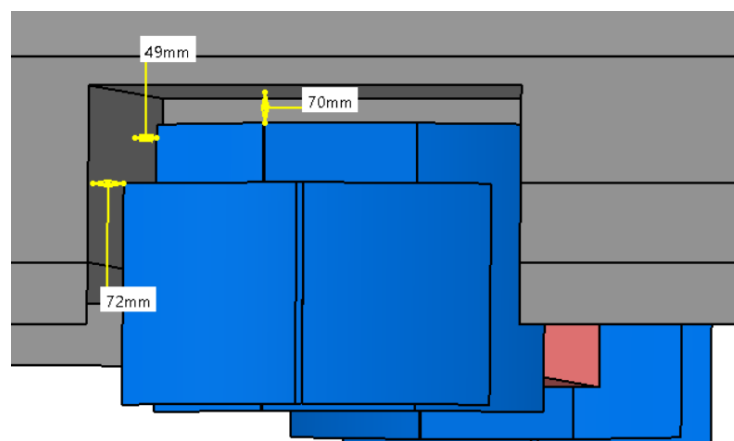
Obrázek 74. Úhel náběhu-natočení podvozku. [33], [autor DP]

## 10.2. natáčení podvozků



Obrázek 75. Obálková metoda pohybu podvozků. [autor DP]

Díky zjištění úhlu natočení podvozků, lze vytvořit vnější obálku pohybu podvozku. Modrá barva představuje pohyb kol a motoru. Vnitřní modrá plocha znázorňuje pohyb kol, vnější pohyb motoru. Červená barva představuje nápravnici. Obálka nezohledňuje kývání skříně ani žádný jiný pohyb skříně. Maximální výkyv skříně není u běžných kolejových vozidel velký natolik, aby došlo ke kontaktu s podvozkem. Tzn. že by mezera 70 mm viz obr. 76. byla nedostatečná. Prostor pro umístění kol má rozměry: 750 x 1000 mm (v x š).



Obrázek 76. Pohled na zástavbový prostor pro podvozek z boku. [autor DP]

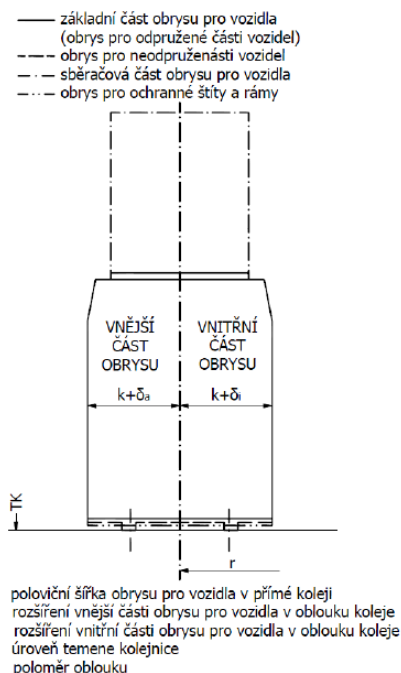
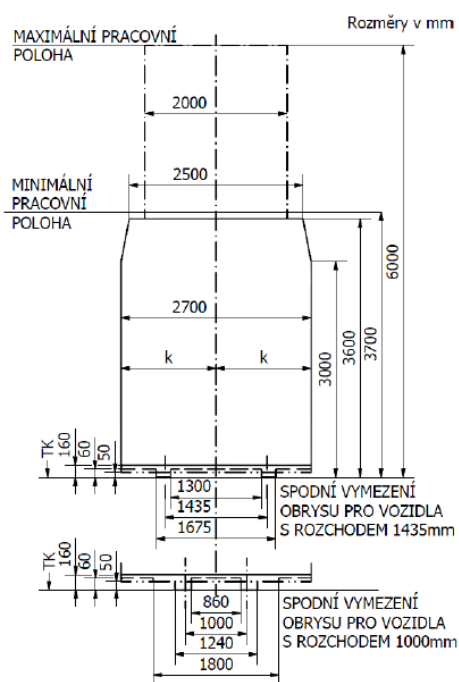
Prostor pro podvozky bývá zpravidla zvenku vybaven krytem, který chrání podvozek před okolím. Kryt bývá připevněn, většinou na rám podvozku. To znamená, že se natáčí společně s podvozkem. Pro tento kryt nabízí navržený zástavbový prostor dostatek místa. Kryt dotváří celkový design vozidla.

### 10.3. Rozměrové ověření dle ČSN 28 0318

Pro ověření zvolených rozměrů je využita norma ČSN 28 0318. Ověření je realizováno grafickou metodou v CAD programu a poté výpočtetně. Pro grafickou i výpočtetní metodu je zvolen oblouk o poloměru: 20 m, což je dle kapitoly 7, nejmenší poloměr oblouku v Praze.

**Rozměrové ověření se provádí ve dvou polohách:**

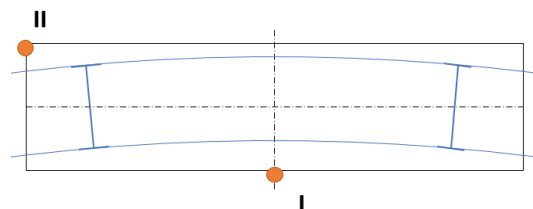
- 1) V přímé koleji – vozidlo stojí v nejnepříznivější poloze na přímé vodorovné koleji, žádná jeho součást kromě směrových světel nesmí překročit obrys vozidla v přímé koleji.
- 2) V oblouku – vozidlo stojí v klidu na vodorovném oblouku v nejnepříznivější poloze, žádná jeho součást kromě směrových světel nesmí překročit obrys vozidla v oblouku.



Obrázek 77. Obrys pro vozidlo v přímé trati. [34]

Obrázek 78. Obrys pro vozidla v oblouku koleje. [34]

V oblouku je kontrolováno vybočení vnitřní ( $E_i$ ) a vnější ( $E_a$ ) v bodě, kde se předpokládá nebo je nejrizikovější místo. Vzhledem k volbě parametrů pojezdu a skříně vozidla je z grafického řešení zřejmé, že bude vybočovat především ve vnitřní části oblouku, tedy v kritickém místě I. Pro úplnost jsou uvedeny i výpočty vnějšího vybočení v kritickém místě II.



Obrázek 79. Obrys vozidla. [autor DP]

$$E_i = \frac{2 \cdot e \cdot l_0 - l_0^2}{2 \cdot r} + d + \frac{p^2}{8 \cdot r} + b \quad (2)$$



- Kde:  $E_i$  ... Vnitřní vybočení – vzdálenost bodu povrchu vozidla v prostoru mezi otočnými čepý, měřená od osy obrysu pro vozidla směrem dovnitř oblouku koleje.
- $e$  ... Poloviční vzdálenost otočných čepů.
- $l_0$  ... Vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od roviny příčného řezu v místě otočného čepu.
- $r$  ... Poloměr oblouku.
- $d$  ... Maximální možný radiální posuv skříně vozidla nad dvojkolím po vyčerpání všech možných vůlí při statické poloze.
- $p$  ... Rozvor podvozku.
- $b$  ... Vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od podélné osy vozidla.

#### Podmínka pro vnitřní vzdálenost bodů povrchu vozidel

$$E_i \leq k + \delta_i$$

- Kde:  $k$  ... Poloviční šířka obrysu pro vozidla v přímé koleji;  
 $\delta_i$  ... Rozšíření vnitřní části obrysu pro vozidla v oblouku koleje.

$$E_a = \sqrt{r^2 + b^2 + l_s^2 - q^2 - e^2 + e^2 \cdot d_a^2 + d_a \cdot 2l_s \cdot \sqrt{r^2 - q^2} + 2b \cdot \sqrt{r^2 - q^2 - e^2} \cdot \sqrt{1 - d_a^2}} - r \quad (3)$$

- Kde:  $E_a$  ... Vnější vybočení – vzdálenost bodu povrchu vozidla v prostoru vně otočných čepů, měřená od osy obrysu pro vozidla směrem vně oblouku
- $l_s$  ... Vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od roviny příčného řezu vozidla procházející středem vzdálenosti otočných čepů
- $q$  ... Poloviční rozvor podvozku.
- $d_a$  ... Poměrná vůle  $d_a = \frac{d}{e}$

Poloměr oblouku osy koleje r [m]	Rozšíření vnější části obrysu pro vozidla v oblouku $\delta a$ [mm]	Rozšíření vnitřní části obrysu pro vozidla v oblouku $\delta i$ [mm]	Celková šířka obrysu pro vozidla v oblouku [mm]
18	650	310	3 660
20	650	310	3 660
22	600	280	3 580
25	530	235	3 465
30	440	185	3 325
35	380	150	3 230
40	330	125	3 155
45	290	105	3 095
50	260	85	3 045
75	165	35	2 900
100	115	10	2 825
150	65	5	1770
200	45	0	2745

**Dosazení do vzorců (2) a (3) v [mm]:**

$e$	$l_0$	$r$	$d$	$p$	$l_s$	$q$	$d_a$
4000	4000	19970	45	8000	1500	0	$\frac{45}{4000}$

Vnitřní vybočení:

$$E_i = \frac{2 \cdot 4000 \cdot 4000 - 4000^2}{2 \cdot 19970} + 45 + \frac{0^2}{8 \cdot 19970} + 1200 = 1645 \text{ mm}$$

Vnější vybočení:

$$E_a = \sqrt{r^2 + b^2 + l_s^2 - q^2 \cdot e^2 + e^2 \cdot d_a^2 + d_a \cdot 2l_s \cdot \sqrt{r^2 - q^2} + 2b \cdot \sqrt{r^2 - q^2 - e^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{d_a^2}{4000^2}} - r}$$

$$= \sqrt{19970^2 + 1200^2 + 4000^2 - 0^2 - 4000^2 \cdot \left(\frac{45}{4000}\right)^2 + \frac{45}{4000} \cdot 2 \cdot 4000 \sqrt{19970^2 - 0^2} + 2 \cdot 4000 \cdot \sqrt{19970^2 - 0^2 - 4000^2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{45}{4000}\right)^2} - 19970 = 1246 \text{ mm}$$

Kritické místo I	Kritické místo II
$E_i \leq k + \delta_i$	$E_a \leq k + \delta_a$
$E_i \leq 1350 + 310$	$E_a \leq 1350 + 650$
$E_i = 1660 \text{ mm}$	$E_a = 2000 \text{ mm}$
$1645 < 1660$	$1246 < 2000$
<b>SPLŇUJE</b>	<b>SPLŇUJE</b>

Tabulka 17. Výsledky výpočtů dle ČSN ČSN 28 0318.

Jak již bylo dříve podotknuto vozidlo vybočuje především směrem do středu oblouku. Z tohoto důvodu nemá smysl tramvaj na čelních částech (místo II.) zužovat. Případné zúžení by mohlo být uskutečněno z designerských důvodů.

#### Další možné varianty uspořádání vozidla:

Nabízí se zde uvést další varianty uspořádání vozidla tak, aby vyhovovalo normě ČSN 28 0337 pro  $R_{min} = 20m$ , za předpokladu, že vozidlo prizmatické.

Šířka skříně [mm]	Max. rozvor p podvozku [mm]	$E_a$ [mm] pro p max	$E_i$ [mm] pro p max	Rozvor pro který platí $E_a = E_i$ [mm]
<b>2650</b>	6800	1436	1660	5320 (1546)
<b>2500</b>	7640	1313	1660	5330 (1422)
<b>2400</b>	8150	1239	1660	5340 (1348)

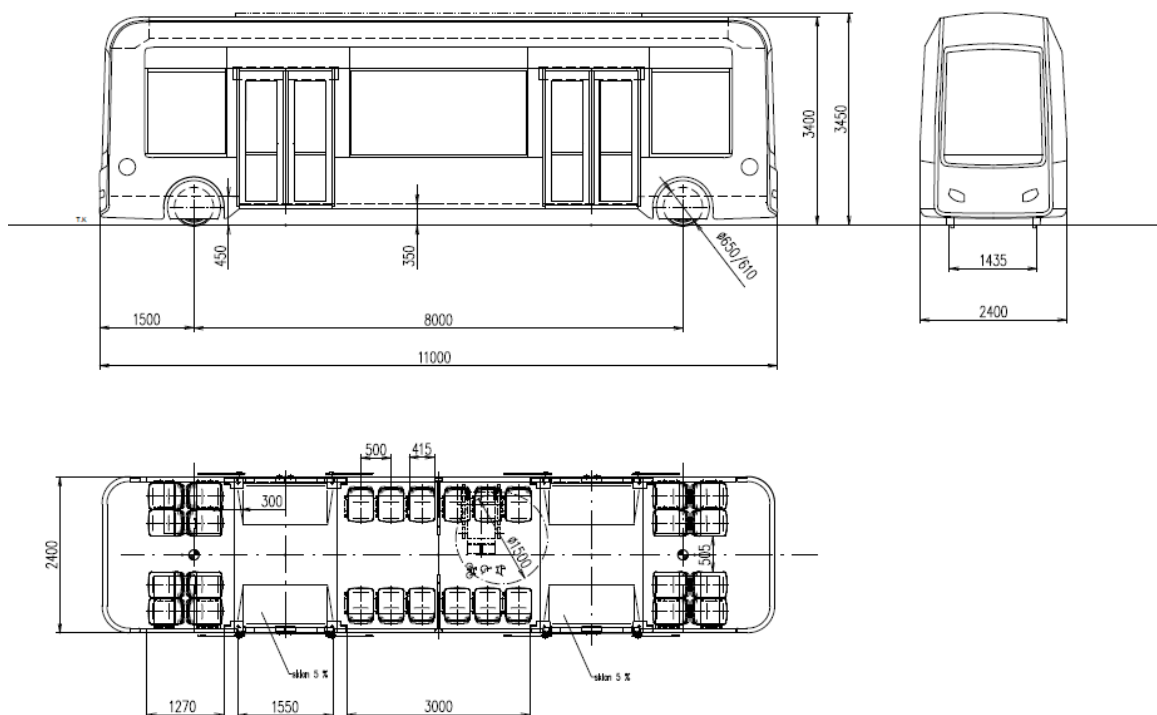
Tabulka 18. Porovnání dalších rozměrových uspořádání.

Z hlediska provozu, kde jezdí více druhů vozidel, je velmi výhodné, pokud vozidlo vybočuje stejně dovnitř i vně oblouku. (Viz druhý sloupec tabulky. pozn. Hodnota v závorce je přesah dovnitř, či vně lišící se po zaokrouhlení max. o +2 mm).

## 11. Uspořádání vozidla

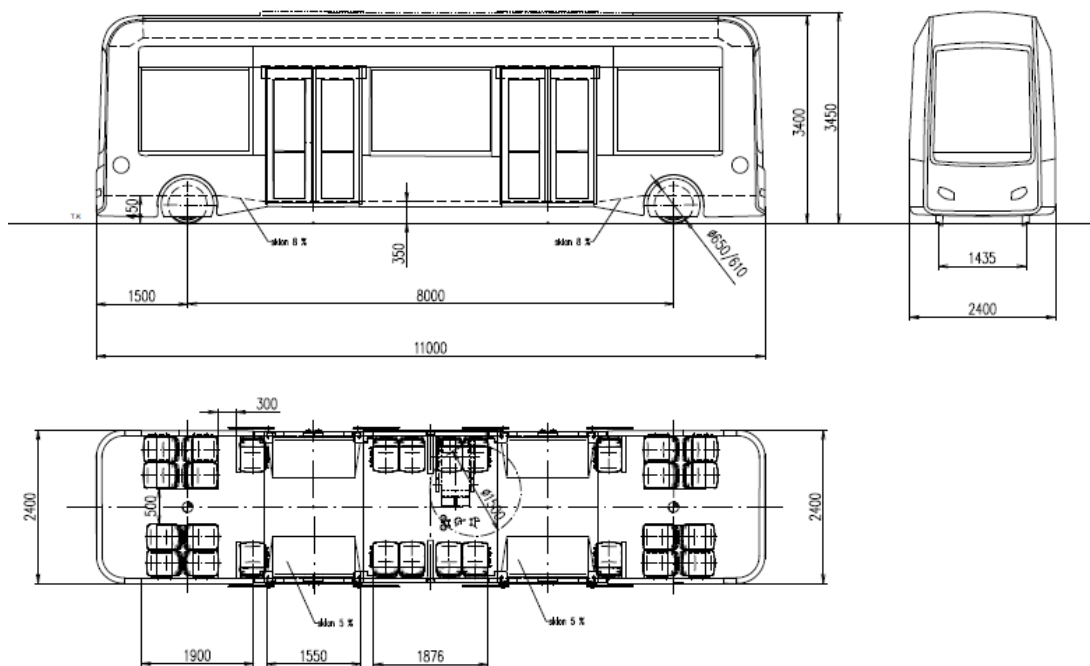
### 11.1. Typový výkres

Varianta s delším prostředním oknem.



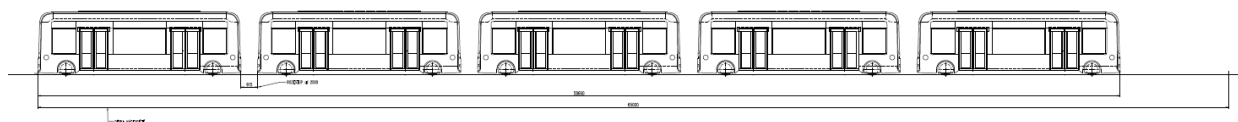
Obrázek 80. Typový výkres uspořádání vozidla s delším středním oknem. [autor DP]

Varianta s kratším prostředním oknem



Obrázek 81. Typový výkres uspořádání vozidla s kratším středním oknem. [autor DP]

## Souprava pěti segmentů:



Obrázek 82. Souprava pěti segmentů. [autor DP]

Na obrázku je zobrazená souprava pěti segmentových tramvají. Maximální počet vozidel v soupravě je omezen délkou nástupiště, která je cca 65 m. Rozestup vozidel je 900 mm, ovšem pro uvedenou délku nástupiště by mohl být až 2500 mm. Délka soupravy pěti segmentů je tedy 58,6.

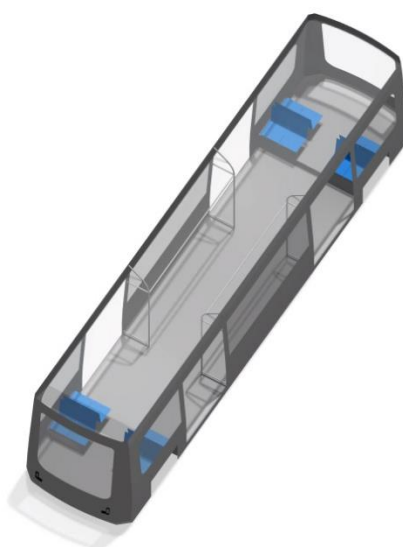
### 11.2. Varianty uspořádání vozidla

Kapitola popisuje různé varianty uspořádání interiéru vozidla. Způsob výpočtu nápravového zatížení a hmotnostního poměru je konkrétně uveden až v kapitole 12. Pro úplnost přehledu jednotlivých variant uvádím tyto hodnoty již v této kapitole.

Konečné hodnoty hmotnostního poměru prázdné vozidlo/cestující jsou ještě nižší než v této části uváděné, jelikož hmotnost trakčních baterií byla v této fázi odhadnuta na 2 t. V rámci kapitoly 17 – návrh trakčních baterií, bylo vypočteno, že pro zvolený jízdní cyklus Segmentové tramvaje stačí pouze 0,87 t. Úspora oproti odhadu tedy je 1,13 t, což představuje 9,5 % prázdného vozidla.

#### 11.2.1. Varianta 1

Vozidlo má být, co nejvíce univerzální. Proto se nabízí, aby si zákazník mohl zcela sám zvolit, jak bude vypadat uspořádání sedaček ve vozidle. Z toho hlediska se jeví tato varianta jako optimální výchozí varianta.

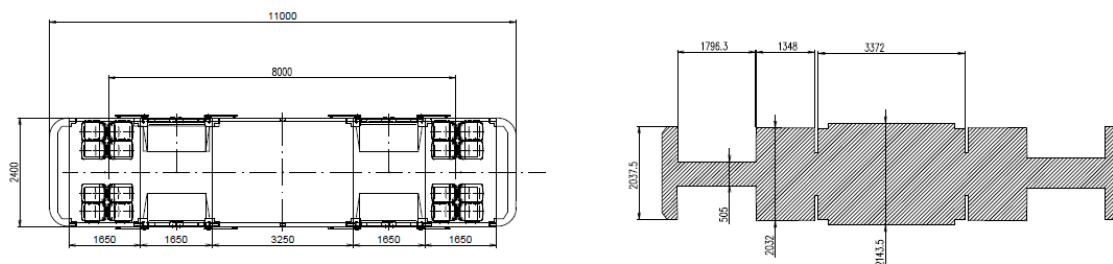


Obrázek 83. Uspořádání vozidla - varianta 1. [autor DP]

Počet sedících	<b>16</b>
Počet stojících $\left(\frac{4os}{m^2}\right)$	62
Celkově cestujících	<b>78</b>
Počet stojících $\left(\frac{8os}{m^2}\right)$	104
Nápravové zatížení	97 kN
Hmotnostní poměr vozidlo/cestující	1,89

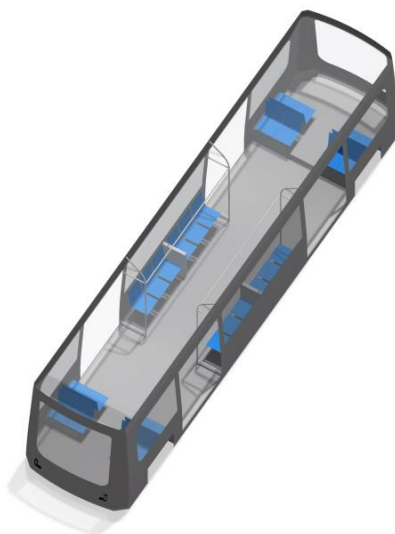
Plocha	#cestujících
<b>st1</b>	4
<b>st2</b>	6
<b>st3</b>	19
<b>st4</b>	46
<b>st5</b>	19
<b>st6</b>	6
<b>st7</b>	4

Tabulka 19. Parametry uspořádání - varianta 1



Obrázek 84. Půdorys uspořádání - varianta 1. [autor DP]

### 11.2.2. Varianta 2

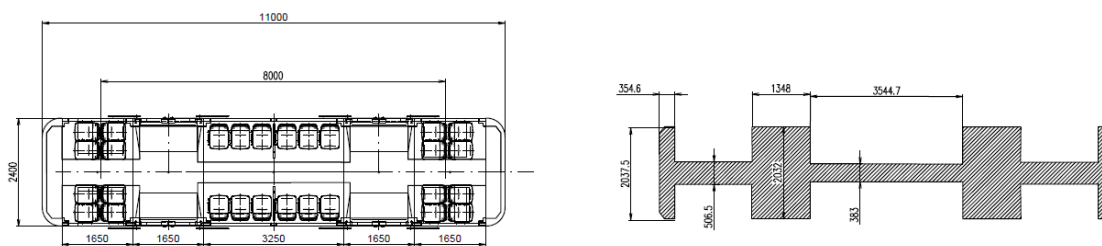


Obrázek 85. Uspořádání vozidla - varianta 2. [autor DP]

Počet sedících	<b>28</b>
Počet stojících $\left(\frac{4os}{m^2}\right)$	40
Celkově cestujících	<b>68</b>
Počet stojících $\left(\frac{8os}{m^2}\right)$	66
Nápravové zatížení	88,2 kN
Hmotnostní poměr vozidlo/cestující	2,2

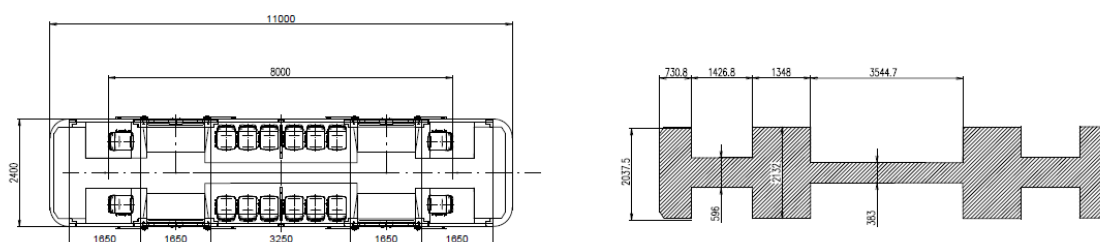
plocha	#cestujících
<b>st1</b>	5
<b>st2</b>	7
<b>st3</b>	19
<b>st4</b>	11
<b>st5</b>	19
<b>st6</b>	7
<b>st7</b>	5

Tabulka 20. Parametry uspořádání - varianta 2.



Obrázek 86. Půdorys uspořádání - varianta 2. [autor DP]

### 11.2.3. Varianta 3

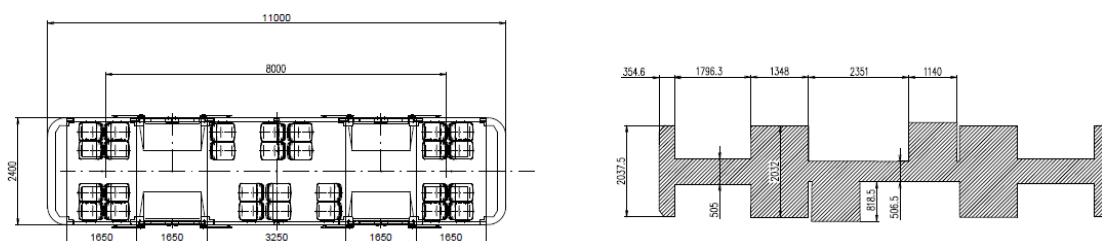


Obrázek 87. Půdorys uspořádání - varianta 3. [autor DP]

Počet sedících	16	plocha	#cestujících
Počet stojících $\left(\frac{4os}{m^2}\right)$	46	<b>st1</b>	10
Celkově cestujících	62	<b>st2</b>	6
Počet stojících $\left(\frac{8os}{m^2}\right)$	78	<b>st3</b>	19
Nápravové zatížení	87,4 kN	<b>st4</b>	9
Hmotnostní poměr vozidlo/cestující	2,37	<b>st5</b>	19
		<b>st6</b>	6
		<b>st7</b>	10

Tabulka 21. Parametry uspořádání - varianta 3

### 11.2.4. Varianta 4

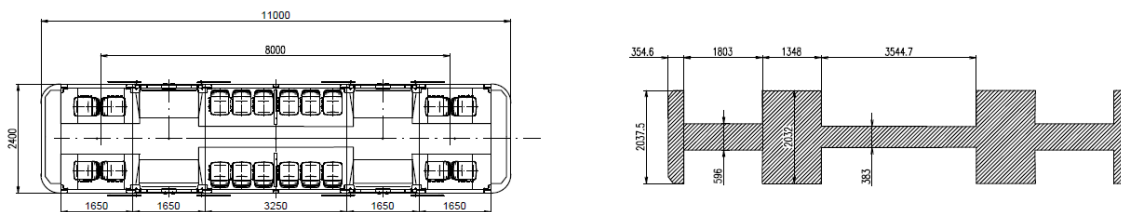


Obrázek 88. Půdorys uspořádání - varianta 4. [autor DP]

Počet sedících	24 (+4 sklopné)	plocha	#cestujících
Počet stojících $\left(\frac{4os}{m^2}\right)$	49	<b>st1</b>	4
Celkově cestujících	73	<b>st2</b>	6
Počet stojících $\left(\frac{8os}{m^2}\right)$	82	<b>st3</b>	19
Nápravové zatížení	93,8 kN	<b>st4</b>	24
Hmotnostní poměr vozidlo/cestující	1,94	<b>st5</b>	19
		<b>st6</b>	6
		<b>st7</b>	4

Tabulka 22. Parametry uspořádání - varianta 4.

### 11.2.5. Varianta 5



Obrázek 89. Půdorys uspořádání - varianta 5. [autor DP]

Počet sedících	20
Počet stojících ( $\frac{4os}{m^2}$ )	39
Celkově cestujících	66
Počet stojících ( $\frac{8os}{m^2}$ )	66
Nápravové zatížení	84,8kN
Hmotnostní poměr vozidlo/cestující	2,49

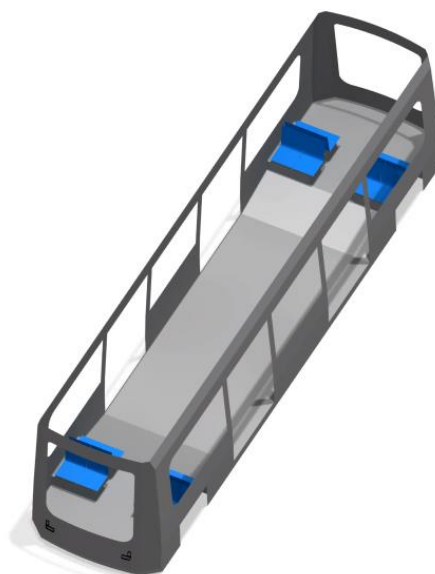
plocha	#cestujících
<b>st1</b>	4
<b>st2</b>	6
<b>st3</b>	19
<b>st4</b>	9
<b>st5</b>	19
<b>st6</b>	6
<b>st7</b>	4

Tabulka 23. Parametry uspořádání - varianta 5.

### 11.2.6. Varianta 6

**Varianta 6 a 7** se liší od předchozích variant délkou prostředního okna.

Viz typové výkresy.



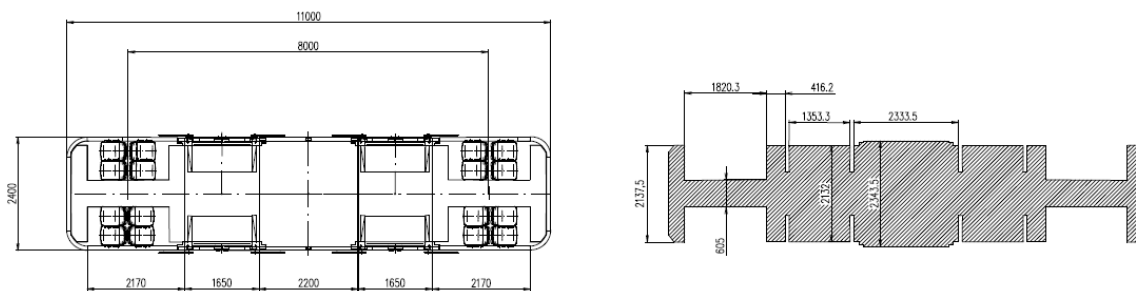
Obrázek 90. Uspořádání vozidla - varianta 6. [autor DP]

Počet sedících	16
Počet stojících ( $\frac{4os}{m^2}$ )	62
Celkově cestujících	78
Počet stojících ( $\frac{8os}{m^2}$ )	103
Nápravové zatížení	100,1
Hmotnostní poměr vozidlo/cestující	1,78

plocha	#cestujících
<b>st1</b>	4
<b>st2</b>	6
<b>st3</b>	28
<b>st4</b>	37
<b>st5</b>	28
<b>st6</b>	6
<b>st7</b>	4

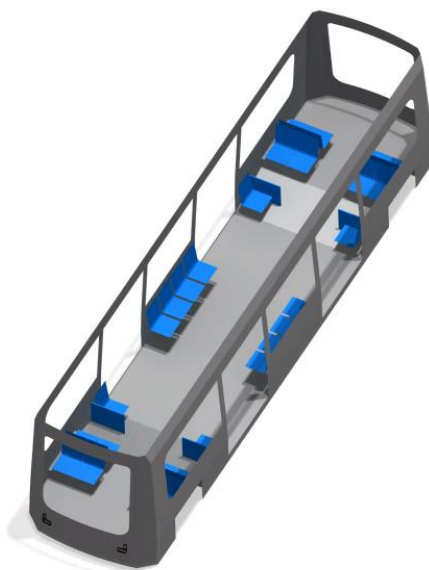
Tabulka 24. Parametry uspořádání - varianta 6.





Obrázek 91. Půdorys uspořádání - varianta 6. [autor DP]

### 11.2.7. Varianta 7

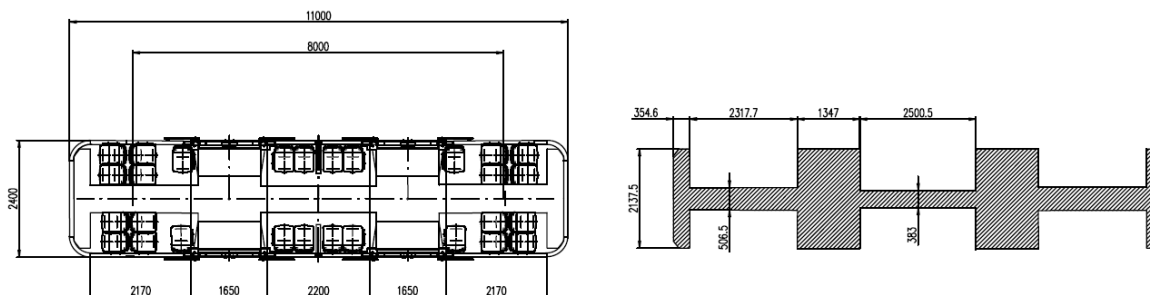


Obrázek 92. Uspořádání vozidla - varianta 2. [autor DP]

Počet sedících	28
Počet stojících ( $\frac{4os}{m^2}$ )	40
Celkově cestujících	68
Počet stojících ( $\frac{8os}{m^2}$ )	68
Nápravové zatížení	88,7kN
Hmotnostní poměr vozidlo/cestující	2,17

plocha	#cestujících
<b>st1</b>	4
<b>st2</b>	8
<b>st3</b>	19
<b>st4</b>	6
<b>st5</b>	19
<b>st6</b>	8
<b>st7</b>	4

Tabulka 25. Parametry uspořádání - varianta 7.



Obrázek 93. Půdorys uspořádání - varianta 7. [autor DP]

## 12. Hmotnostní bilance

Hmotnostní bilance je sestavena pomocí dat, poskytnutých společností ŠKODA TRANSPORTATION a.s. Výchozí inspirací je především prostřední článek tramvaje 15 T, který se rozměrově nejvíce podobá Segmentové tramvaji. Další inspirací je tramvajová platforma FCX, která je taktéž produktem ŠTRN.

Jednotlivé komponenty jsou rozdělené do konstrukčních podsestav 1-6 a dále jsou vypočtené jejich hmotnosti  $m_1 - m_6$ .

Pro studii proveditelnosti je provedeno zjednodušení, kde jsou podsestavy 1-4 uvažovány jako spojité zatížení. Tíha těchto podsestav je tedy rovnoměrně rozložena po celé délce tramvaje. Celková velikost tohoto zatížení je zobrazená v podsestavě 7.

U některých položek, např. bočnice, podlaha, je přepočítaná hmotnost z délky prostředního článku 15T - 9,6 m na délku Segmentové tramvaje - 11 m tak, aby bylo dosaženo přesnější hodnoty.

Při konzultaci ve ŠTRN mi bylo doporučeno, zredukovat hmotnost u mnoha konstrukčních podsestav minimálně o 10 %, jelikož od vzniku tramvaje 15 T došlo k hmotnostní optimalizaci některých podsestav. Zatížení z podsestavy 7 je tedy ve výpočtu sníženo o 10 %.

V zatížení od lidí  $m_6$ , je uvažovaná hmotnost osoby 75 kg. Označení  $s_1 - s_{16}$  zobrazuje sedící cestující. Jelikož jsou sedačky rozmístěny symetricky k rovině  $xz$  a je uvažováno maximální zatížení, jsou všechna „s“ shodná a pro výpočtový model se rovnají:  $2 \times 75$ , což je 150 kg.

Označení  $s_{t1} - s_{t7}$  zobrazuje plochy pro stojící cestující. Pro výpočet maximálního nápravového zatížení je uvažováno „zatížení 500 kg/m<sup>2</sup> volné podlahové plochy, což odpovídá 6,7 osob na m<sup>2</sup>. Tyto plochy a počet stojících cestujících na ně připadající jsou v předešlé podkapitole uvedeny u všech variant.

Zatížení vyvozené podvozky  $m_6$  je uvažováno jako jednotlivé síly působící v jednom bodě. Hmotnost podvozku pro výpočet nápravového zatížení je odhadnuta na 2125 kg.

---

Popis k nadcházející stránce – přehledu hmotností dílčích komponent:

Hmotnosti komponent přepočtené na délku Segmentové tramvaje.	Hmotnosti komponent z tramvaje 15T a Platformy FCX.
<b>A</b>	<b>B</b>

		<b>A</b> ↓	<b>B</b> ↓
		[kg]	[kg]
<b>1</b>	<b>Hrubá stavba (<math>m_1</math>)</b>		
	spodek	1371,6	1197
	bočnice	371,3	324
		742,5	648
	doplňky HS	152,4	133
	čelnice	250,0	
	nýtovací matice v h. s.	7,8	6,8
	<b>CELKEM HRUBÁ STAVBA</b>	<b>2524,3</b>	1984,8
<b>2</b>	<b>Dokončení hrubé stavby (<math>m_2</math>)</b>		
	oplaštění hr. S.	215,3	187,9
	doplňky d. h. s.	5,8	5,1
	střecha	564,8	492,9
	<b>CELKEM DOKONČENÍ H. S.</b>	<b>785,9</b>	
<b>3</b>	<b>vnitřní vybavení (<math>m_3</math>)</b>	1181	
	Okna		
		46	
		28,9	
		30	
	celkem	104,9	
	dveře		
		115	
		230	
	celkem	345	
	podlaha	301,4	263,1
	obložení interiéru	333,8	291,3
	topení, klimatizace	14	
	kabeláž uvnitř článku	30,4	26,5
	vnitřní osvětlení	144	
	sedadla		
		9	
		252	
	madla	50	
	informační panely	50	
	pískování	10,38	
	<b>CELKEM VNITŘNÍ VYBAVENÍ</b>	<b>1527,8</b>	
<b>4</b>	<b>vnější vybavení (<math>m_4</math>)</b>		
	brzda (rozvody)	33,6	
	zástěry a vnější krytí	24	
	kryty + rozvody přístrojů na střeše	135	
	vyhlazení výzbroje	15,8	
	Systém sběru proudu	50	
	kontejner klimatizace	49,5	
	trakční měnič	450	
	svorkovnice		
		6	
		12	
	baterie	2000	
	<b>CELKEME VNĚJŠÍ VYBAVENÍ</b>	<b>2723,1</b>	
<b>5</b>	<b>Zatížení od cestujících (<math>m_5</math>)</b>	5069	
<b>6</b>	<b>Podvozky (<math>m_6</math>)</b>	2125	
		4250	
<b>7</b>	<b>Tíha celkové zatížení pro q (<math>m_7</math>)</b>	6902	
<b>8</b>	<b>Celkové zatížení (<math>m_8</math>)</b>	18225	

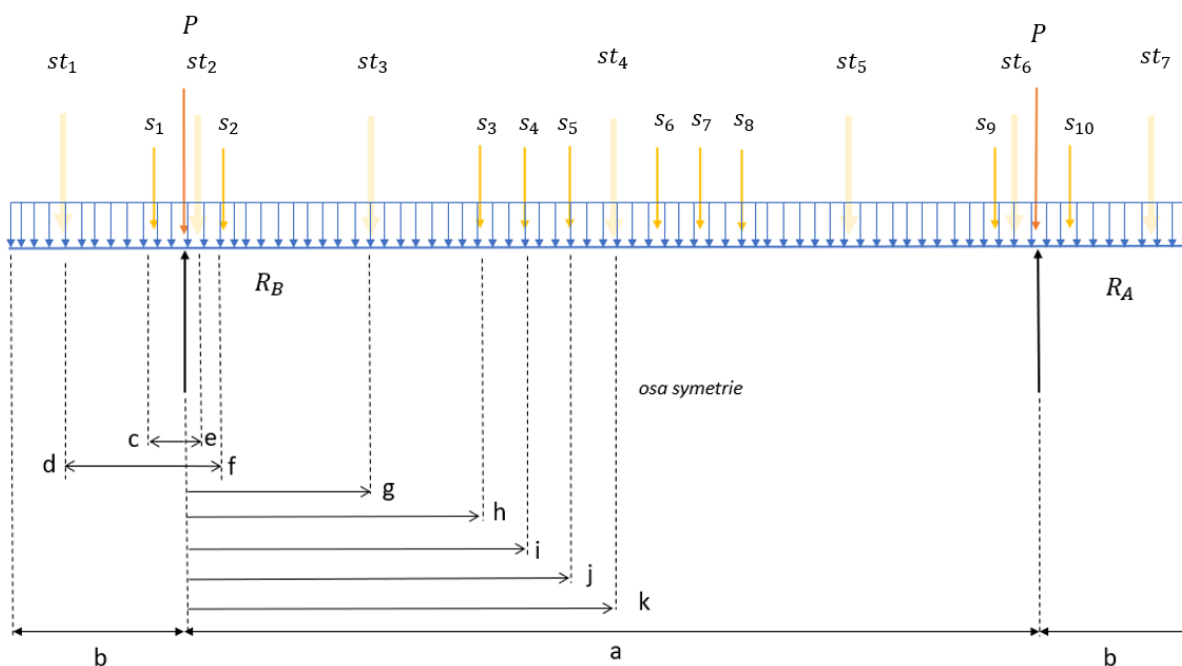
Tabulka 26. Hmotnostní bilance vozidla.

## 12.1. Nápravové zatížení

Tato podkapitola detailně popisuje výpočet druhé varianty uspořádání interiéru. Ostatní varianty uspořádání byly vypočteny stejným postupem.

Výpočetní schéma je zobrazené na obrázku 99. Níže jsou pak uvedené jednotlivé rozměry působišť sil.

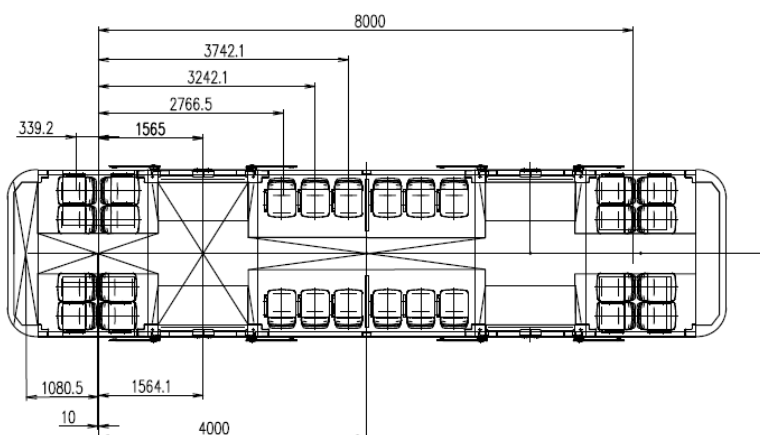
Varianty uspořádání prostoru pro cestující (viz dva typové výkresy) se liší pouze rozměry (c,d,e,f,g,h,i).



Obrázek. 94 Zjednodušené schéma zatížení segmentové tramvaje. [autor DP]

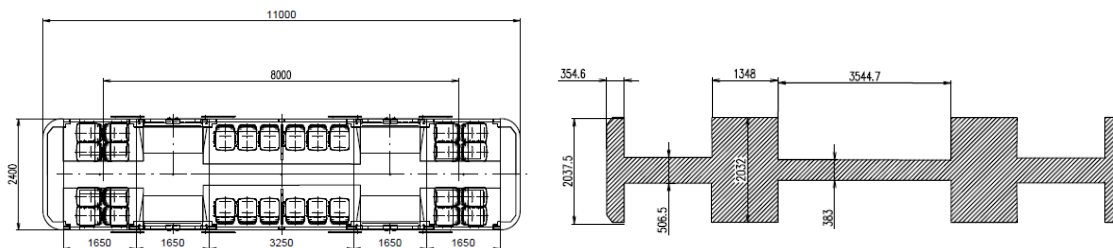
Rozměry [m]	
$l$	11,00
$a$	8,00
$b$	1,50
$c$	0,34
$d$	1,08
$e$	0,01
$f$	0,34
$g$	1,56
$h$	2,77
$i$	3,24
$j$	3,74

	Zatížení od stojících cestujících $st_1 - st_7$
	Zatížení od sedících cestujících $s_1 - s_{10}$
	Zatížení od podvozků ( $P$ )
	Reakce (nápravové zatížení $R_A, R_B$ )



Obrázek 95. Ramena na nichž působí síly. [autor DP]

## Zatížení od cestujících:



### sedící

	Počet sedaček-osob	Hmotnost [kg]	Zatížení [N]
nad podvozkem 1			
$s_1$	4	300	2943
$s_2$	4	300	2943
podélné (prostřední část)			
$s_3$	2	150	1472
$s_4$	2	150	1472
$s_5$	2	150	1472
$s_6$	2	150	1472
$s_7$	2	150	1472
$s_8$	2	150	1472
nad podvozkem 2			
$s_9$	4	300	2943
$s_{10}$	4	300	2943
<b>celkem sedících</b>	<b>28</b>	<b>21000</b>	<b>20601</b>

### stojící

	Plocha [ $m^2$ ]	Počet osob	Zatížení [N]
$st_1$	0,637	4	3139
$st_2$	0,871	6	4293
$st_3$	2,762	19	13616
$st_4$	6,939	9	6692
$st_5$	2,762	19	13616
$st_6$	0,871	6	4293
$st_7$	0,637	4	3139
<b>celkem stojících (<math>6,7/m^2</math>)</b>		<b>66</b>	<b>48787</b>

Celkové zatížení od cestujících:

$$\sum (s + st) = \sum_{n=1}^{10} s_n + \sum_{n=1}^7 st_n = 20\,601 + 48\,787 = 49\,728 \text{ N} \quad (4)$$

$$m_5 = \frac{\sum (s + st)}{9,81} = 5\,069 \text{ kg} \quad (5)$$

Celkové zatížení:

$$m_8 = m_5 + m_6 + m_7 = 18\,225 \text{ kg} \quad (6)$$

Výpočet spojitého zatížení:

$$m_7 = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = 6\,902 \text{ kg} \quad (7)$$

$$q = \frac{m_{(7)} \cdot g}{1} = \frac{6902 \cdot 9,81}{11} = 61\,555,5 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (8)$$

Momentová rovnice k druhému dvojkolí:

$$R_A \cdot a = q \cdot \frac{(a+b)^2}{2} - q \cdot \frac{b^2}{2} - s_{t1} \cdot d - s_1 \cdot c + s_{t2} \cdot e + s_2 \cdot f + s_{t3} \cdot g + s_3 \cdot h + s_4 \cdot i + s_5 \cdot j + s_{t4} \cdot k + s_6 \cdot (a-j) + s_7 \cdot (a-i) + s_8 \cdot (a-h) + s_{t5} \cdot (a-g) + s_9 \cdot (a-f) + s_{t6} \cdot (a-e) + P \cdot (a) + s_{10} \cdot (a+c) + s_{t7} \cdot (a+d) \quad (9)$$

Dosazení do momentové rovnice:

$$R_A \cdot 8 = 61555,5 \cdot \frac{(8,00 + 1,5)^2}{2} - 61555,5 \cdot \frac{(1,5)^2}{2} - 3139 \cdot 1,08 - 2943 \cdot 0,34 + 4293 \cdot 0,01 + 2943 \cdot 0,34 + 13616 \cdot 1,56 + 1472 \cdot 2,77 + 1472 \cdot 3,24 + 1472 \cdot 3,74 + 6692 \cdot 4 + 1472 \cdot (8 - 3,74) + 1472 \cdot (8 - 3,24) + 1472 \cdot (8 - 2,77) + 13616 \cdot (8 - 1,56) + 2943 \cdot (8 - 0,34) + 4293 \cdot (8 - 0,01) + 20846 \cdot + 2943 \cdot (8 + 0,34) + 3139 \cdot (8 + 1,08) = 715\,166 \text{ N}$$

$$R_A = \frac{715166}{8} = 89\,396 \text{ N} = 89,4 \text{ kN} \quad (10)$$

$$R_B = m_{celk} \cdot g - R_A = 178791,4 \cdot 9,81 - 89396 = 89396 \text{ N} = 89,4 \text{ kN} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} R_A &= R_B = 89,4 \text{ kN} \\ R_A &= R_B = 9,11 \text{ t} \end{aligned} \quad (12)$$

Hodnoty  $R_A$  a  $R_B$  představují nápravové zatížení dvojkolí. Z výpočtu je zřejmé, že zatížení vyhovuje požadavkům pro provoz vozidel v pražské tramvajové síti. (Pozn. Max. 10 t/nápravu).

Hmotnostní poměr vozidlo/cestující:

$$\frac{m_6 + m_7}{m_5} = \frac{11\,152,2}{5\,069,1} = 2,2 \quad (13)$$

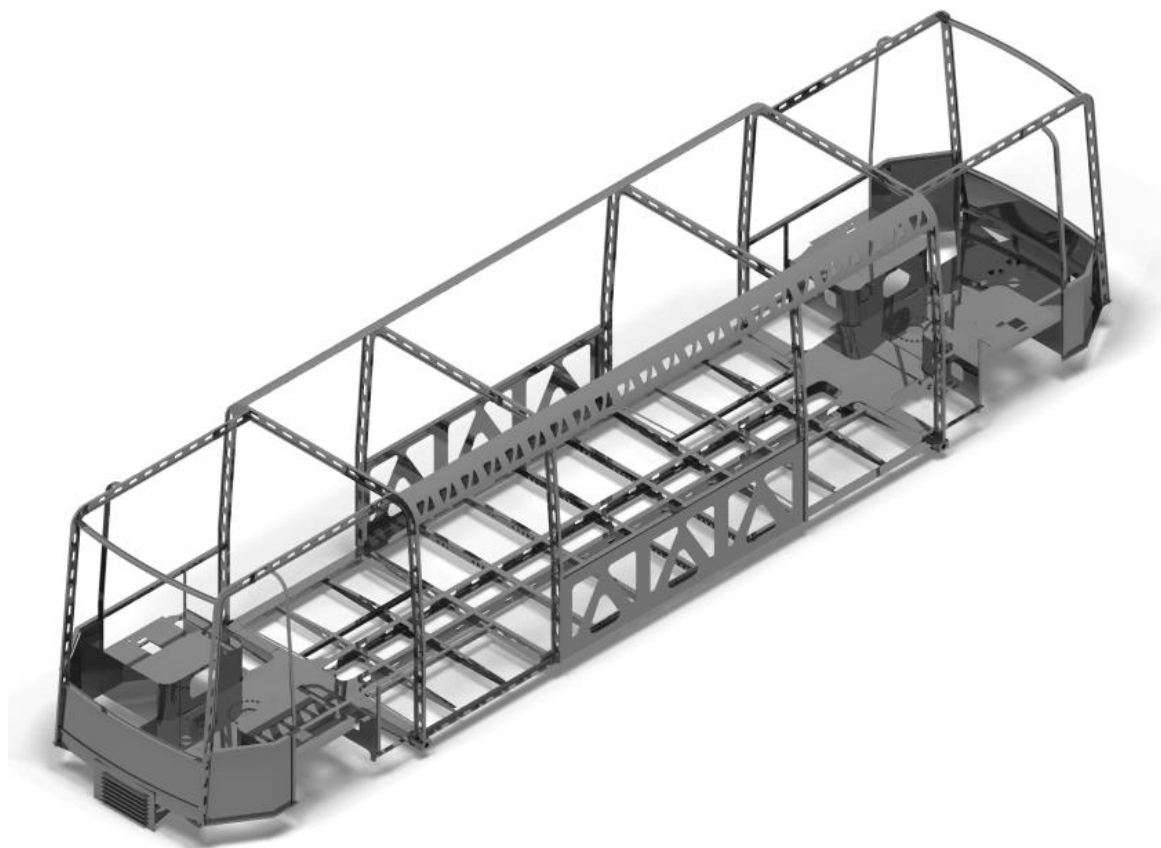
---

*Pozn.* V podkapitole 11.2.1, kde zmiňuji nejvíce možné obsazené vozidlo vychází nápravové zatížení 9,7 kN (9,89 t). Tato extrémní varianta tedy také vyhovuje. Zákazník si tedy de facto může volit uspořádání sedaček zcela libovolně. Výjimkou jsou sedačky nad podvozky, které nelze jinak uspořádat z důvodu zástavbového prostoru podvozků viz kapitola 10.1.

## 13. Dílčí sestavy vozidla

V následující kapitole jsou uvedeny dvě konstrukční sestavy popisující základní možné uspořádání Segmentové tramvaje: hrubá stavba a elektrická výzbroj.

### 13.1. Hrubá stavba vozidla



Obrázek 96. Návrh hrubé stavby Segmentové tramvaje. [autor DP]

Jak již bylo zmíněno v úvodu DP, vozidlo by mělo být co nejjednodušší, ale zároveň musí splňovat všechny pevnostní a crashové požadavky. Právě kvůli crashovým požadavkům a ne příliš osvědčené hliníkové stavbě, volím pro studii proveditelnosti poměrně konzervativní diferenciální ocelovou konstrukci. Pro tento základní návrh je využit spodek tramvaje 15T poskytnutý z ŠT. Dále je modifikován tak, aby vyhovoval rozvoru a oboustranému provozu. Tedy dveřím na obou stranách vozidla. Spodek se skládá ze dvou hlavních příčníků z U profilů a dvou L profilů umístěných na krajích vozidla. Mezi příčníky je umístěno 10 podélníků. Podélníky v oblastech dveří jsou zkoseny tak, aby vytvářely rampu pro vstup do vozidla. Všechny čtyři podélníky jsou ukotveny v příčniku, který je součástí segmentu nad podvozky. Tento segment je svařenec, do kterého jsou uloženy podvozky přes otočové ložisko. Na konci tohoto segmentu je protišplh přesahující až do kostry čela.

Kostra bočnice se skládá ze čtyř hlavních sloupků a podélných nosníků. Tyto sloupky jsou tvořeny z ohnutých profilů do obráceného písmene U. V horní části jsou propojeny ohýbaným

plechem. Ve spodní části jsou ukotveny do příčníků uzavírajících dveřní prostor spodku vozidla. V prostřední části je bočnice vyztužená plechem.

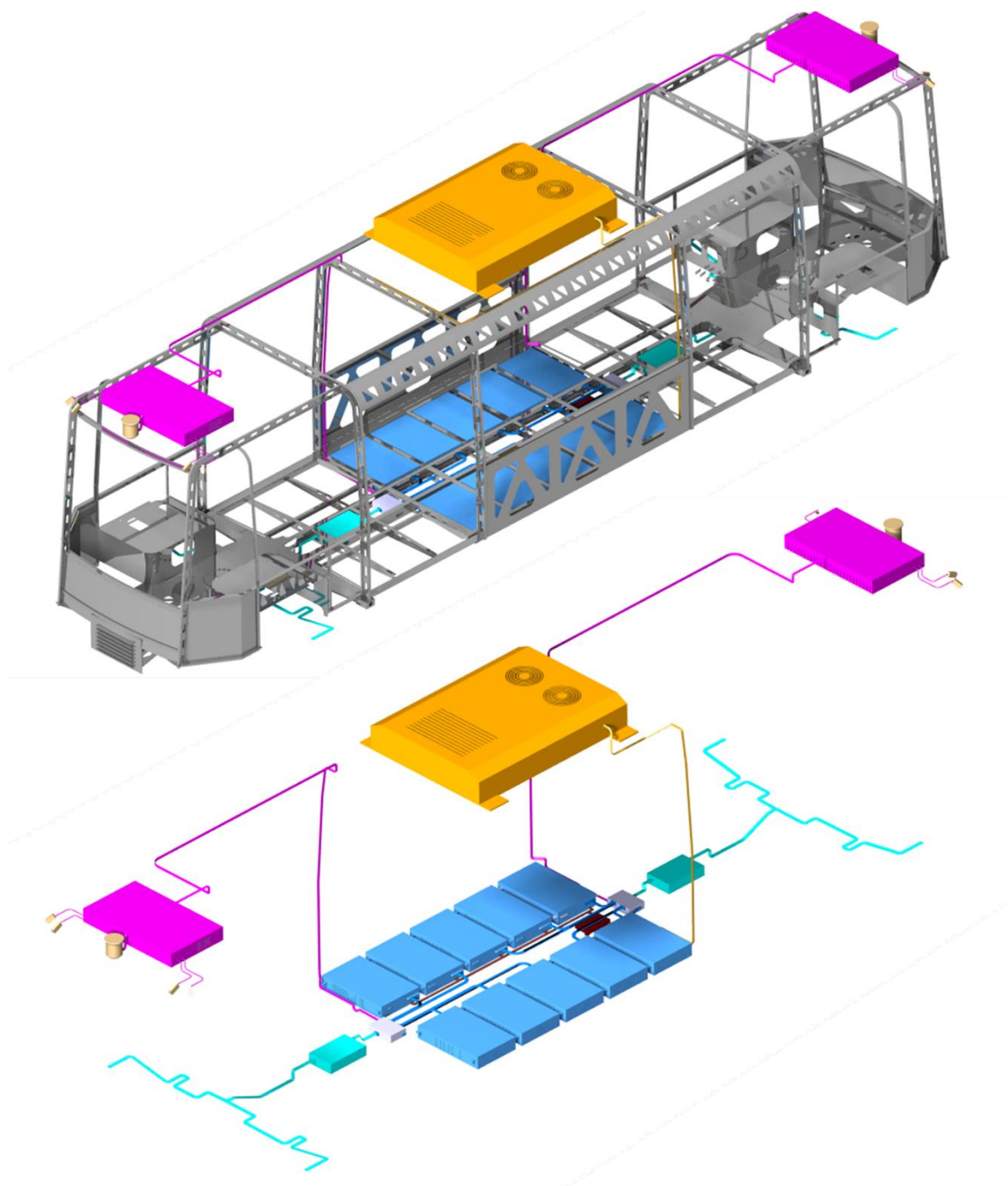
Kostra čela je defacto zástavba nad segmentem spodku vozidla ležícím nad podvozky. Kostra je tvořená z A-sloupků tj. přední, které vedou až do B-sloupku tj. zadní, který je součástí bočnice. Sloupek A je v přední - spodní části ukotven do plechu tvořící podlahu kostry. Sloupky jsou tvořené ze stejných profilů, jako jsou sloupky v bočnicích. Mezi A sloupky jsou na čele vozidla tři L profily. Mezi dvěma spodními L profily je pak plech, který chrání cestující v přední části vozidla. Dále je v kostře sloupek otočený o 90° od A sloupku. Tento sloupek slouží k zpevnění čela v příčném směru. Déla slouží k upevnění okna.

Některé části hrubé stavby jsou inspirovány autobusovým a leteckým průmyslem. Avšak výchozím konstrukčním prvkem byl spodek stávající tramvaje, který je poměrně těžký a komplikovaný. Dle popisu hlavních předností Segmentové tramvaje (viz úvod), by se měla její výroba přiblížit sériové výrobě. Proto by bylo vhodné hrubou stavbu výrazně zjednodušit. Pro tyto účely se nabízí využít pro tramvaje nepříliš používané technologie a materiály. Např. lisované plechy, známe z automobilového průmyslu, hliníkové profily nebo kompozitní materiály.







Lze předpokládat, že z počátku provozu tohoto vozidla bude z důvodu bezpečnosti a nedokonalosti řídicího systému vozidla i celého systému městské dopravy, nutné použít pasivní bezpečnostní prvky. Jako je např. protišplh, nárazník, vyztužující plechy v kostře čela a bočnici atd. Po optimalizaci provozu by se tyto prvky mohly pravděpodobně odebrat, jelikož pravděpodobnost srážky bude mizivá.



## 13.2. Elektrická výzbroj



Obrázek 97. Elektrická výzbroj Segmentové tramvaje. [autor DP]

	Trakční měnič, kabeláž vedoucí k podvozkům
	Baterie, kabeláž zapojení baterií
	HVAC
	Řídící jednotky
	Sběrač proudu z napájecího pásu
	Svorkovnice – rozvod napájecích kabelů

V dnešní době jsou kontejnery s trakčními měniči poměrně velké. Do budoucna se počítá s tím, že by měla být jejich velikost, s příchodem součástek na bázi SiC tzn. karbid křemíku (anglicky silicon carbide), výrazně redukována. Není ovšem zcela zřejmé, zda v časovém horizontu deseti let budou tyto součástky zcela použitelné [30],[31]. Nicméně do své DP předpokládám uložení již rozměrově menšího trakčního měniče, do spodku vozidla tak, aby kabeláž nevedla z napájecího systému na střechu, kde ve stávajících tramvajích bývá uložen trakční měnič, a pak zase zpět dolů k podvozkům.

### 13.2.1. Pohon

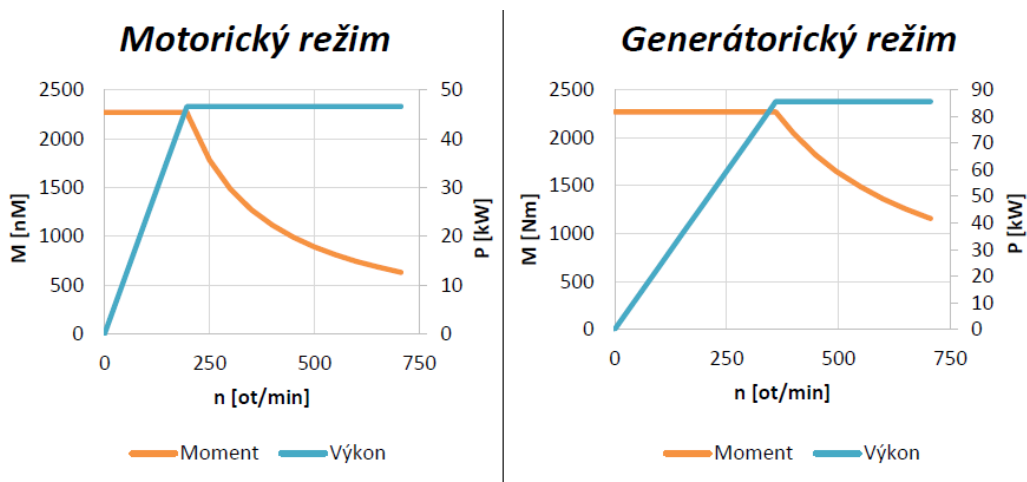
Vozidlo bude poháněno synchronními motory s permanentními magnety s vnitřním rotorem. Pro volbu motoru je nutné splnění požadavků na výkon a zástavbový prostor. Oba tyto požadavky jsou splněny u motorů použitých u tramvaje 15T od společnosti ŠTRN.

Na níže uvedené tabulce jsou parametry motorů používaných na tramvajích 15T [29]:

<b>Motorický režim</b>		<b>Generátorický režim</b>	
Rozměry motoru: 440 × 375 (d×l)			
Maximální výkon	46,6 kW	Maximální výkon	85,6 kW
Moment	630 Nm	Moment	1158 Nm
Otáčky	706 ot/min	Otáčky	706 ot/min

Tabulka 27. Parametry motoru tramvaje 15 T.[29], [30]

Dále jsou uvedené pracovní charakteristiky motoru pro motorický a generátorický režim.

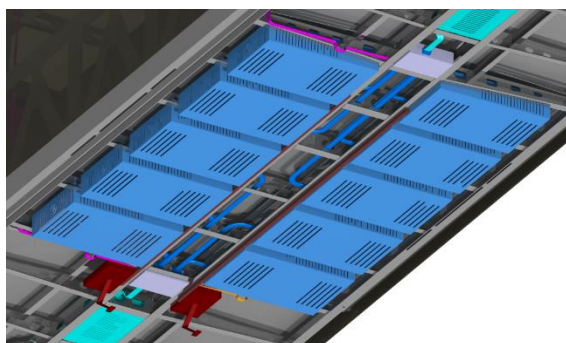


Obrázek 98. Pracovní charakteristika motoru tramvaj 15T.[30]

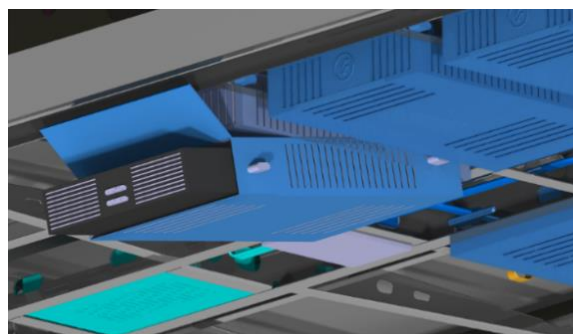
Uložení motorů, do podvozků je taktéž inspirováno tramvaj 15T. Uložení motorů do rámu podvozku je zobrazeno v kapitole 15.

### 13.2.2. Akumulátorové baterie

Vozidlo nebude napájeno ze sběrače na střeše. Napájení bude realizováno na podobném principu, který je uveden v kapitole 3.4, tj. kombinace napájecího pásu - třetí kolejnice. Trakční motory a pomocné agregáty budou tedy napájeny z baterií. Baterie by mohly být umístěny do boxů mezi příčníky hrubé stavby, na pojízdném a výklopném mechanismu, které by umožňoval snadnou výměnu baterií po skončení jejich životnosti. Další možností by mohlo být umístění baterií do boxů, které by tvořily přímo nosnou část hrubé stavby. Jelikož vozidlo bude od začátku poháněno výhradně z baterií, jeví se tato možnost jako opodstatněná. Pak by mohl být vhodně použit jeden konstrukční prvek k více účelům.



Obrázek 99. Uložení baterií. [autor DP]



Obrázek 100. Výměna baterií. [autor DP]

Pro nízkopodlažní tramvaj není možné, aby bylo provedeno takovéto vyklápění mimo prostor, tomu přizpůsobený tj. např. prohlídkový kanál. Mechanismus (např. paralelogram) pro manipulaci baterií by bylo pravděpodobně vhodné zvolit tak, aby baterie mohly být vyměnitelné i na běžné trati. Popř. by vozidlo muselo být pro výměnu baterií nadzdvihnuto.

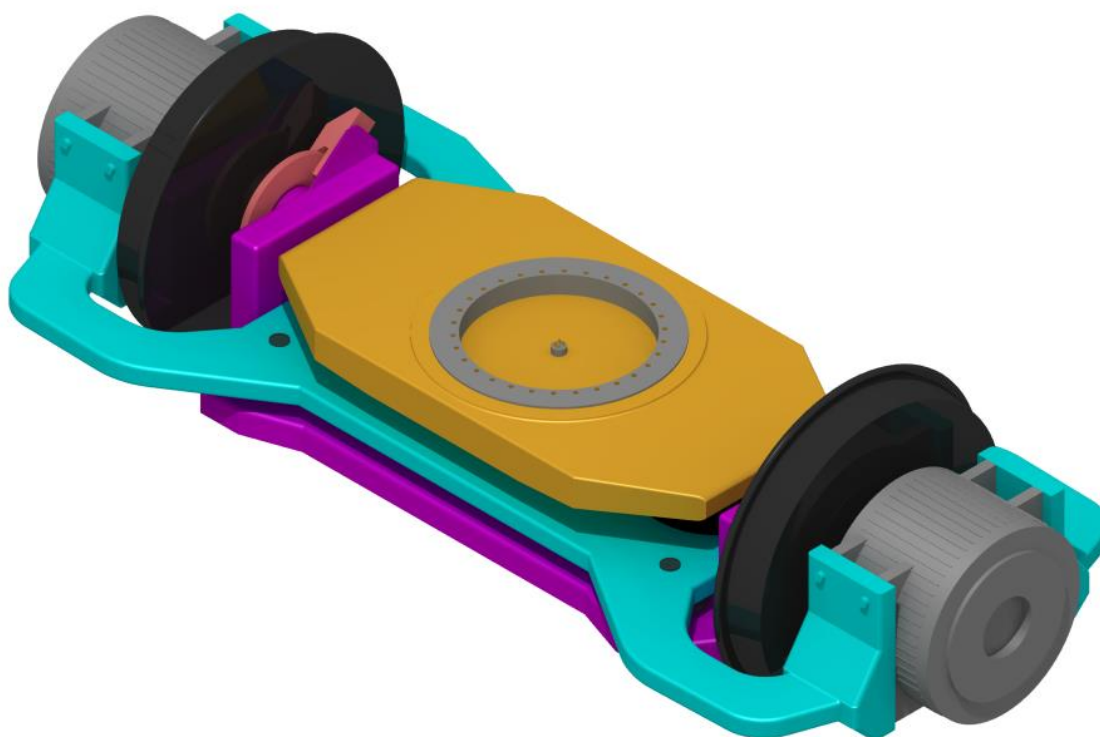
Je zřejmé, že umístění baterií do spodku vozidla představuje riziko, a to především pokud by vlivem poruchy baterie vzplanuly.. Bylo by tedy nutné do podlahy vložit nehořlavou desku, která by byla schopná ochránit cestující před plameny po dobu evakuace. Návrh baterií detailněji popisuje kapitola 17.

## 14. Podvozek

Koncepční návrh podvozku je inspirován podvozkem tramvaje 15T společnosti ŠTRN. Poloha a uložení nápravnice do rámu, uložení motorů a uložení kolébky do rámu je řešeno podobnými principy. Hlavní rozdíl oproti zmíněnému podvozku je ten, že Segmentová tramvaj má jednonápravové podvozky. Podvozek tedy má pouze jedno dvojkolí resp. jednu portálovou nápravnici s nezávisle otočnými koly.

Hlavní technické parametry pojezdu vozidla:

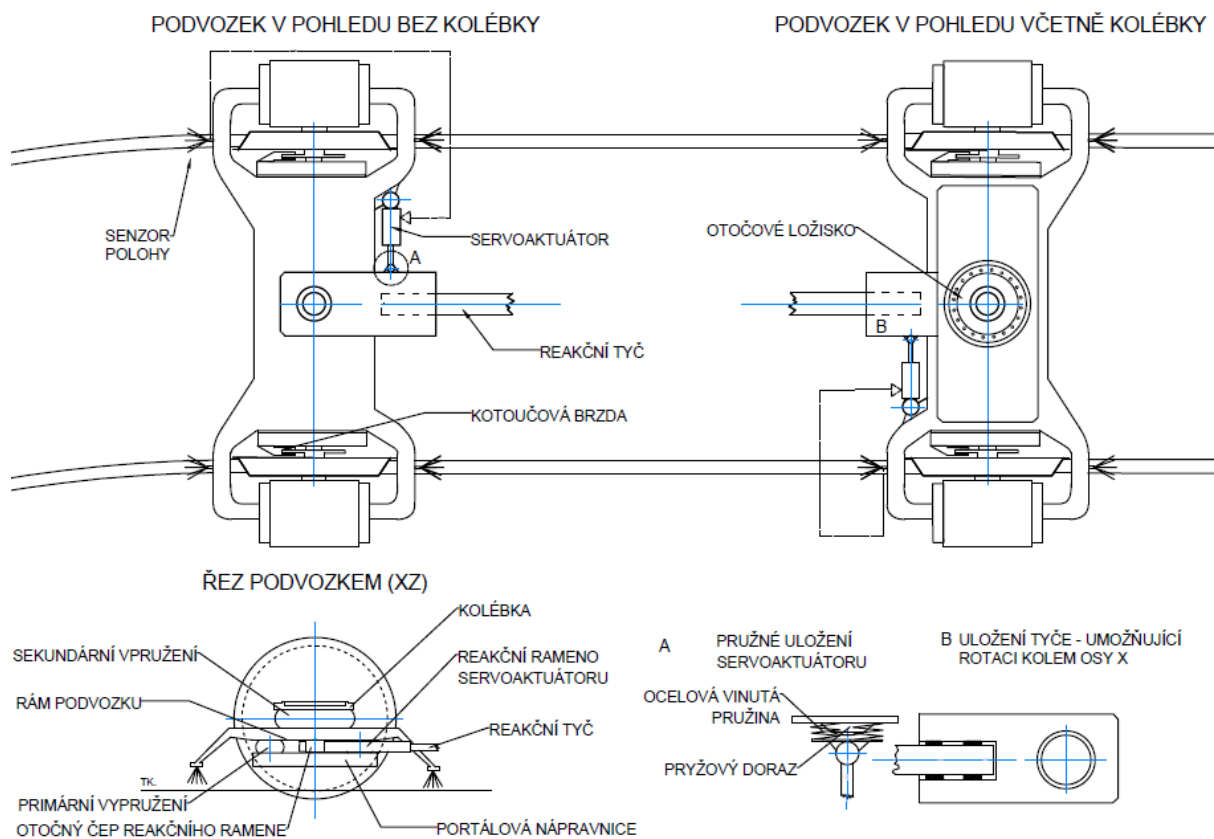
- 2 x jednonápravový otočný podvozek
- Rozvor vozidla: 8 m
- Nezávisle otočná kola – portálová nápravnice
- Kolébkový podvozek – mezi nápravnicí a kolébkou je rám
- Primární vypružení: pryžové pružiny
- Sekundární vypružení: vzduchové
- Trakční motory uložené do rámu podvozku-přenos točivého momentu na kolo prostřednictvím kloubového hřídele
- Mechanické brzdy (kotoučové brzdy) umístěné na náboj kola
- Aktivní natáčení podvozků - Servoaktuátory dostávají signál z řídicího počítače, který kromě dalších signálů zpracovává i informace ze senzorů polohy kolejnic a podle toho pak natáčí povozek
- Přenos podélných sil rám podvozku - kolébka: dvě ojnice
- Přenos příčných sil rám - kolébka: vzduchové pružiny a pryžové narážky



Obrázek 101. Podvozek Segmentové tramveje. [autor DP]

Jednonápravové podvozky nemohou být otočné přirozeně, jelikož jízda takovýchto podvozků je především v přímé trati při velké rychlosti velmi nestabilní. Je tedy vhodné, aby vozidlo mělo v přímé trati tuhé vedení. V obloucích je zase potřeba, aby podvozky byly otočné. Oba tyto požadavky může splnit aktivní natáčení podvozků.

Na obrázku 106. je schématicky znázorněné uspořádání pojezdu vozidla. V nadcházejících podkapitolách jsou jednotlivé principy detailněji popsány.



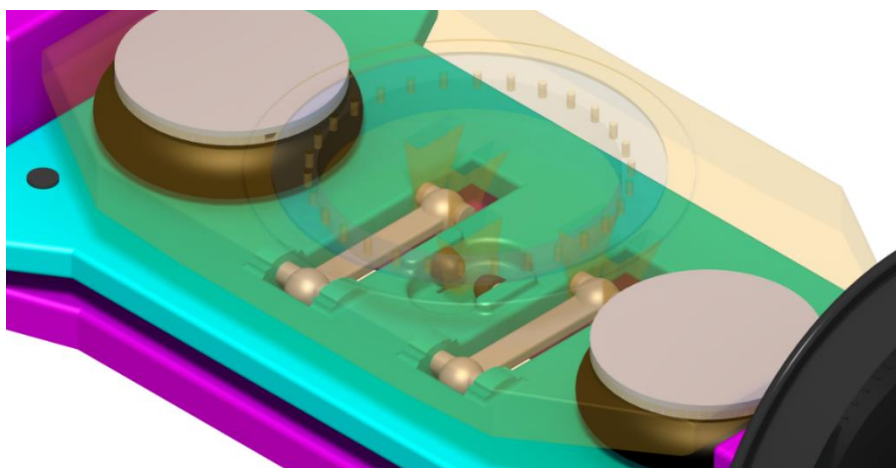
Obrázek 102. Schéma pojezdu Segmentové tramvaje. [autor DP]

Jedná se o aktivně natáčený podvozek s kolébkou a nezávisle otočnými koly. Skládá se z: portálové nápravnice, primárního vypružení (pryžkovového), rámu podvozku, sekundárního vypružení (vzduchové pružiny), kolébkky, tlumičů, táhel (přenos podélných sil z rámu podvozku na kolébkku-skříň), pryžových dorazů (přenos příčných sil), otočného ložiska, otočného čepu, reakčního ramene a reakční tyče.

Vzhledem k tomu, že reakční rameno je umístěno na rám podvozku (viz obr. 102), bude se vlivem síly působící ze servoaktuátoru příčně a podélně deformovat pouze primární vypružení. Protože je toto vypružení velmi tuhé, nedochází k velkým odchylkám při natočení.

#### 14.1.1. Přenos podélných a příčných sil

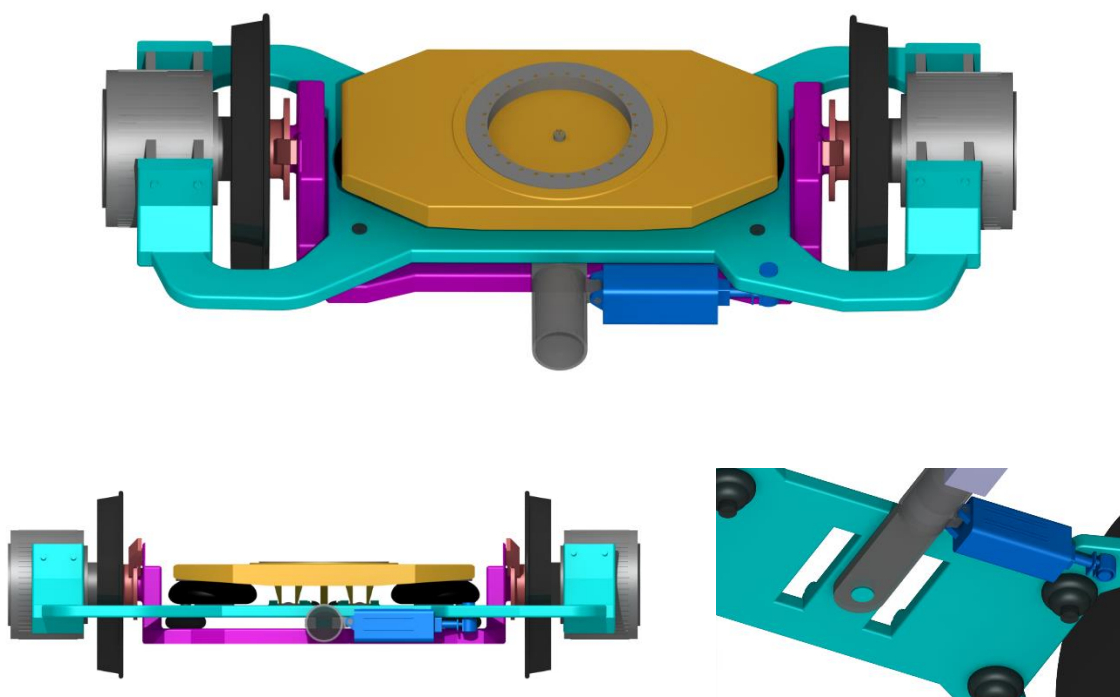
Podélné síly jsou přenášeny z kolébkky na rám podvozku tažnými ojnicemi. Příčné síly jsou přenášeny pryžovými dorazy a konzolou vedoucí z kolébkky svisle dolů. (Viz obrázek.) Pryžové dorazy jsou uloženy v prohlubni, aby nepřekážely dosednutí sekundárního vypružení.



Obrázek 103. Přenos příčných a podélných sil v podvozku. [autor DP]

#### 14.1.2. Princip natáčení podvozků:

Reakční tyč je uložena v radiálních ložiskách, která umožňují rotaci kolem osy x a posuv ve směru osy x. Ložiska jsou umístěná v reakčním ramenu. Reakční rameno je zavěšené z rámu podvozku na čepu umožňující rotaci kolem osy z viz obrázek 108. Pokud by bylo reakční rameno umístěné nad rámem podvozku, kolidovalo by s narážkami příčných pohybů, a také by zabraňovalo dosednutí sekundárního vypružení. Z reakčního ramena vede servoaktuátor na rám podvozku. Jeho vysunutím, resp. zasunutím se tedy natočí rám podvozku a přes primární vypružení se toto natočení přeneše na nápravnice a poté na kola.



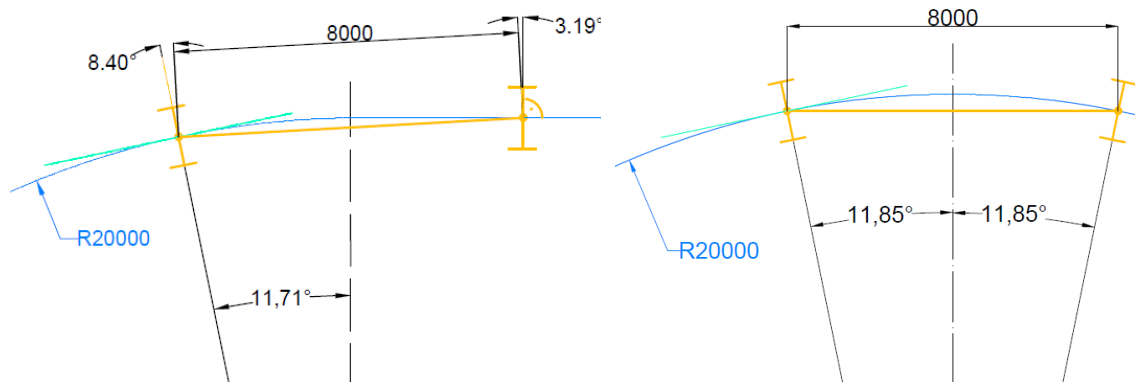
Obrázek 104. Podvozek Segmentové tramvaje s aktivním natáčením. [autor DP]

Síla pro natočení podvozku je přenášena ze servoaktuátoru na rám podvozku.

### 14.1.3. Natáčení podvozků při průjezdu obloukem

Každý podvozek musí být natáčen dle signálu z řídicího počítače, tak aby se natáčel pouze, když je v oblouku. Na níže uvedených obrázcích je znázorněné, jak by se podvozky natáčely při průjezdu v oblouku.

Na obrázku 109 je podvozek v oblouku tzn. natáčí se. Druhý podvozek se také natáčí nicméně pod jiným úhlem. Na obrázku 110: Oba podvozky projíždí obloukem. Tzn. oba se natáčejí stejně.

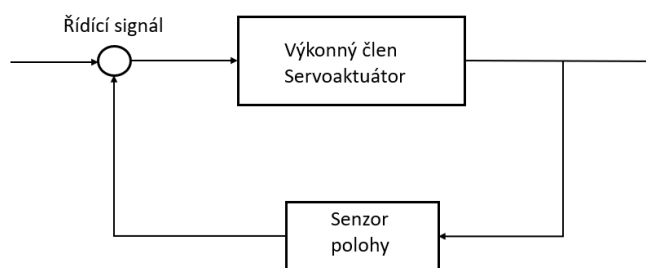


Obrázek 105. Přední podvozek v oblouku. [autor DP] Obrázek 106. Podvozky v oblouku. [autor DP]

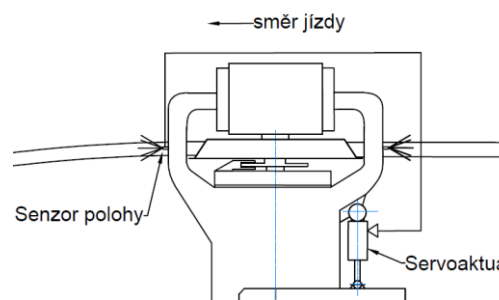
Oranžová barva představuje reakční tyč a podvozky, modrá oblouk o poloměru 20m a tyrkysová tečnu k oblouku procházející středem podvozku.

### 14.1.4. Princip řízení servoaktuátoru

Na obrázku 111 je zobrazené schéma základního principu řízení natáčení podvozku. Konstrukční řešení je na obrázku 112. Jedná se o zpětnovazební řízení výkonného členu podle řídicího signálu přijatého z řídicího počítače. Signál ze senzorů musí být zpracován a zkontrolován v řídicím počítači předtím, než bude signál vyslán k řízení polohy. Sensory polohy se dále zabývám v kapitole 16.



Obrázek 107. Základní schéma řízení. [autor DP]



Obrázek 108. Aktivní natáčení. [autor DP]

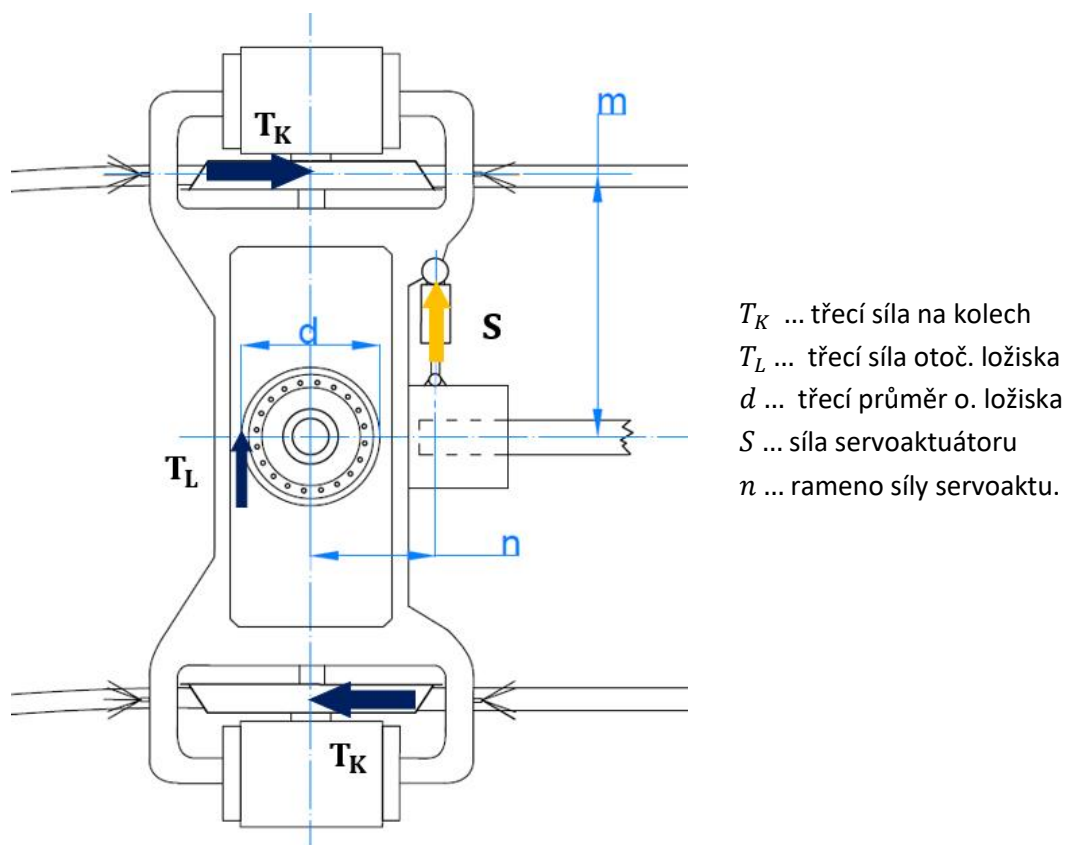
### 14.1.5. Návrh servoaktuátoru:

Při návrhu servoaktuátoru se vychází z následující situace: Vozidlo stojí. Trakční motory neběží. Kola se tedy neodvalují po kolejnici. Servoaktuátor překonává moment třecích sil, který je závislý na polovině celé hmotnosti vozidla a vzdálenosti styčných kružnic. V kontaktu kolo-kolejnice je uvažováno tření  $f = 0,3$ .

V předpokladu výpočtu je uvažována prakticky nerálná situace, jelikož se bude podvozek velmi pravděpodobně natáčet pouze za jízdy. Pokud by vozidlo vykolejilo s natočeným podvozkem,

bude vozidlo nejdříve nadzvednuto, pak by došlo k natočení kol ve vzduchu zpět do směru jízdy, a pak až k nakolejení. Podvozek má poháněno každé kolo zvlášť. Každé kolo se tedy může otáčet jinou úhlovou rychlostí. V obloucích tak motory fungují jako „elektrický diferenciál“. Každý motor je regulován zvlášť. Regulovanou veličinou je moment.

Dle obr. 111, kde je zobrazen přední podvozek v levotočivém oblouku, je sestavena momentová rovnice ke středu otočového ložiska. Ve výpočtu je uvažována i třecí síla v otočovém ložisku přes to, že v porovnání s ostatními silami je malá.



Obrázek 109. Síly působící v podvozku. [autor DP]

Sestavení momentové rovnice ke středu otáčení podvozku:

$$S \cdot n - 2 \cdot T_K \cdot m - T_L \cdot \frac{d}{2} = 0 \quad (14)$$

kde

$$T_K = Q \cdot f_K = 49\,130 \cdot 0,3 = 14\,739 \text{ N} \quad (15)$$

$$T_L = \frac{G}{2} \cdot f_L = \frac{154\,829}{2} \cdot 0,01 = 774,1 \text{ N} \quad (16)$$

$$G = (m_g - m_e) \cdot g = (16\,198 - 4250) \cdot 9,81 = 124\,081 \text{ N} \doteq 124 \text{ kN} \quad (17)$$

Z rovnice (13) je vyjádřena síla S a dále je provedeno dosazení:



$$S = \left( 2 \cdot T_K \cdot m + T_L \cdot \frac{d}{2} \right) \cdot \frac{1}{n} = (2 \cdot 14\,739 \cdot 750 + 774 \cdot 160) \cdot \frac{1}{380} = 58,5 \text{ kN} \quad (18)$$

Kde je:

$f_K$  ... součinitel tření kontaktu kolo kolejnice

$Q$  ... kolová síla

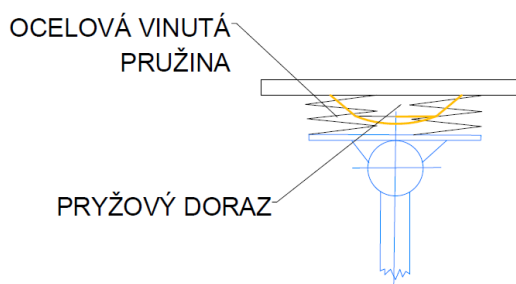
$f_L$  ... součinitel tření valivého ložiska

$m_6$  ... hmotnost podvozků

$m_8$  ... Celková hmotnost

$G$  ... tíha obsazeného vozidla bez podvozků

#### 14.1.6. Uložení servoaktuátoru

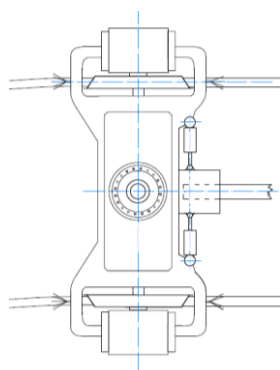


Mezi servoaktuátorem a reakčním ramenem musí nutně být pružný prvek. Při jízdě dochází v podvozku k vrcení (rotace kolem osy z). Je tedy nevhodné, aby tento pohyb-kmitání přenášely tuhé servoaktuátory. Proto jsou mezi pracovní (koncovou) část servoaktuátoru a reakční rameno vloženy pružící elementy. Případně by mohl být použit pryžový kloub.

Obrázek 110. Uložení servoaktuátoru. [autor DP]

#### 14.1.7. Technické řešení pro snížení velikosti potřebné síly v servoaktuátoru

Pokud by bylo zapotřebí ještě snížit sílu  $S$  např. z důvodu příliš rozměrného servoaktuátoru, nabízelo by se změnit rameno  $n$ . U tohoto rozměru je však nutno brát v potaz výsuv servoaktuátoru pro potřebné natočení, a také rozměry servoaktuátoru jako takového, aby vyhovoval prostoru pro jeho zástavbu. Jinou variantou by bylo umístění dvou servovakturátorů z reakčního ramene na rám podvozku proti sobě. Viz obrázek 12

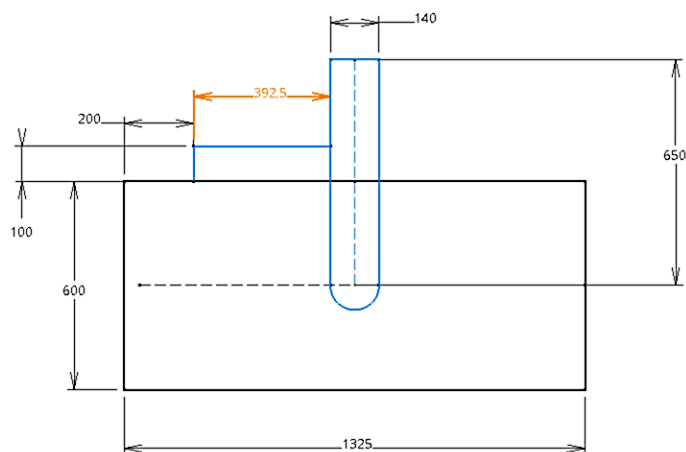


Obrázek 111. Dva servoaktuátory. [autor DP]

Toto řešení ovšem přináší komplikaci v řízení systému. Jeden servoaktuátor musí konat opačný pohyb než ten druhý. Aby tedy docházelo k natáčení podvozku, musí se jeden vysouvat a druhý zasouvat. Serva by tedy pravděpodobně musela fungovat na principu master-slave.

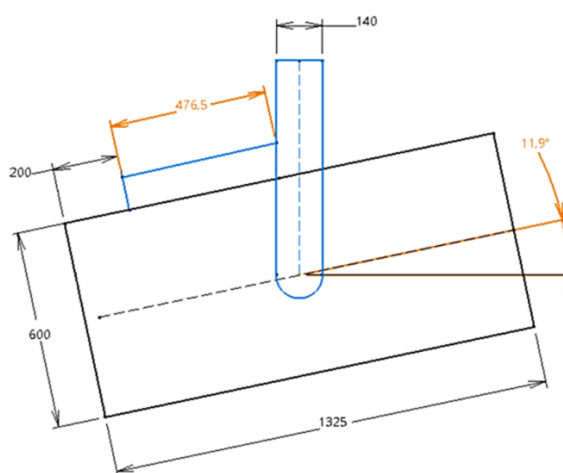
#### 14.1.8. Potřebný výsuv servoaktuátoru

Pro zjištění výsuvu byla v CADu narýsována obálka podvozku a reakčního ramene. A poté bylo nasimulováno maximální natočení podvozku při průjezdu v oblouku. Viz obr 114, 115, 116.

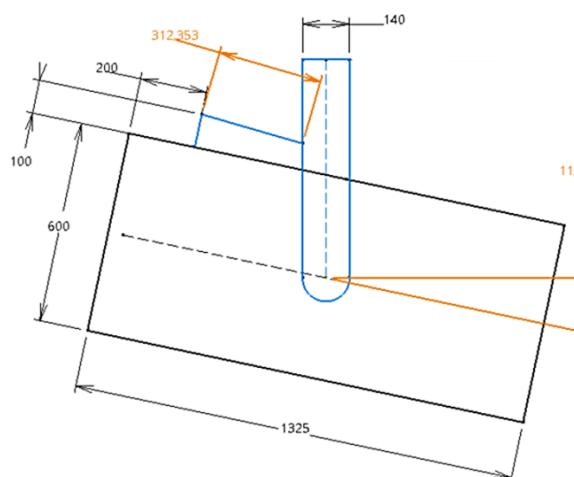


Obrázek 112. Přední podvozek v přímé trati. [autor DP]

Na obrázcích je zobrazená černě obálka rámu podvozku. Modře je zobrazené reakční rameno a servoaktuátor. Oranžovou jsou zobrazené kóty, které se mění vlivem natáčení podvozku. Z obrázku je tedy zřejmé, že **výsuv** servoaktuátorů musí být: **+84 mm a - 80 mm**. Tzn., že pokud jede vozidlo v přímé trati, servo již musí být vysunutě.



Obrázek 113. Přední podvozek natočený při průjezdu levým obloukem. [autor DP]

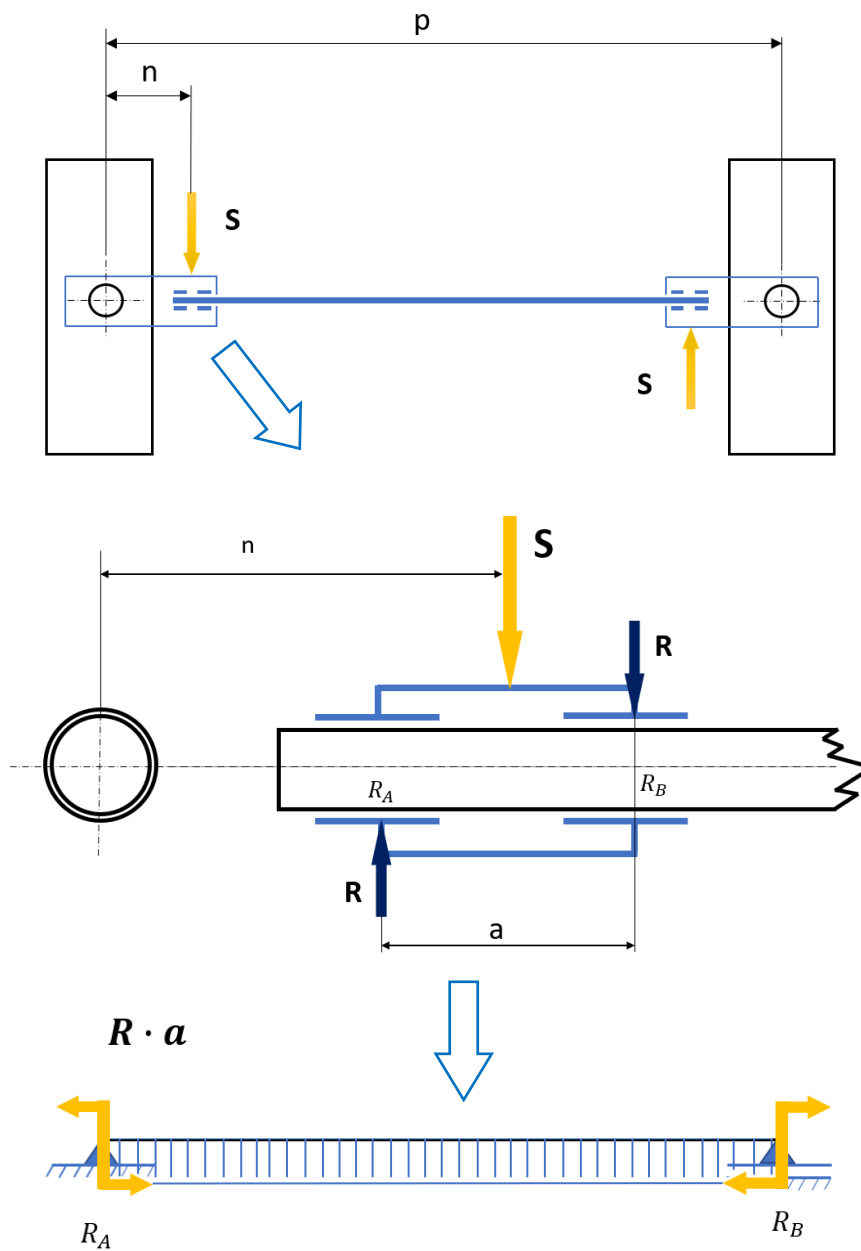


Obrázek 114. Přední podvozek natočený při průjezdu pravým obloukem. [autor DP]

Požadovaný výsuv servoaktuátoru je  $\pm 85 \text{ mm}$ . Požadovaná síla je  $58,5 \text{ kN}$ .

#### 14.1.9. Zjednodušený výpočetní model pro návrh reakční tyče:

Na obrázku 117 je znázorněno zjednodušení na základě kterého jsem následně provedl výpočet. První schéma zjednodušeně zobrazuje dva podvozky propojené reakční tyčí. Na druhém schématu je zjednodušeně zobrazená reakční tyč, která je uložena do ložisek. Ta jsou umístěna do reakčního ramene, na které působí servoaktuátory silou  $S$  na rameni  $n$ . Na posledním schématu je zobrazen průběh ohybového momentu, který působí v uložení a dále pak v celé reakční tyči.



Obrázek 115. Výpočetní model pro návrh reakční tyče. [autor DP]

$$2 \cdot T_K \cdot m + T_L \cdot \frac{d}{2} = S \cdot n = R \cdot a = M_{oMAX} \quad (19)$$

- └─ Dimenzování reakční tyče
- └─ Dimenzování uložení tyče
- └─ Dimenzování servoaktuatoru

$$M_{oMAX} = S \cdot n = 58\,507 \cdot 380 = 22\,232\,508 \text{ Nmm} \quad (20)$$

### Návrh materiálu a reakční tyče:

Volba: materiál ocel S355J2H:  $R_e = 290 \text{ Nmm}^{-2}$ , bezpečnost  $k = 1,2$  (Vzhledem k uvažování krajní možnosti, tj. tření kol bez odvalování, je zvolena nízká bezpečnost)

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k} = \frac{290}{1,2} = 241,6 \text{ Nmm}^{-2} \quad (21)$$

Dále je vypočítán modul pružnosti:

$$\sigma_o = \frac{M_{oMAX}}{W_o} \leq \sigma_D \rightarrow W_o = \frac{22\,232\,508}{241,6} = 91\,997 \text{ mm}^3 \quad (22)$$

Dále je tedy hledán polotovár s profilem, který je větší než  $91\,997 \text{ mm}^3$  (*podmínka*).

Reakční tyč v místě uložení je trubka s kruhovým průřezem délky:  $l = 200 \text{ mm}$

*volím:  $d = 100 \text{ mm}$*

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 100^3}{32} = 98\,175 \text{ mm}^3 \quad (23)$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 100^2}{4} = 7\,854 \text{ mm}^2 \quad (24)$$

$$V = l \cdot A = \frac{200 \cdot 7\,854}{10^9} = 0,0016 \text{ m}^3 \quad (25)$$

$$m_t = \rho \cdot V = 7\,850 \cdot 0,0003 = 12,3 \text{ Kg} \quad (26)$$

Mimo uložení je reakční tyč čtyřhraná trubka délky:  $l = 6\,800 \text{ mm}$  (odměřeno z modelu)

$$W_o = \frac{BH^3 - bh^3}{6H} = \frac{120 \cdot 120^3 - 100 \cdot 100^3}{6 \cdot 100} = 149\,111 \text{ mm}^3 \quad (27)$$

*Modul průřezu je zvolen vyšší, z důvodu omezení průhybu. (Viz následující stránka).*

$$A = BH - bh = 4\,400 \text{ mm}^2 \quad (28)$$

$$V = l \cdot A = \frac{(6\,800) \cdot 4\,400}{10^9} = 0,03 \text{ m}^3 \quad (29)$$

$$m_j = \rho \cdot V = 7\,850 \cdot 0,03 = 234,9 \text{ Kg} \quad (30)$$

*Celková hmotnost reakční tyče je:*

$$m_{celk} = 2 \cdot m_t + m_j = 2 \cdot 12,3 + 234,9 = 259,5 \text{ Kg}^{15} \quad (31)$$

<sup>15</sup> Do hmotnostní bilance byla odhadnuta hmotnost na 250 kg.

## Průhyb reakční tyče

Reakční tyč je zjednodušena na nosník na dvou podporách. Pro výpočet je využita Bernoulliho rovnice průhybové čáry, která je dvakrát zintegrována, z čehož plynou dvě integrační konstanty.

$$v'' = \frac{M(x)}{EI} \quad (32)$$

$$v' \cdot EI = M \cdot x + C_1 \quad (33)$$

$$v \cdot EI = \frac{M \cdot x^2}{2} + C_1 \cdot x + C_2 \quad (34)$$

Okrajové podmínky (op):  $op_1: v(0) = 0$ ,  $op_2: v(l) = 0$

Dosazení op do rovnice průhybu, výpočet integračních konstant:

$$z\ op_1: C_2 = 0, \quad z\ op_2: C_1 = -\frac{M \cdot l}{2}$$

Dosazení op rovnice (33):

$$v \cdot EI = \frac{M \cdot x^2}{2} - \frac{M \cdot l}{2} \quad (35)$$

Vyjádření a dosazení do rovnice. Souřadnice  $x$  představuje vyšetřovaný bod tedy polovinu délky reakční tyče ( $l/2$ ).

$$v = \frac{1}{EI} \cdot \left( \frac{M \cdot x^2}{2} - \frac{M \cdot l}{2} \right) = \frac{1}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 7,7 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{22\ 232\ 508 \cdot \left(\frac{6\ 800}{2}\right)^2}{2} - \frac{22\ 232\ 508 \cdot 6\ 800}{2} \right) = 78,7\ \text{mm} \quad (36)$$

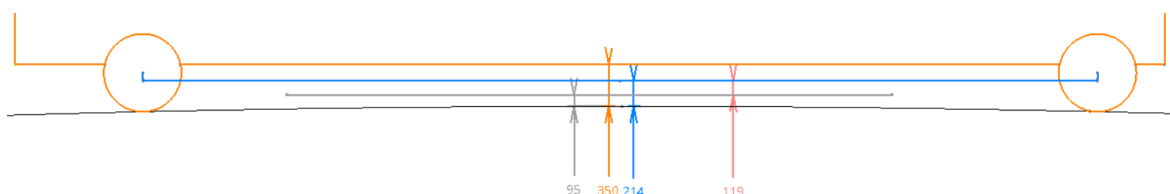
Průhyb reakční tyče je poměrně velký. Je to dáno především velikostí momentu, který byl vypočítán pro nejhorší možnou situaci. V prostoru pod vozidlem tento průhyb nezpůsobí žádnou kolizi. Z hlediska zástavby tedy není omezující. Vysoké riziko představuje nadměrné kmitání reakční tyče způsobeného přejezdem nerovností kolejnic a průhybem tyče, který lze očekávat i ve svislém směru. Tyč je tedy potřeba vyztužit, aby bylo toto riziko omezené.

### 14.1.10. Vertikální oblouk

Reakční tyč je umístěná pod hrubou stavbou vozidla. Je tedy nutné vyšetřit, zda vozidlo bude s tímto mechanismem schopné projíždět všemi úseky trati. Největší riziko představuje zaoblení lomu sklonu, tedy vertikální oblouk. Pro tyto účely byl využit CAD program, kde byla tato situace narýsována.

Rozvor	8000 mm
průměr kol	650/610 mm
Dosednutí I vypružení	15 mm
Dosednutí II vypružení	55 mm
Nástupní výška vozidla	350 mm
Vertikální oblouk poloměr	350 m

Tabulka 28. Parametry pro vertikální oblouk.



Obrázek 116. Vertikální oblouk. [autor DP]

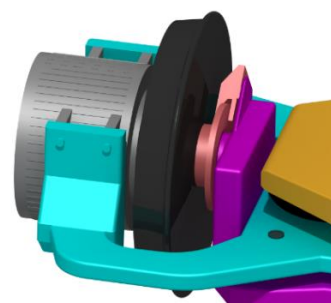
Na obrázku 116 je zobrazen výsledek vyšetření obrysu v oblasti reakční tyče. Černě je zobrazen vertikální oblouk o poloměru 350 m. Oranžovou barvou je zobrazena obálka skříně vozidla a kola. Modře je zobrazeno dosednutí primárního a sekundárního vypružení.

Dle normy ČSN 28 0318 nesmějí neodpružené hmoty klesnout pod hranici 60 mm od TK. Reakční tyč je uložena do rámu, který je 1x vypružený. K limitní hodnotě 60 tedy nutné ještě přičíst max. sednutí prim. vypružení tedy 15 mm. Dále je nutné přičíst maximální možné ojetí kol na poloměru tj. 20 mm. Reakční tyč tedy nesmí vybočovat do prostoru vzdálený 95 mm od TK. (šedivá kóta). Růžová kóta představuje prostor, ve kterém může být umístěná reakční tyč tedy 119 mm. Reakční tyč je z profilu o výšce 120 mm. Průhyb reakční tyče na tento prostor nemá vliv, jelikož ohyb působí v rovině xy. Průhyb od vlastní tíhy reakční tyče je zanedbán.

Z tohoto vyšetření tedy plyne, že profil reakční tyče musí být nižší v rovině yz. Jinak by přesahoval normou daný limit. Bylo by tedy nutné zvolit jiný profil, který by byl schopen přenést potřebné zatížení a zároveň by měl nižší výšku tj pod 119 mm.

#### 14.1.11. Mechanická brzda - kotoučová

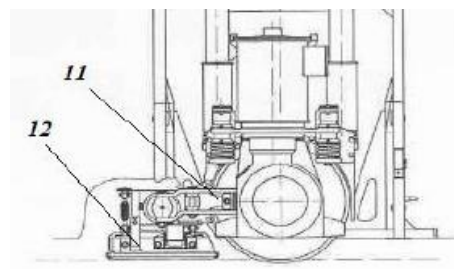
Brzda je připevněná na portálovou nápravnici. Brzdný moment vzniká na kotouči třením destiček o kotouč a je přenášen na brzdový kotouč prostřednictvím brzdových destiček obepínajících brzdový kotouč. Brzdový kotouč je přišroubován na náboj kola.



Obrázek 117 Mechanická brzda. [autor DP]

#### 14.1.12. Kolejnicová brzda

Kolejnicová brzda je povinnou výbavou vozidla provozovaného ve městě. Na obrázku je zobrazeno konstrukční řešení brzdy v tramvaji ULF (viz rešerše). Podobným způsobem by musela být realizovaná brzda i u Segmentové tramvaje.



Obrázek 118 Podvozek tramvaje ULF. [7]

11) Kotoučová brzda

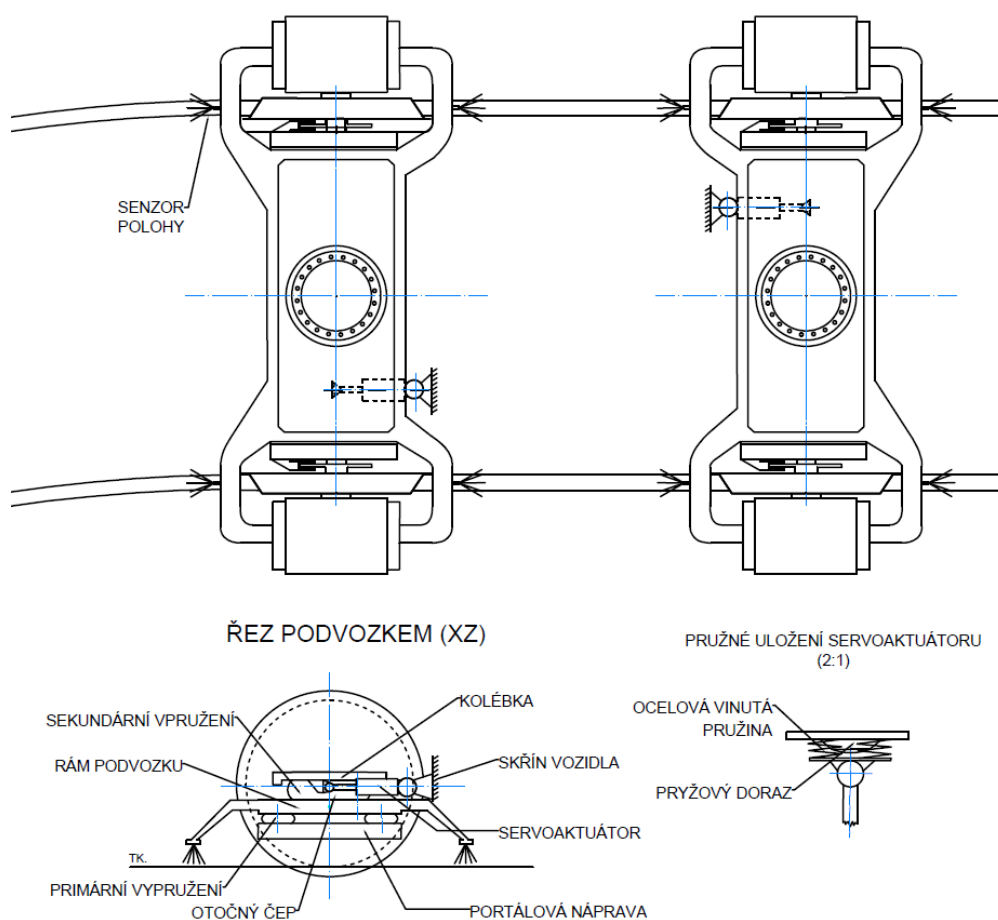
12) Kolejnicová brzda

### 14.1.13. Závěr z návrhu varianty 1

Výhodou tohoto řešení je nezávislost na skříni. Jedná se v podstatě o modulární podvozek, u kterého se může měnit rozvor velmi jednoduše. Pouze změnou délky reakční tyče. Dále je velmi užitečné, že síla ze servoakt. přechází rovnou do rámu podvozku a příčnou a podélnou deformací je postižené pouze primární vypružení. Proto bude natáčení podvozků poměrně přesné. Ovlivněné by bylo pouze tuhostí prvků 1. stupně vypružení v horizontální rovině.

Nevýhodou tohoto řešení je navýšení 1x vypružené hmoty o 245,1 Kg. Dále reakční tyč zabírá prostor pod vozidlem.

### 14.2. Varianta 2



Obrázek 119. Druhá varianta aktivního natáčení podvozků. [autor DP]

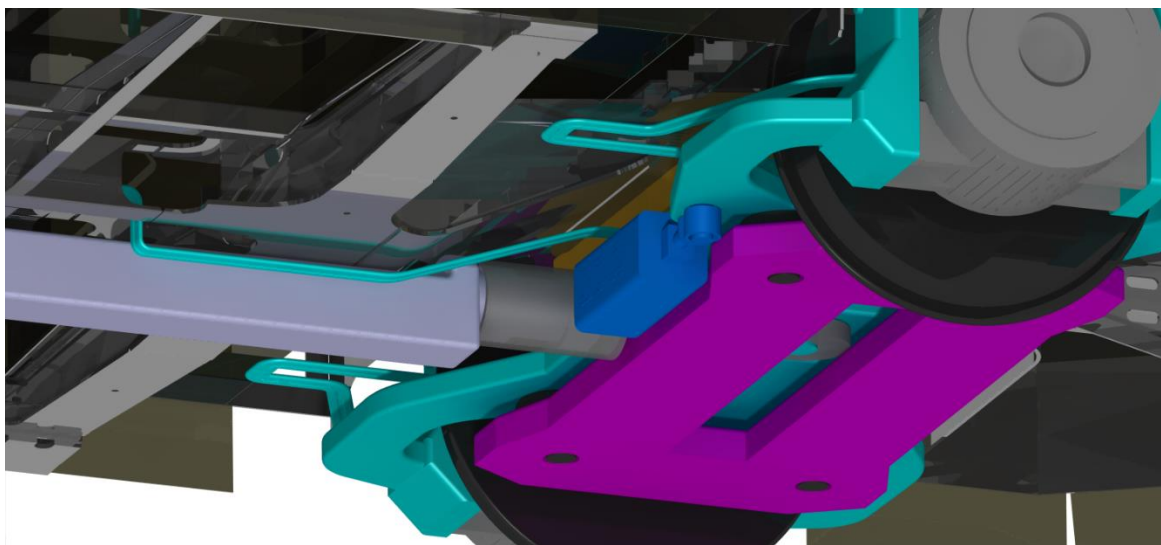
Pro úplnost je zde uvedena další varianta. Ta je zdánlivě jednodušší. Servoaktuátor by byl uložen ve skříni vozidla a natácel by kolébkou.

Absence reakčního ramene a reakční tyče snižuje hmotnost a poskytuje více prostoru. Celý systém natáčení je nutné regulovat. Problémem tohoto řešení je, že při přenášení síly ze servoaktuátoru na kolébkou, bude deformováno sekundární vypružení v příčném a podélném směru. To může vnášet velkou odchylku do žádaného přesného natáčení podvozku. Musely by být k vypružení umístěny senzory, které by měřily příčné, podélné i svislé deformace vzduchového vypružení. Dále by tyto informace musely být přenášeny do řídicí jednotky, která by vyhodnotila deformaci vypružení a z toho pak regulovala sílu potřebnou k natočení. Při kombinaci se senzorem, který dává informaci o směrovém vedení vozidla, je zřejmé, že tato regulace (během jízdy) je velmi

náročná a vzhledem ke kmitání vypružení možná nereálná. To mě vedlo k návrhu výše představené varianty.

### 14.3. Vizualizace uspořádání pojezdu

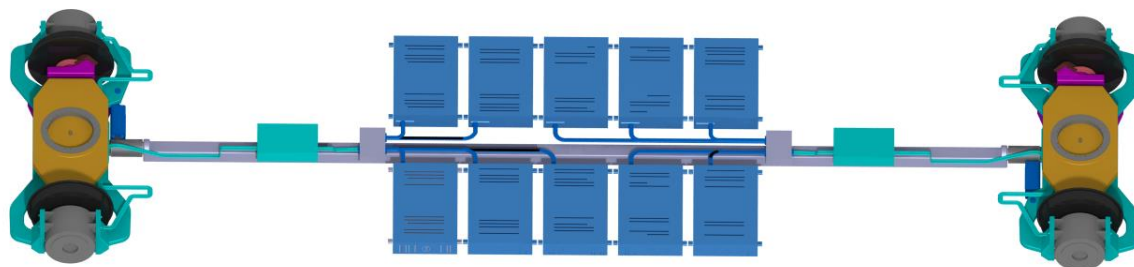
Obrázek 120 zobrazuje uspořádání podvozku a reakční tyče v zástavbovém prostoru hrubé stavby vozidla. Na obrázku je vidět, že mezi spodkem hrubé stavby a reakční tyčí je poměrně málo prostoru. Nicméně ani při vysunutí reakční tyče (až 80 mm) spolu tyto dva konstrukční prvky nekolidují. Vůle mezi reakční tyčí a spodkem kvůli pohybům skříně na sekundárním vypružení je dostatečná.



Obrázek 120. Detailní pohled na uspořádání pojezdu. [autor DP]

V případě dalšího uplatnění tohoto mechanismu by bylo nezbytné optimalizovat tvar reakční tyče v oblasti přechodu průřezů s ohledem na únavu.

Na obrázku není uvedeno konstrukční řešení kolejnicové brzdy. Toto řešení bude pravděpodobně velmi komplikované vzhledem k zástavbovému prostoru a mechanismu aktivního natáčení podvozku.



Obrázek 121. Podvozky s bateriemi. [autor DP]

Na Obrázku 121 jsou zobrazené podvozky včetně baterií, kterými jsou trakční motory napájeny.



## 15. Návrh vypružení

### 15.1. Svislé vypružení

K návrhu vypružení byl využit zjednodušený model dvouhmotové soustavy. Před samotným výpočtem byly rozděleny jednotlivé hmotnosti do dvou skupin: hmotnosti jedenkrát vypružené a dvakrát vypružené. Výpočet byl proveden pro nejhorší možnou variantu zatížení, tedy pro vozidlo s rozvržením interiéru varianta 1. Jednotlivé hmotnosti jsou vzaty z hmotnostní bilance:

Z hmotnostní bilance byly zjištěny hodnoty shrnuté v tabulce 29. Vypružení bylo navrženo pro maximální možné provozní zatížení tedy  $40s/m^2$ .

	Obsazené vozidlo [kg]	Prázdné vozidlo [kg]
$m_{celk}$ ...celková hmotnost	16 898	11 055
$m_0$ ...nevypružená hmot.	800	800
$m_1$ ...1x vypružená hmot.	3 450	3 450
$m_2$ ...2x vypružená hmot.	12 648	6 805

Tabulka 29. Hmotnosti pro 2m soustavu.

Pro výpočet nebylo uvažováno tlumení. Toto zjednodušení znamená, že se výsledek frekvencí se liší cca o 10 %.

#### 15.1.1. Frekvence souběžných a protiběžných kmitů svislého vypružení

Pro výpočet vlastních frekvencí zjednodušené dvouhmotové netlumené soustavy je využit obecný vzorec:

$$\det(\mathbf{K} - \lambda\mathbf{M}) = 0 \quad (37)$$

Nejprve je 2m soustava uvolněná a jsou vyjádřeny pohybové rovnice:

$$m_1\ddot{y}_1 + k_1y_1 - k_2(y_2 - y_1) = 0 \quad (38)$$

$$m_2\ddot{y}_2 + k_2(y_2 - y_1) = 0 \quad (39)$$

V maticovém zápise:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}\mathbf{Y} = 0 \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (41)$$

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\lambda_{1,2}} \quad (42)$$

$$f_{1,2} = \frac{\omega_{1,2}}{2\pi} \quad (43)$$

Pro dosazení do matic je nejprve nutné navrhnout parametry vypružení.

### 15.1.2. Primární vypružení

#### Specifikace vlastností pružiny:

Výška nestlačené pružiny:  $H_0 = 95 \text{ mm}$

Výška zástavbového prostoru pro pružinu při stlačení vypr. částí prázdného vozidla:  $H_1 = 80 \text{ mm}$

Průměr zástavbového prostoru:  $D_{ex} = 130 \text{ mm}$

Statické stlačení pružiny prázdného vozidla:  $z_1 = H_0 - H_1 = 95 - 80 = 15 \text{ mm}$

Statické stlačení plně obsazeného vozidla:  $z_8 = H_0 - H_8 = 95 - 65 = 30 \text{ mm}$

Užitečné stlačení pružiny:  $z_u = H_1 - H_8 = 80 - 65 = 15 \text{ mm}$

Maximální stlačení pružiny:  $z_{max} = H_1 - H_{min} = 80 - 55 = 25 \text{ mm}$

#### Tuhost primárního vypružení:

Pro zjednodušení je uvažováno, že primární vypružení bude namáhané pouze tlakem:

$E_r$  ... Redukovaný modul pružnosti

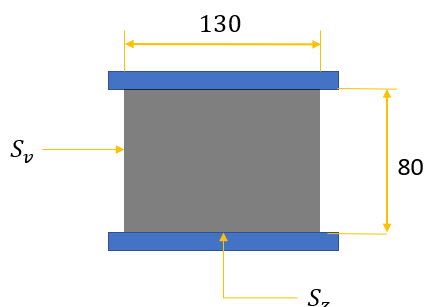
$S_z$  ... zatížená plocha

$S_v$  ... volná plocha

$G$  ... modul pružnosti ve smyku

$G = f(\text{tvrdost})$

$$E_r = \left( 4 + 7,24 \cdot \left( \frac{S_z}{S_v} \right)^{1,88} \right) \cdot G$$



Obrázek 122. Pryžový prvek. [autor DP]

(44)

$$G = 3,93 \cdot 10^{-4} \cdot Sh^{1,91}$$

(45)

$$\begin{aligned} \text{tvrdost} &= 40 - 75 Sh \\ \text{volím: } &70 Sh \end{aligned}$$

$$k_z = E_r \cdot \frac{S_z}{H_0}$$

(46)

Lze tedy vypočítat plochu  $S_z$  a  $S_v$ :

$$S_z = \frac{\pi \cdot D_{ex}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 130^2}{4} = 13\,273 \text{ mm}^2; \quad S_v = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{ex}}{2} \cdot H_0 = 38\,798 \text{ mm}^2 \quad (47);(48)$$

V primárním vypružení je celkem osm pružin:

$$S_{z8} = S_z = 8 \cdot 13\,273 = 106\,185 \text{ mm}^2$$

$$S_{v8} = S_v = 8 \cdot 38\,798 = 261\,380 \text{ mm}^2$$

Dále je vypočítán modul pružnosti ve smyku dosazením do vzorce (45) a redukovaný modul pružnosti (44):

$$G = 3,93 \cdot 10^{-4} \cdot 70^{1,91} = 1,31 \text{ MPa}$$

$$E_r = \left( 4 + 7,24 \cdot \left( \frac{106\,185}{261\,380} \right)^{1,88} \right) \cdot 1,31 = 7 \text{ MPa}$$

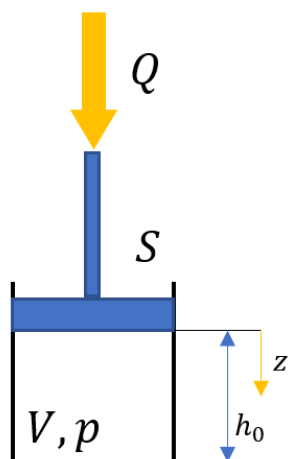
Nakonec lze dosadit do vzorce (46) pro výpočet tuhosti:

$$k_1 = 7 \cdot \frac{106\,185}{80} = 9\,296,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 9\,268\,97,8 \frac{\text{N}}{\text{m}} \doteq 926\,900 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

### 15.1.3. Návrh sekundárního vypružení

Pro základní návrh sekundárního vypružení je využit zjednodušený model, který je založen na základním fyzikálním vzorci:  $F = p \cdot S$ . Dále je uvažována závislost:  $P \cdot V^n = konst.$  (tedy polytropa). Pomocí těchto předpokladů lze dojít ke vztahu pro návrh parametrů vzduchového vypružení (49).

Následující konstanty jsou převzaty buď z předešlých částí DP, nebo ze studijních podkladů [6]:



$Q$  ... Kolová síla = síla připadající na jednu pružinu  
 $S$  ... plocha pružiny  
 $V$  ... objem pružiny  
 $h_0$  ... výška nezátížené pružiny  
 $z$  ... stlačení pružiny  
 $p$  ... přetlak  
 $p_a$  ... atmosferický tlak  
 $n$  ... polytropický exponent

$Q = 38\,707\text{ N}$   
 $n = 1,1$   
 $p_a = 101,325\text{ kPa}$   
 $p = 450\text{ kPa}$

$$k = \frac{n \cdot S^2 (p + p_a)}{V} \quad (49)$$

vztah odvozený pro návrh parametru vypružení

Obrázek 123. Princip funkce vzduchového vypružení. [autor DP]

- 1) Aby bylo možné navrhnout parametry vzduchového, sekundárního vypružení, je nutné nejprve zjistit potřebnou tuhost, pro kterou by frekvence souběžných kmitů dvoumotové soustavy byla 1 až 1,2 Hz.

Dle kapitoly 15.1.1: pro volbu  $k_2 = 950\text{ N/mm}$ , pro již navržené  $k_1$  je:

$$f_1 = 1,175\text{ Hz}, f_2 = 8,68\text{ Hz}$$

- 2) Návrh parametrů vzduchového vypružení na základě návrhu tuhosti  $k_2$  pro plně obsazené vozidlo.

$$Q = p \cdot S \quad (50)$$

Vyjádření obsahu  $S$ :

$$\rightarrow S = \frac{Q}{p} = \frac{38\,707}{0,45} = 86\,016\text{ mm}^2$$

$$S = \frac{\pi \cdot D_{ef}^2}{4} \rightarrow D_{ef} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = 331\text{ mm} \quad (51)$$

Dále je ze vzorce (49) vyjádřen objem  $V$  a jsou dosazené zvolené a vypočtené hodnoty:

$$V = \frac{n \cdot S^2 (p + p_a)}{k_2} = \frac{1,1 \cdot 86\,016^2 (0,45 + 0,1)}{950} = 4\,723\,187\text{ mm}^3$$

$$V = S \cdot h \rightarrow h = \frac{V}{S} = 55 \text{ mm} \quad (52)$$

$h$  ... výška vypružení nezávislá na stlačení vzduchové pružiny

3) Výpočet parametrů vypružení prázdného vozidla.

Z hmotnostní bilance je zjištěná síla  $Q_{pv}$ , tedy kolová síla bez zatížení od cestujících.

Plocha a objem jsou převzaty z předchozích výpočtů:

$$Q_{pv} = 27\,112 \text{ N}$$

$$S = 86\,016 \text{ mm}^2$$

$$V = 4\,723\,187 \text{ mm}^3$$

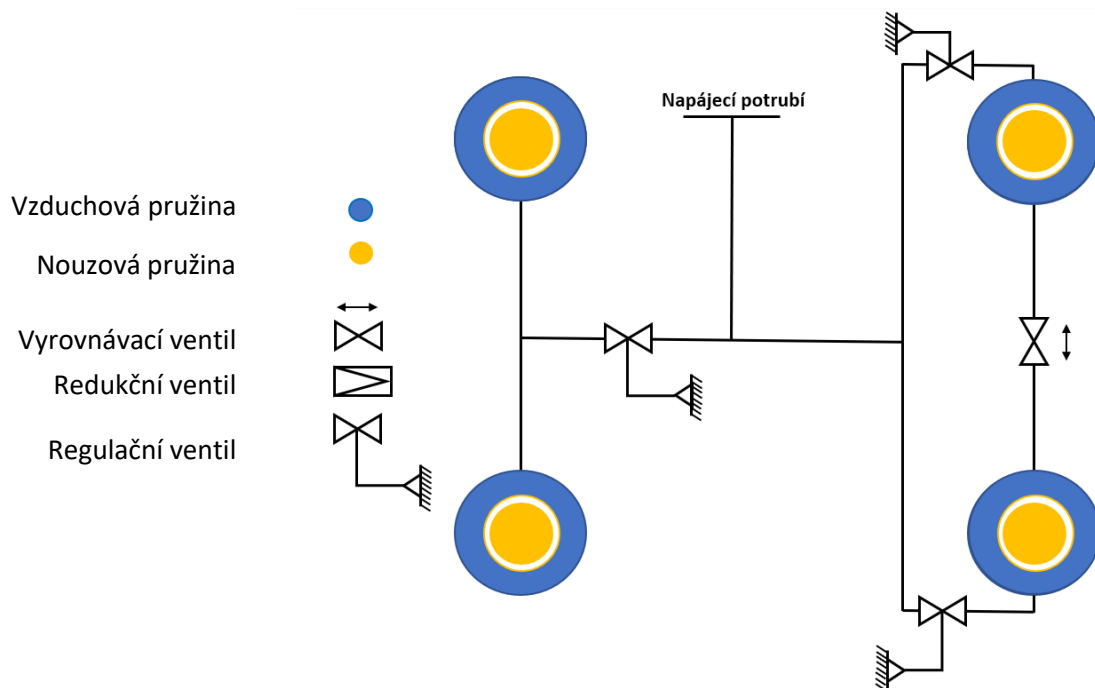
Tyto hodnoty jsou dále dosazeny do vztahu (50):

$$p = \frac{Q_{pv}}{S} = \frac{27\,112}{86\,016} = 0,32 \text{ MPa}$$

Na závěr je dosazeno do vzorce (49) vypočtená tuhost:

$$k_2 = \frac{1,1 \cdot 86\,016^2 (0,32 + 0,1)}{4\,723\,187} = 1\,434 \text{ N/mm}$$

#### Schéma zapojení vzduchového pružícího systému



Obrázek 124. Schéma zapojení vzduchového pružícího systému. [autor DP]

Pozn. Toto schéma zapojení umožňuje po dosazení dalších prvků mj. kneeling tj. naklonění skříně vozidla např. při nástupu cestujících.

## 15.2. Příčné a podélné tuhosti vypružení

Příčná a podélná síla je navržena zjednodušeným modelem, kdy je uvažováno příčné zrychlení jako konstanta:

$$a_y = 0,8 + 0,3 = 1,1 \text{ ms}^{-2} \quad (53)$$

... (0,8 ms<sup>-2</sup> norma, 0,3 ms<sup>-2</sup> vliv bočního větru)

Dále je vypočítaná příčná síla jako násobek hmotnosti vypružených hmot a příčného zrychlení:

$$F_{y\_celková} = m_{vypr.} \cdot a_y \quad (54)$$

Dosažení navržené a již dříve vypočtené hodnoty:

$$F_{y\_celková} = 15\,298 \cdot 1,1 = 16\,828,3 \text{ N}$$

Vozidlo má v primárním vypružení celkem osm pružin:

$$F_y = \frac{F_{y\_celková}}{8} = \frac{16\,828,3}{8} = 2\,103,5 \text{ N} \quad (55)$$

$$k_y = \frac{F_y}{y} = \frac{2\,103,5}{0,025} = 84\,141,4 \frac{\text{N}}{\text{m}} \doteq \mathbf{84\,000 \text{ N/m}} \quad (56)$$

Tuhosti v podélném a příčném směru jsou považovány za shodné:

$$k_x = k_y$$

## 15.3. Výpočet vlastních frekvencí svislého vypružení celé soustavy

Tento výpočet je proveden pro parametry v tabulce 29.

Dosažení do matic dle vztahu (41):

$$M = \begin{bmatrix} 3\,450 & 0 \\ 0 & 12\,648 \end{bmatrix}$$
$$k = \begin{bmatrix} 9\,296\,898 + 750\,000 & -750\,000 \\ -750\,000 & 750\,000 \end{bmatrix}$$

Výpočet determinantu:

$$\det(K - \lambda M) = 0$$

$$\det \left( \begin{bmatrix} 10\,046\,898 - \lambda \cdot 3\,450 & -750\,000 \\ -750\,000 & 750\,000 - \lambda \cdot 12\,648 \end{bmatrix} \right) = 0$$

Z determinantu je získána charakteristická rovnice, ze které pak lze vyjádřit kořeny. ( $\lambda_1, \lambda_2$ ). Dosažením do rovnic (42) a (43) jsou vypočítány vlastní frekvence.

$$\lambda_1 = 54,785; \quad \omega_1 = \sqrt{\lambda_1} = 7,401 \text{ rad/s}; \quad f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{7,401}{2\pi} \doteq \mathbf{1,2 \text{ Hz}}$$

$$\lambda_2 = 2916,656; \quad \omega_2 = \sqrt{\lambda_2} = 54,006 \text{ rad/s}; \quad f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{54,006}{2\pi} \doteq \mathbf{8,9 \text{ Hz}}$$

Kde  $f_1$  ...frekvence souběžných kmitů  
 $f_2$  ...frekvence protiběžných kmitů

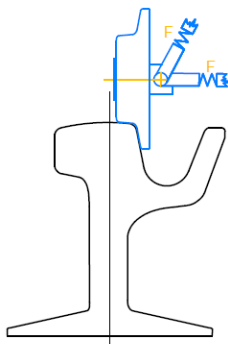
## 16. Senzory pro aktivní natáčení podvozků

Základní popis senzorů pro autonomní řízení vozidlo bylo již popsáno v teoretické části v kapitole 3.5.2. V následující kapitole je stručně předveden princip fungování senzorů, které by mohly být využity pro aktivní natáčení podvozků.

### 16.1. Senzory pro aktivní natáčení podvozků

Z hlediska bezpečnosti je nutné, aby natáčení podvozků záviselo na více vstupech. Vstupní informace musí být průnikem dat z více zdrojů. Jelikož vozidlo je obousměrné, musí být čidla umístěná z obou stran každého podvozku. Nabízí se: mechanický senzor polohy, optický senzor polohy, ultrazvuk a virtuální mapa tratě:

#### 16.1.1. Mechanický senzor polohy



Obrázek 125. Mech. senzor. [autor DP]

Základním senzorem polohy vozidla se nabízí mechanické kolečko. Toto kolečko by mělo podobný profil běžnému kolu. Kolečko by doléhalo na jízdní plochu kolejnice a stejně tak okolek kolečka. Kolečko by bylo přitlačováno na kolejnici tak, aby při jakémkoliv pohybu doléhalo na pojižděné plochy kolejnice. Pokud by tedy vozidlo vjelo do oblouku, kolečko by změnilo svoji polohu dříve než kolo a přes čidlo by předalo informaci řídicí jednotce, která by předala informaci servoaktuátoru.

Jeden z problémů tohoto řešení je, že by těchto koleček muselo být osm. Což je z hlediska hmotnosti i vzhledu nevhodné.

Mezi rychlostí vozidla a otáčkami kolečka platí, při uvažování poloměru kolečka  $r = 0,1 \text{ m}$ , vztahy:

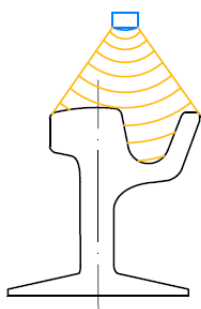
$$v_{\text{vozidla}} = 70 \text{ km/h} = 19,4 \text{ m/s}$$

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2\pi n}{60} \rightarrow n = \frac{60 \cdot v}{2\pi \cdot r} = \frac{60 \cdot 19,4}{2\pi \cdot 0,1} = 1\,852 \text{ ot/min} \quad (57)$$

Kolečko tedy bude mít velmi vysoké otáčky. Tomu musí být uzpůsoben návrh ložisek, ve kterém by byla uložena hřídel, na níž by bylo umístěné kolečko.

Existuje mnoho důvodů, proč je tento senzor nevhodný např: vysoké otáčky senzoru-kolečka, vysoká hmotnost, vliv vůlí mezi kolem a kolejnicí na generovaný signál, dynamika jízdy nevypružených kol (odskakování ve svislém a příčném směru, nutnost servisu atd.

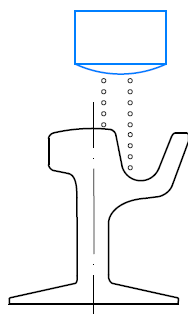
### 16.1.2. Optický senzor polohy



Princip je založen na základním principu, paprsky dopadají na kolejnici a vracejí se zpět. Problém může ale nastat při změně světelných podmínek okolí tramvaje. Bylo by tedy nutné vytvořit kryt, který by kryl snímaný prostor od slunečních či jiných světelných paprsků, aby nevznikala nesprávná data. Nicméně i tak je velmi pravděpodobné, že by byl senzor rušen. Optický senzor se jeví i přesto jeví jako vhodnější řešení než mechanický.

Obrázek 126. Optický senzor. [autor DP]

### 16.1.3. Ultrazvukový senzor



Obrázek 127. Ultrazvukový senzor. [autor DP]

Ultrazvukové vlny dopadají na kolejnici a odrážejí se zpět do senzoru. Největší problém ultrazvuku bývá krátký dosah. Pro účely snímání křivosti kolejnice tento problém nepředstavuje překážku.. Toto řešení se jeví jako pravděpodobně nejvhodnější, jelikož by nemělo docházet k rušení signálu.

Snímání křivosti koleje je velmi náročné. Je proto na místě uvažovat i nad jinými způsoby, jak předávat servoaktuátoru informaci o křivosti kolejnice a jejím typu.

### 16.1.4. Virtuální mapa tratě

V Praze již existuje projekt s názvem EMA (Elektronická mapa trati). V dnešní době slouží ovšem pouze na některých tratích a má velmi omezenou funkci. Např. hlášení zastávek, zvýšení intenzity světla v tunelu atd.

Základní princip systému „virtuální mapy tratě“ spočívá v umístění čipů do kolejnicového pásu. Tyto čipy předávají informace vozidlu, které přes ně přejezdí. Domnívám se, že prostřednictvím těchto čipů, které by byly umístěny (nejen) před obloukem, by mohlo být natočení podvozku dostatečně přesné.

Vozidlo by před vjezdem do oblouku načítlo z čidla všechny potřebné informace. Především tedy křivost oblouku a rychlost, se kterou má oblouk projet. Tyto informace by pak byly předány trakčním motorům a servoaktuátoru, který by nastavil podvozek do radiální polohy.<sup>16</sup>

Výhodou tohoto systému by mj. mohlo být neustále optimalizování jízdních vlastností vozidla při průjezdu obloukem z naměřených dat a dále předávání těchto dat do čidel umístěných

<sup>16</sup> Na tomto principu, je založená výpočetní simulace aktivního natáčení podvozků v programu MBS SIMPACK v kapitole: 18

v infrastruktuře. Bylo by velmi vhodné, aby tato čidla byla on-line, a mohla tak být ovládaná v případě nutnosti z centrály.

Čipy v městské infrastruktuře by musely být vhodně skryté, aby je nebylo možné ovlivňovat či ničit. V případě nefunkčnosti těchto čipů by vozidlo mělo být vybaveno nouzovými senzory, které by vozidlu umožňovaly průjezd oblouku při aktivním natáčení z důvodu bezpečnosti při výrazně nižší rychlosti. Tyto senzory by pravděpodobně fungovaly na principech uvedených v podkapitole 16.1.

Další teoretickou variantou by mohla být lokalizace polohy vozidla pomocí systémů GPS či Galileo. Problémem těchto systémů je však nízká přesnost, zvláště v městské zástavbě. S přesností, kterou v dnešní době tyto systémy vykazují je tato varianta nepoužitelná.

## 17. Trakce vozidla

Aby bylo možné zjistit potřebnou energii, kterou vozidlo musí přijmout pro vykonání potřebné práce, je nejprve nutné, definovat okrajové podmínky jízdy.

### 17.1. Jízdní vlastnosti vozidla

K navržení potřebné kapacity akumulátorové baterie se nabízejí dvě strategie provozu - dobíjení. Jedna varianta - četné dobíjení, nižší potřebná kapacita. Druhá varianta - méně četné dobíjení, vyšší potřebná kapacita.

- 1) Napájecím pásem typu např. APS pro nabíjení baterií by byly vybaveny pouze některé zastávky. Především zastávky, které jsou často frekventované a výměna cestujících na nich trvá nejdéle. Dále tyto zastávky musejí být rozmístěny tak, aby všechny úseky bylo možné projet, tzn., aby na všechny jednotlivé úseky vystačila kapacita baterií. Na traťových úsecích s velkými jízdními odpory např. Malostranská - Bílá hora (velké stoupání) musí být více „nabíjecích“ zastávek než v úseku Staroměstská – Modřany (úsek téměř bez stoupání). Rozmístění nabíjecích zastávek by tedy nebylo podle vzdálenosti, ale podle energetické náročnosti úseku. Tato varianta je velmi náročná na infrastrukturu. Vozidla by ovšem mohla být podstatně lehčí.
- 2) Vozidlo by ujelo trasu z počáteční do koncové zastávky na jedno nabití. Tato varianta se jeví jako nejjednodušší z hlediska investic do infrastruktury tratě. Otázkou je, zda je vhodné, aby vozidlo jezdilo s takto velkou zátěží, kterou budou baterie pravděpodobně představovat.

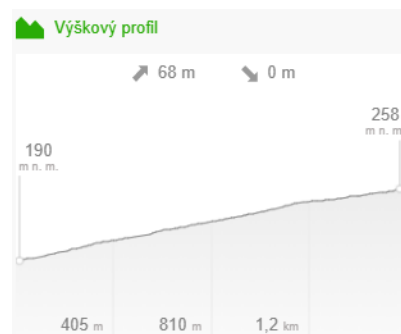


Pro popsání těchto dvou variant byly zvoleny následující traťové úseky:

- 1) Pro tuto variantu je zapotřebí zvolit nejnáročnější úsek. Tedy úsek s největším stoupáním. Byl zvolen úsek ze zastávky Malostranská na Pražský hrad. Tato varianta je dále podrobně propočítaná.

$t$ ... doba jízdy	219 s
$s$ ... délka úseku	1 600 m
$p$ ... převýšení	68 m
$S$ ... sklon	42,10 ‰
$v$ ... průměrná rychlost	19,20 km/h 5,33 m/s

Tabulka 30. Parametry tratě 1.



Obrázek 128. Výškový profil tratě 1.[25]



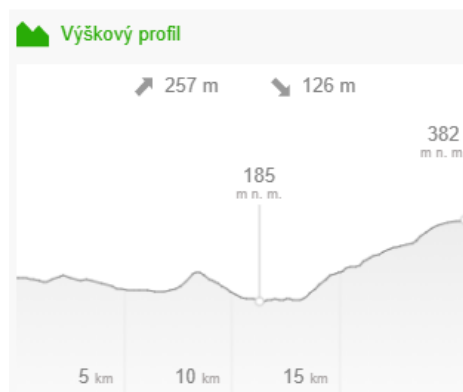
Obrázek 129. Mapa tratě 1.[31]

- 2) Druhá varianta je jízda vozidla bez nabíjení od počáteční do koncové zastávky. Pro popis této varianty byla použita tramvajová linka číslo 22.

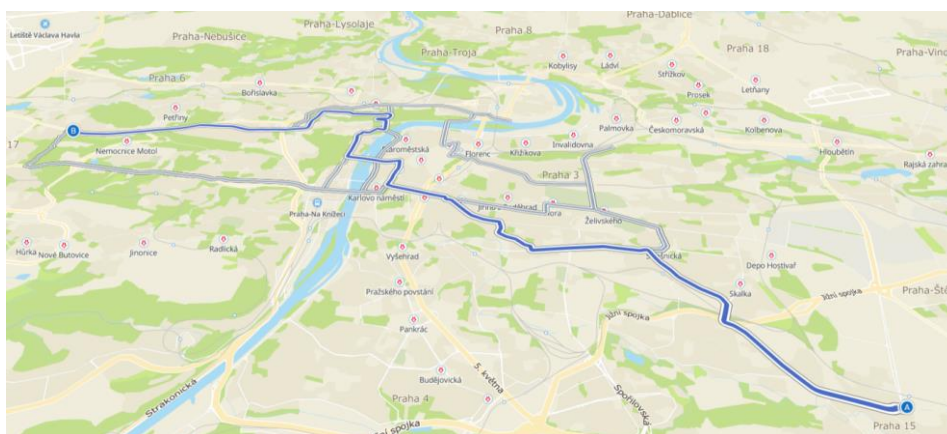
Na rozdíl od první varianty pro takto dlouhou trať je velmi obtížné udělat přesný popis odporů působících na vozidlo. Proto je popis této varianty výrazně zjednodušen. Vozidlo pojedí průměrnou rychlostí, kterou lze jednoduše vypočítat z délky trati a času, za který ji vozidlo projede. Sklon na trati je zjednodušen (viz tabulka 31.) na sklon trati k Vltavě a od Vltavy. Stoupání před náměstím Míru (resp. zastávkou Jana Masaryka) je zanedbáno.

$t$ ... doba jízdy	3816 s
$L$ ... délka úseku	20 900 m
$L_1$ ...	12 400 m
$L_2$ ...	9 700 m
$p_1$ ... převýšení	126 m
$p_1$ ... převýšení	197 m
$s_1$ ... sklon klesání	13 ‰
$s_1$ ... sklon stoupání	42,1 ‰
$v$ ... průměrná rychlost	19,7 km/h

Tabulka 31. Parametry tratě 2.



Obrázek 130. Výškový profil tratě 2. [27]



Obrázek 131. Mapa zvolené tratě. [26]

Dále jsou tyto parametry použity do výpočtu odporů působících na vozidlo při jízdě:

### 17.1.1. Odporů působících na vozidlo

Odporů představují zásadní parametr pro vypočtení potřebné energie. Proto jsou v následující kapitole podrobně popsány.

#### 17.1.1.1. Jízdní odporů

Pro popis měrného jízdního odporu je kvadratický polynom charakterizující jízdní odporů:

$$p_o = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad [N/kN] \quad (58)$$

Jízdní odpor pak lze následně dopočítat:

$$F_o = p_o \cdot m \cdot g \quad [N/kN] \cdot [t] \cdot [m/s^2] \quad (59)$$

Rovnice měrného jízdního odporu  $p_o$  obsahuje tři konstanty (a,b,c). Konstanta a, tj. absolutní člen v polynomu jízdního odporu, zohledňuje valení a tření v ložiskách. Tento člen má obecně pro kolejovou dopravu hodnotu  $a = 2 [N/kN]$ . Člen b reprezentuje odporů vyvolané kmitavými pohyby vozidla, které maří energii. Tato síla je však velmi malá, a proto ji zanedbávám. (Pro příklad pro rychlost 100 km/h představuje cca 1 [N/kN]). Člen c představuje aerodynamický odpor. Lze jej vyjádřit pomocí vztahu:

$$F_{ov} = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot v^2 \cdot C_x \cdot S \rightarrow c = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_x \cdot S}{m \cdot g} \quad (60)$$

S ... čelní plocha [m<sup>2</sup>]  
 C<sub>x</sub> ... součinitel tvaru vozidla  
 ρ ... hustota vzduchu [kg/ m<sup>3</sup>]

### 17.1.1.2. Odpor ze sklonu

Jedná se o traťový odpor, který na vozidlo působí při jízdě do stoupání. Sílu, která působí proti jízdě vozidla, pak lze vyjádřit jako:

$$F_s = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (61)$$

Dále pak lze vyjádřit:

$$\rightarrow p_s = \frac{F_s}{m \cdot g} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha}{m \cdot g} = \frac{h}{l} = s [\text{‰}] \quad (62)$$

Je tedy zřejmé že měrný odpor ze sklonu je roven sklonu tratě v promilích tzn. **ps** N/kN = s [‰].

### 17.1.1.3. Odpor oblouku na žlábkové kolejnici

Jelikož vozidlo bude projíždět oblouky s malými poloměry v žlábkových kolejnících, nelze tento odpor zanedbat. Pro jeho výpočet je použit empirický vzorec:

$$W_k = m \cdot g \cdot \frac{0,158 \cdot a + 0,033 \cdot s_R}{R} \quad (63)$$

a ... rozvor vozidla [m]  
 s<sub>R</sub> ... vzdálenost styčných kružnic [m]  
 W<sub>K</sub> ... odpor oblouku [N]

## 17.2. Energetická bilance vozidla

Práci, kterou vozidlo vykoná při jízdě vozidla lze jednoduše vypočítat podle vzorce:

$$W_t = F_t \cdot s [J] \quad (64)$$

Kde F<sub>t</sub> je tažná síla a s je dráha. Dále po provedení integrace podle dráhy, lze získat součet všech dílčích prací:

$$W_t = \int_0^L F_t \cdot ds [J] \quad (65)$$

Práce, vytvořená při brzdění EDB, se může buďto mařit v odpornících, nebo jí lze akumulovat. Dále je sestavená stejná rovnici jako v předešlém případě, ovšem pro brzdění:

$$W_B = F_B \cdot s [J] \quad (66)$$

$$W_B = \int_0^L F_B \cdot ds [J] \quad (67)$$

### 17.3. Trakční charakteristika

Základním grafem popisující trakční schopnost vozidla je trakční charakteristika. Zobrazuje závislost hnací síly na rychlosti vozidla. Tažná síla  $F_t$  představuje sílu na obvodu kol. Křivku tvoří tři omezení. Omezení adhezí, výkonem motorů a rychlostí. Dále jsou na grafu zobrazené jízdní odpory, které s přibývajícím rychlostí výrazně rostou.

$$F_h = F_t - F_o \quad (68)$$

a) Adhezní omezení

$$F_{adh} = \mu_a \cdot m_{adh} \cdot g \quad (69)$$

$$F_{roz} = \frac{M_{max}}{r_{ojeté}} \quad (70)$$

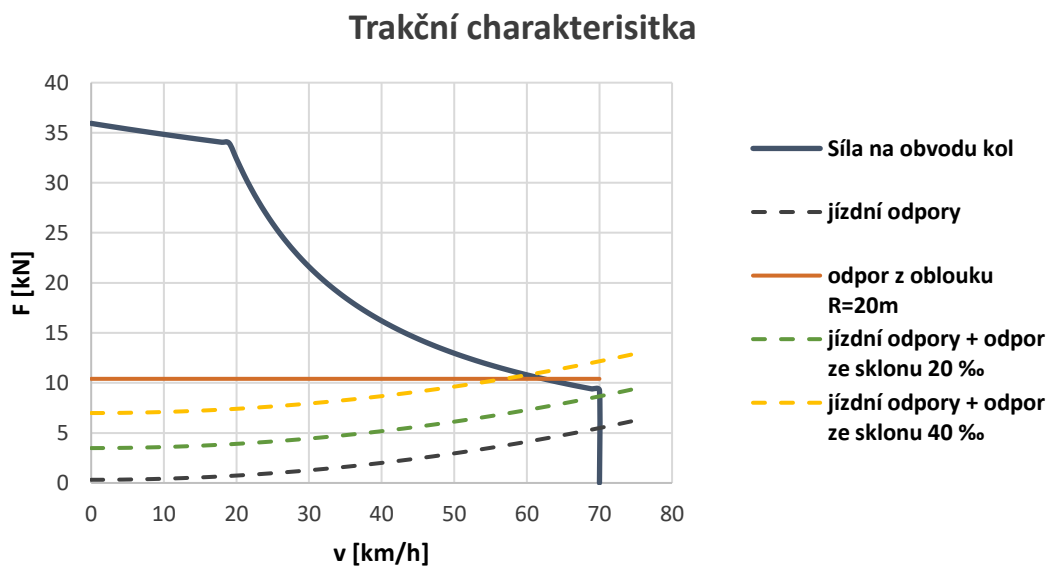
$$F_{rozv} = F_{roz} \cdot n_{mot} \quad (71)$$

b) Výkonové omezení

$$F_t = \frac{P_t \cdot 3,6}{v} \quad (72)$$

c) Rychlostní omezení

$$v_{max} = 70 \text{ km/h}$$



Obrázek 132. Trakční charakteristika prázdného vozidla. [autor DP]

### 17.4. Brzdová charakteristika

a) Adhezním omezením

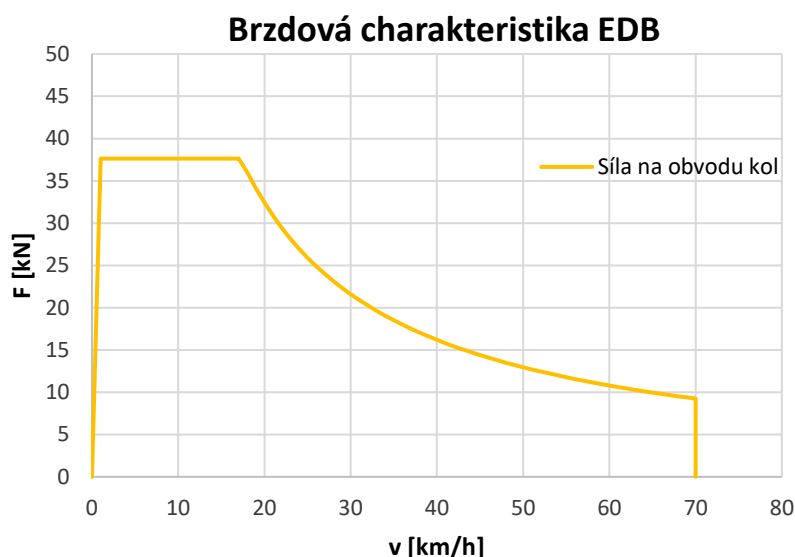
$$F_{adh} = \mu_a \cdot m_{adh} \cdot g \quad (73)$$

b) Omezení výkonem

$$F_B = \frac{P_B \cdot 3,6}{v} \quad (74)$$

c) Rychlostní omezení

$$v_{max} = 70 \text{ km/h}$$



Obrázek 133 brzdová charakteristika EDB. [autor DP]

## 17.5. Tachogram

Tachogram obecně popisuje závislost rychlosti vlaku na jiném parametru. Tímto parametrem bývá nejčastěji ujetá dráha nebo doba jízdy. V rámci tachogramu jsou rozlišovány 4 způsoby pohybu vozidla, přičemž všechny 4 typy pohybů se v tomtéž tachogramu nemusí vyskytovat. Jedná se o zrychlování, jízdu konstantní rychlostí, jízdu výběhem a zpomalování. (Pro zjednodušení ve svém tachogramu neuvažují jízdu výběhem).

Řidič tramvaje jede vždy maximální možnou rychlostí s maximálním možným zrychlením. Dosaženou maximální rychlost udržuje co nejdelší možnou dobu. Poté brzdí opět maximálním možným zpomalením. Jedná se o extrémní možnost provozu vozidla („jízda silou“).

Tachogram uvedený na obrázku 8 znázorňuje 1. variantu. Tedy jízdu vozidla ze zastávky Malostranská do zastávky Pražský hrad. Primárním cílem vytvoření tohoto tachogramu je dimenzování baterií, pro tento jízdní cyklus. Proto je ve výpočtu uvažováno maximálně obsazené vozidlo, které je energeticky náročnější nežli prázdné.

### 17.5.1. Varianta 1

Nejprve je nutné vypočítat tachogram pro daný úsek. K výpočtu je zapotřebí zjistit informace o reálném provozu vozidla:

#### Trať

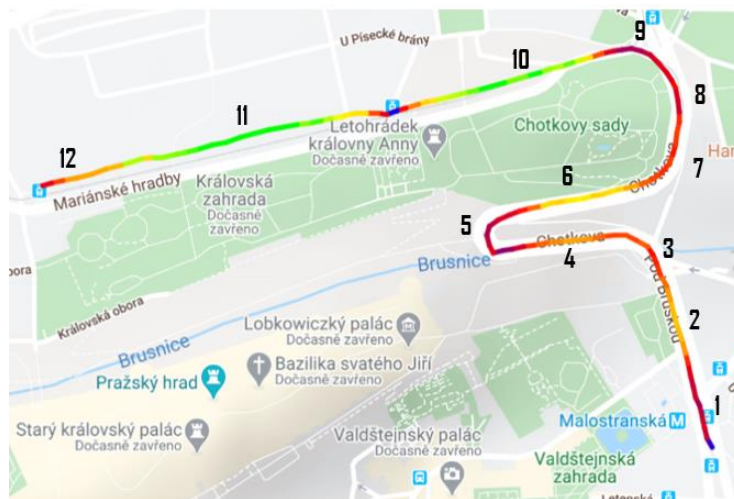
Pomocí webové aplikace mapy.cz byla odměřena délka jednotlivých částí zkoumané tratě. Tyto délky jsou zaznamenány v tabulce 32.

#### Rychlost

Dále byly zjištěné rychlosti, kterými reálná vozidla projíždějí jednotlivé úseky tratě. K tomu byl použit mobilní telefon a aplikace „Geo Tracker“ (version 4.0.2.1750). Tato aplikace je schopná vyexportovat soubor ve formátu gpx., který lze dále zpracovávat. Měření probíhalo dne 9.5. 2020 v 15:00 – 16:45 a realizováno v tramvaji 15T linky 22. Pro výpočet tachogramu jsou uvažovány vždy maximální rychlosti vozidla na dílčích úsecích. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 32.

	$s$ [m]	$v_{max}$ [km/h]
1	44	20
2	160	40
3	51	20
4	135	40
5	126	20
6	150	50
7	92	40
8	97	20
9	46	15
10	52	25
11	225	50
12	424	50
	<b>1602</b>	<b>33,5</b>

Tabulka 32. Dráhy a rychlosti.



Obrázek 134. Trasa zkoumaného jízdního cyklu. [27],[autor DP]

K vykreslení tachogramu byly využity následující vztahy založené na základních fyzikálních principech:

$$F_{rozjezdová} = \min(F_{adh}; F_t) ; F_{brzdná} = \min(F_{adh}; F_B) \quad \dots \text{síly na obvodu kol}$$

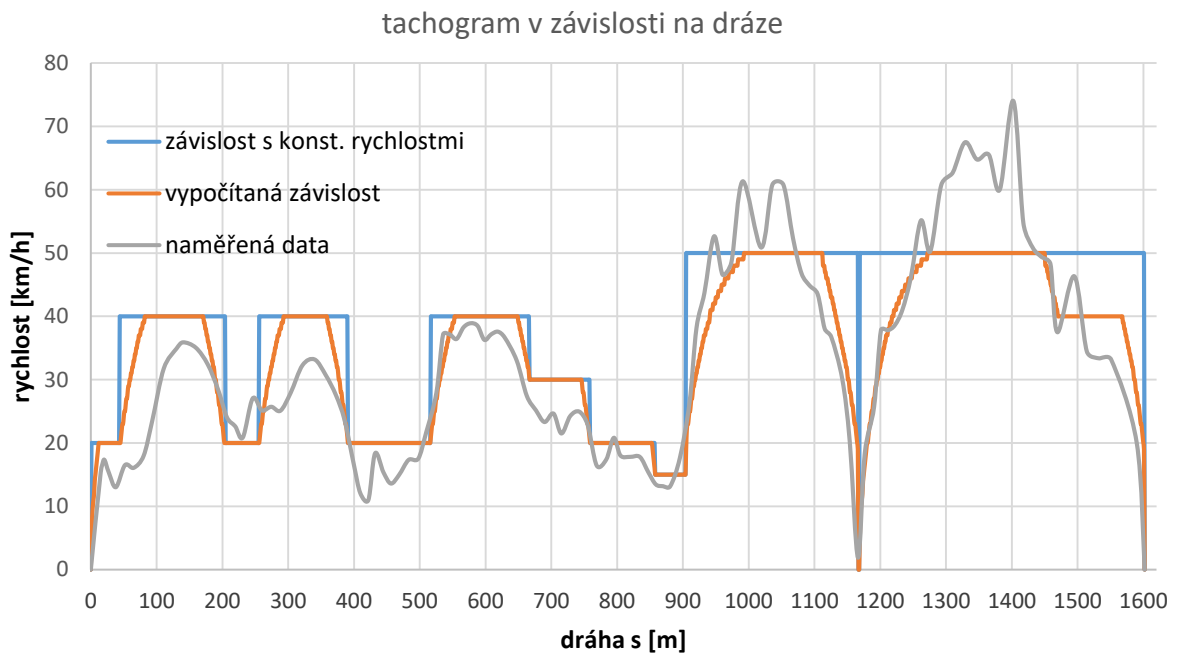
Dále je nutné vypočítat přírůstek dráhy pro konkrétní úsek.

$$L_2 = L_1 + \Delta s = L_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{a_2 - a_1} \quad (75)$$

$$a_r = \frac{F_{roz.} - O}{m_{red}} \quad \text{resp.} \quad a_b = \frac{F_{brz.} + O}{m_{red}} \quad (76)$$

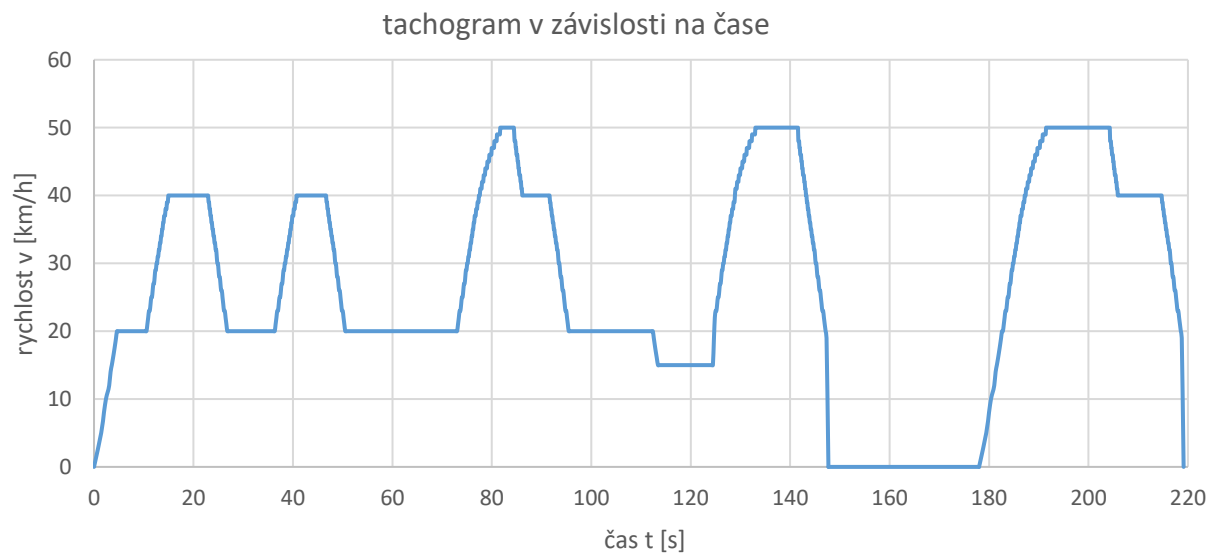
Takto vypočítaná zrychlení resp. zpomalení však mohou být poměrně velká, a to především na začátku rozjezdu nebo brzdění. Proto jsou kvůli bezpečnosti cestujících tato zrychlení omezená: Maximální rozjezdové zrychlení:  $1,3 \text{ m/s}^2$ . Maximální zábrzdné zpomalení  $1,5 \text{ m/s}^2$ . [6]

Na obrázku 136. je zobrazen tachogram s maximálními konstantními rychlostmi na daných úsecích. Dále vypočtené hodnoty a naměřené hodnoty. Jak již bylo dříve zmíněno, signál GPS je ve městské zástavbě často nepřesný, proto jej nelze brát vždy zcela směřodatně. Pro detailnější práci s daty naměřenými pomocí GPS by bylo vhodné data formátu GPX ještě korigovat. Nebo využít jiného systému pro měření rychlosti.



Obrázek 135. Tachogram v závislosti na dráze. [autor DP]

Při výpočtu tachogramu v závislosti na čase bylo postupováno podobně. Časový krok je vypočten ze vztahu:  $t_2 = t_1 + \frac{\Delta s}{v}$  (77). Vozidlo stojí v zastávce po dobu 30 s.



Obrázek 136. Tachogram v závislosti na čase. [autor DP]

### 17.5.1.1. Potřebná energie pro zvolený úsek

**Celková práce vozidla na daném traťovém úseku:**

Rozdílem práce vykonané tažnou silou a práce vykonané brzdou vynásobené účinností rekuperace (akumulace), lze získat energii, kterou vozidlo na daném traťovém úseku spotřebuje.

$$W = \int_0^L Ft \cdot ds - \eta_{rek} \cdot \int_0^L FB \cdot ds = W_T - \eta_{rek} \cdot W_B \quad (78)$$

$\eta_{rek}$  ... účinnost rekuperace 60%

$$J \rightarrow kWh = J \cdot 2,778 \cdot 10^{-7} = kWh$$

$$W = 12\,965 \text{ kJ} = \mathbf{3,6 kWh}$$

U tramvají je obvykle měrná trakční spotřeba v rozmezí 40 až 60 Wh na kilometr a tunu [31]. Pro 3,6 kWh na 1,6 km a 16,5 t, to tedy představuje 136 Wh/km/t. Tento výsledek, neodpovídající uvedenému rozmezí, je dán velkým převýšením. Pouze potenciální energie je 3,057 kWh, což je 85% celkové odebrané energie.

### Pomocné spotřebiče

K energii potřebné pro trakci je ještě nutné přičíst i energii, která je potřebná pro řízení vozidla, vytápění, klimatizaci, osvětlení, informační plochy atd. Pro segmentovou tramvaj je uvažován příkon pomocných spotřebičů s ohledem na jejich vysoké požadavky jako:  $P' = 20 \text{ kW}$ . Spotřebovaná pomocná energie na jízdním cyklu pak tedy je:

$$E_{pom} = \frac{P' \cdot t}{3600} = \frac{20 \cdot 219}{3600} = 1,22 \text{ kWh} \quad (79)$$

### Celková energie

K vypočítané práci je přičtena energii, kterou spotřebují pomocné spotřebiče.

Tedy:

$$E_{celk} = W + E_{pom} \quad (80)$$

Dosažení:

$$E_{celk} = 3,6 + 1,22 = 4,82 \text{ kWh} \cong 5 \text{ kWh}$$

#### 17.5.1.2. Baterie

S ohledem na stárnutí baterie a s tím spojený pokles kapacity – je nutné počítat s tím, že na konci deklarované životnosti článků je jejich kapacita na **80%** původní hodnoty. Dále je vhodné zvolit zálohu energie, která je potřebná při výskytu mimořádných událostí. Hodnota této zálohy se odvíjí od požadavků zákazníka či volbě výrobce. Volba: **10 %**.

Potřebná energie pro jízdu vozidla na daném úseku se spočítá:

$$E_1 = \frac{E_{celk}}{0,8} = \frac{5}{0,8} = 6,25 \text{ kWh} \quad (81)$$

Uvažování provoz v rozmezí 20 až 90 % kapacity:

$$E_2 = \frac{E_1}{0,7} = \frac{6,25}{0,7} = 8,9 \text{ kWh} \quad (82)$$

Na závěr pak včetně provozní rezervy (10 %) lze vypočítat potřebnou kapacitu:

$$E_{bat} = E_2 \cdot 1,1 = 9,8 \text{ kWh} \cong \mathbf{10 kWh} \quad (83)$$



### Závěr varianty 1:

Z baterie je potřeba získávat výkon 180 až 200 kW. Ovšem baterie s energetickou kapacitou 10 kWh pro takovýto výkon, navíc ještě s uvažováním využití rekuperace, neexistuje [31]. Proto pro takto zvolený úsek není možné navrhnout trakční baterii. Úsek mezi nabíjením baterií by tedy bylo vhodné prodloužit tak, aby baterie byly dimenzovány pro větší kapacitu. Pro takto zvolený krátký úsek nemá smysl baterii navrhovat.

*Pozn: Ve Švýcarsku, ve městě Ženeva jsou provozovány článkové elektrobusy, které fungují na stejném principu, tj. průběžné nabíjení baterií. Výrobce ABB uvádí, že 13 z 50 zastávek, je vybaveno rychlonabíjecí technologií. Baterie těchto autobusů ovšem mají 40 kWh. Tato hodnota už je pro rychlonabíjení podstatně přijatelnější.[32]*

Na základě této informace by se případně daly baterie předimenzovat na kapacitu cca 40 kWh, pro kterou je již možné využívat průběžné napájení.

### 17.5.2. Varianta 2

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, vyhodnocení této varianty je velmi zjednodušené. Pro navržení odporů, působících na vozidlo, je využita předchozí podkapitola. Z dílčích odporů je stanoven průměr zvláště pro cestu k nejnižšímu bodu, a poté od nejnižšího bodu (řeka Vltava). Dále jsou tyto odpory vynásobené délkou příslušného úseku a tím zjištěna práce pro první a druhý úsek.

	<b>L [m]</b>	<b>F [kN]</b>	<b>W [kJ]</b>
<b>dolu</b>	12 400	1,46	18 104
<b>nahoru</b>	9 700	8,21	79 655
<b>celkově</b>	20 900	14.463	<b>97 760</b>

Tabulka 33. Přehled parametrů varianty 2.

Energie potřebná pro jízdu z počáteční do koncové zastávky je 97 760 kJ, což je 27,2 kWh. Měrná spotřeba pak tedy vychází 78 Wh/km/t.

Viz předešlá kapitola, dosadím do vzorce (79).

$$E_{pom} = \frac{P' \cdot t}{3600} = \frac{20 \cdot 3\,816}{3600} = 21,2 \text{ kWh}$$

Dále dle vzorce (80):

$$E_{celk} = W + E_{pom}$$
$$E_{celk} = 27,2 + 21,2 = \mathbf{48,4 \text{ kWh}} \cong \mathbf{50 \text{ kWh}}$$

#### 17.5.2.1. Baterie

Jsou voleny stejné podmínky jako u předchozí varianty:

Potřebná energie pro jízdu vozidla na daném úseku se spočítá viz vzorec (81):

$$E_1 = \frac{E_{celk}}{0,8} = \frac{50}{0,8} = 62,5 \text{ kWh}$$

Je uvažován provoz v rozmezí 20 až 90 % kapacity dosazení do vzorce (82):

$$E_2 = \frac{E_1}{0,7} = \frac{62,5}{0,7} = 89 \text{ kWh}$$

Na závěr pak včetně provozní rezervy dle vzorce (83):  $E_{bat} = E_2 \cdot 1,1 = 98 \text{ kWh} \cong \mathbf{100 \text{ kWh}}$ <sup>17</sup>

### 17.5.2.2. Volba článku

Byly zvoleny tři nejhodnější technologie článků určených pro trakci vozidel. Jejich technické parametry jsou popsány v tabulce 34. [32], [33]

Parametr	Jednotka	LTO	NMC HP	NMC HE
Jmenovité napětí	V	2,3	3,7	3,7
Hmotnostní hustota energie jen článků	kWh/t	90	150	170 – 180
Objemová hustota energie jen článků	Wh/l	170	340	400
Trvalý vybíjecí proud	C <sup>18</sup>	6 - 8	4 – 5	2-3
Cena pořizovací	Kč/kWh	20 000	16 000	16 000
Počet cyklů	-	6 000	3 000	3 000
Cena opotřebení	Kč/kWh	3,3	5,3	5,3
Cena kontejneru (bez článků)	Kč/kWh	8 800	5 500	5 500
Hmotnost kontejneru (bez článků)	-	0,18 m <sub>čl.</sub>	0,3 m <sub>čl.</sub>	0,35 m <sub>čl.</sub>

Tabulka 34. Přehled parametrů doporučených technologií článků.

LTO (založeny na využití sloučeniny LiFePO<sub>4</sub> – lithium, nikl, kobalt, hliník a oxid) jsou nejtěžší, nejobemnější a nejdražší. Jejich velkou předností je, že snesou velké nabíjecí i vybíjecí proudy a mají velkou životnost. Protipólem jsou NMC HE (nikl, mangan, kobalt, HE - High Energy), které vyjdou menší, lehčí. Nevýhodou je, že by pravděpodobně nebylo možné rekuperovat plný výkon v brzdě. Dále také mají menší životnost. NMC HP (nikl, mangan, kobalt, HP High Power) jsou svými parametry mezi LTO a NMC HE. Na elektrobusech se spíše využívají NMC, pro kolejová vozidla je spíše trend využívat LTO.

Na základě těchto zkonzultovaných poznatků volím technologii **NMC HP**.

### Parametry baterie pro 2. variantu

Hmotnostní hustota energie zvoleného článku je **150 kWh/t**. Kapacita 150 kWh je tedy uložena ve člancích o hmotnosti 1 t. Pokud tedy potřebná energie pro trakci vozidla je 100 kWh, pak její hmotnost bude **m<sub>čl.</sub> = 0,67 t**. Dále je zapotřebí k hmotnosti článků přičíst ještě hmotnost skříně baterie, chlazení, elektroniku atd. Tyto hmotnosti jsou zohledněny koeficientem, který je uveden v posledním řádku tabulky 34 tj. 0,3 m<sub>čl.</sub>. Celková hmotnost baterie potom vychází:

<sup>17</sup> Tento výsledek je shodný s energií potřebnou pro trakci běžných elektrobuseů, které jsou již v reálném provozu. Tzn., že takovéto baterie se běžně vyrábějí a používají. [31]

<sup>18</sup> Proud článku se zpravidla udává v násobcích číselné hodnoty kapacity článku v Ah, například u článku s kapacitou 10Ah je proud 20A označován jako proud 2C.[33]

$$m_{bat} = m_{\text{čl}} + 0,3 \cdot m_{\text{čl}} = 0,67 + 0,20 = \mathbf{0,87 t} \quad (84)$$

Objemová hustota energie zvoleného článku je **340 kWh/l**. Kapacita 150 kWh je tedy uložena ve článkách o objemu 1 l. Objem článků tedy bude  $V_{\text{čl}} = 654 \text{ dm}^3$ . Pro přibližný výpočet objemu celé baterie mohou použít stejný koeficient jako pro hmotnost. Objem baterie potom tedy je:

$$V_{bat} = V_{\text{čl}} + 0,3 \cdot V_{\text{čl}} = 294 + 88 = \mathbf{382 l} \quad (85)$$

(Pro srovnání technologie LTO:  $m_{bat} = 1,3 t$ ,  $V_{bat} = 694 l$ )

Skříň baterie má rozměry 140x510x750 (vxšxh). Objem této skříně je:  $V_{sk} = 53,6 \text{ dm}^3$ . Celkově by bylo zapotřebí 8 skříní. Tyto skříně by měly objem  $428,4 \text{ dm}^3$ . Menší počet skříní by nespůsobil požadovaný objem pro baterie z předchozích výpočtů.

---

Pro úplnost je zde uvedena tabulka 35., ve které jsou pro variantu 1 při uvažování 40 kWh (viz Elektrobusy v Ženevě) vypočteny parametry baterie stejným principem jako pro variantu 2:

[kg],[l]	LTO	NMC HP
$m_{\text{čl}}$	444	267
$m_{skříň}$	80	80
<b><math>m_{bat}</math></b>	<b>524</b>	<b>347</b>
$V_{\text{čl}}$	235	118
$V_{skříň}$	42	42
<b><math>V_{bat}</math></b>	<b>278</b>	<b>153</b>

Tabulka 35. Parametry baterie pro variantu 1.

Je mnoho aspektů, které mohou v budoucnu ovlivnit rozhodování mezi těmito dvěma variantami. Např. Doba realizace, vývoj baterií, urbanistické pojetí zastávek, povolená max. rychlost tramvají, množství cestujících v MHD, ale také množství a velikost stoupání tratě, ve kterém bude vozidlo provozováno atd.

## 18. Vozidlo a kolej

Segmentová tramvaj má pro pouliční tramvajový provoz netradiční uspořádání pojezdu. Velkou raritou pro provoz v malých obloucích je především velký rozvor vozidla (8 m) a jedonápravové otočné podvozky. Je proto vhodné zjistit jeho základní jízdní vlastnosti a ověřit tak, zda je tento koncept vozidla použitelný pro tramvajový provoz ve městě. Pro tyto účely byl využit MBS program SIMPACK.

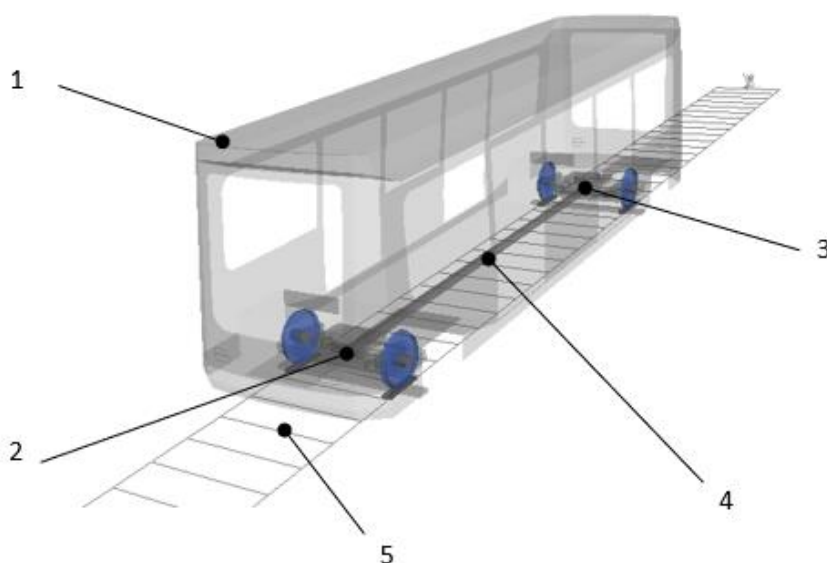
Základní parametry simulací:

Vozidlo:	Trat':
<ul style="list-style-type: none"><li>• 2m soustava</li><li>• Podvozky s nezávisle otočnými koly</li><li>• Aktivní natáčení podvozků</li><li>• Průměr kol 650 mm</li><li>• Profil kol– KP -1 viz příloha 3</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Přímá trať</li><li>• Přejízdění</li><li>• Oblouk: R20, R150</li><li>• Kolejnice NT1, B1, S49</li><li>• Bez sklonu upnutí kolejnic pro NT1 a B1</li><li>• Sklon upnutí kolejnic S49 je v Praze 1/20</li><li>• Bez stoupání, bez vzestupnice</li></ul>

### 18.1. Popis výpočetního modelu

#### 18.1.1. Struktura modelu

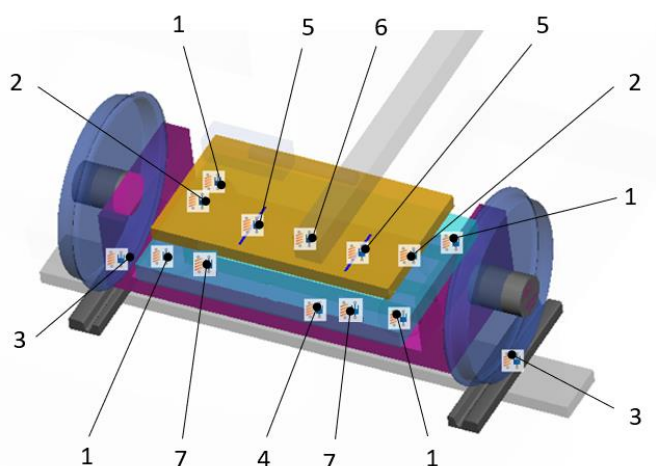
##### Vozidlo



Obrázek 137. Výpočetní model Segmentové tramvaje. [autor DP]

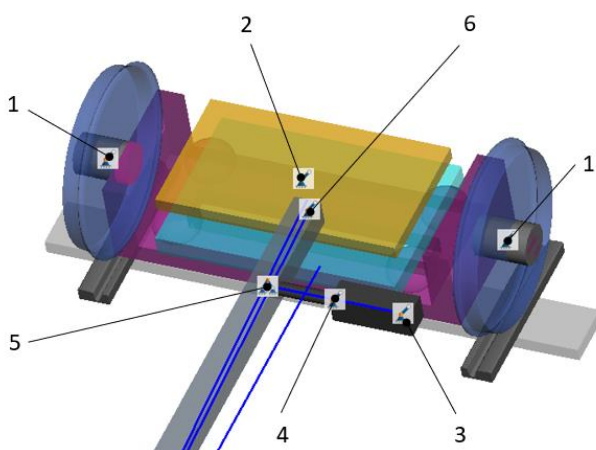
Části modelu	
1	Skříň vozidla
2	Přední podvozek
3	Zadní podvozek
4	Reakční tyč
5	Kolejnicový pás

## Podvozek:



Obrázek 138. Popis silových prvků ve výpočetním modelu podvozku. [autor DP]

Silové prvky	
1	Primární vypružení
2	Sekundární vypružení
3	Kontakt kolo-kolejnice
4	Štěrkové lože (Ballast)
5	Přenos podélných sil
6	Přenos příčných sil
7	Torzní stabilizátor



Obrázek 139. Popis vazeb ve výpočetním modelu podvozku. [autor DP]

Vazby	
1	Nápravnice-kolo
2	Kolébka-skříň
3	Uložení servoakt. do rámu
4	Výsuv servoakt.
5	Uložení servoakt. do reakční tyče
6	Uložení reakční tyče do rámu

## Skříň

Skříň vozidla je ve výpočetním modelu zcela tuhá. Počátek hlavního souřadnicového systému  $[0; 0; 0]$  je střed vozidla v rovině temene kolejnic. Poloha těžiště skříně byla odhadnuta na:  $T = [0; 0; 1,4]$ . Hmotnost plně obsazené skříně je viz hmotnostní bilance 12 645 kg.

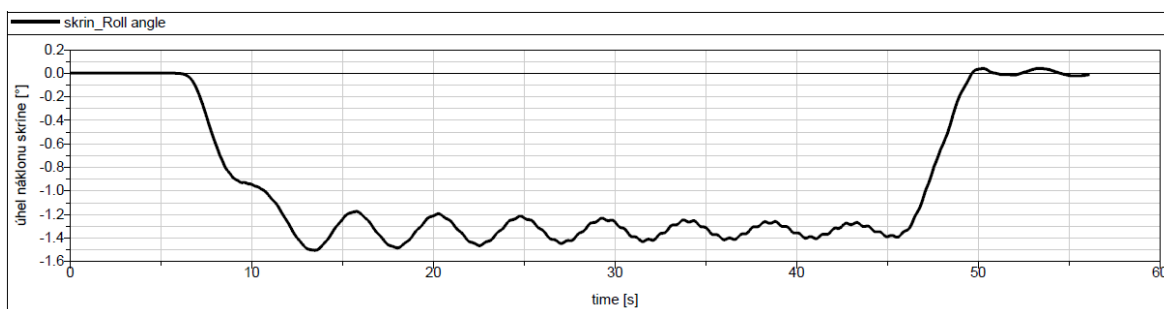
### 18.1.2. Parametry modelu

Jednotlivé principy fungování a parametry podvozku tedy např. svislé vypružení, přenos příčných a podélných sil atd., byly již popsány v kapitole 14.

Ve výpočetním programu je nutné tyto principy nasimulovat a v některých případech zjednodušit. Primární a sekundární vypružení bylo nahrazeno ocelovou vinutou pružinou o vypočtených tuhostech  $k_1$  a  $k_2$ . Příčné vypružení má lomenou charakteristiku viz příloha 2.

Do výpočetního modelu byly vloženy svislé tlumiče s odhadnutou konstantou tlumení 12 000  $Ns/m$ . Dále byly do modelu přidány torzní stabilizátory, pomocí nichž byl omezen náklon

skříně. Tuhost torzního stabilizátoru byla taktéž odhadnuta tak, aby náklon skříně výrazně nepřesáhnul 2°. Je umístěn mezi rám a kolébku.



Obrázek 140. Úhel náklonu skříně vozidla. [autor DP]

Průběh úhlu náklonu skříně v závislosti na čase byl nasimulován pro oblouk o poloměru 20m a rychlosti vozidla 10km/h.

Parametry vypružení a vedení vozidla užitých ve výpočetním programu jsou shrnuty v tabulce 36.

	[N/m]		[Ns/m]
$k_{x1}$	10e6	$b_1$	12 000
$k_{y1}$	10e6	$b_2$	12 000
$k_{z1}$	1 162 112		
$k_{x2}$	21 035		[N/m]
$k_{y2}$	21 035	$k_{táhlo}$	10e7
$k_{z2}$	205 639		
$k_{tstab}$	5 000 [Nm/rad]		

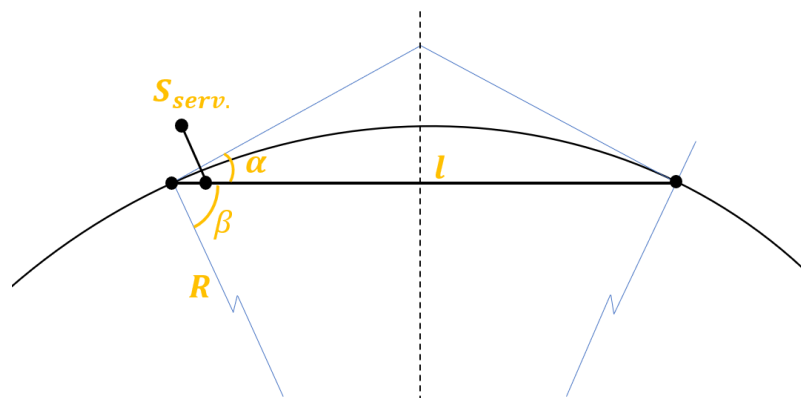
Tabulka 36. Parametry výpočetního modelu.

### 18.1.3. Funkce řízení servoaktuatoru při průjezdu obloukem

Jak již bylo popsáno v kapitole 14, vozidlo je vybaveno aktivním natáčením. Proto je nutné zjistit funkci výsuvu servoaktuatoru v závislosti na poloměru oblouku a dále v závislosti na poloze vozidla na předem definované trati.

#### Geometrické vyjádření výsuvu servoaktuatoru:

Na obrázku 141. je zobrazeno schéma mechanismu aktivního natáčení v oblouku. V části schématu na nadcházející stránce je přímka ve vodorovné poloze reakční tyč. Přímka natočená o úhel  $\alpha$  představuje rám podvozku.



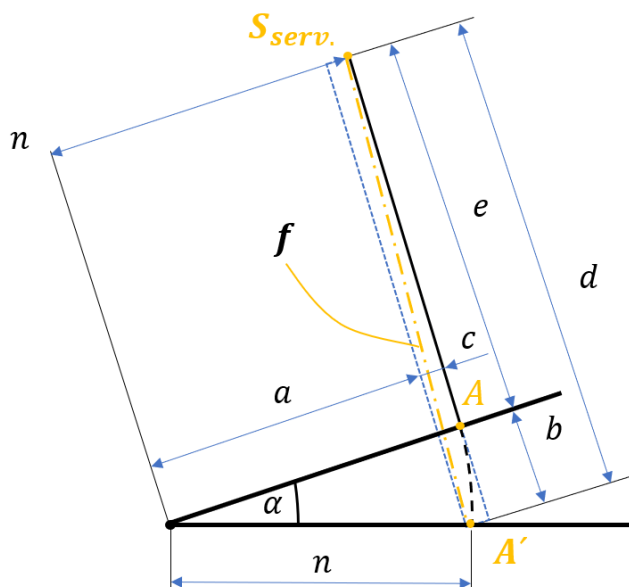
$$n = 380 \text{ mm}$$

$$e = 510 \text{ mm}$$

$$\alpha = 90 - \beta$$

$$\cos(\beta) = \frac{l/2}{R}$$

$$\rightarrow \arccos\left(\frac{l/2}{R}\right) = \beta$$



$$\frac{b}{a} = \operatorname{tg}(\alpha)$$

$$\rightarrow b = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot a$$

$$a = 1 - n \cdot \cos(\alpha)$$

$$c = n - a$$

$$d = e + b$$

$$f = \sqrt{d^2 + c^2}$$

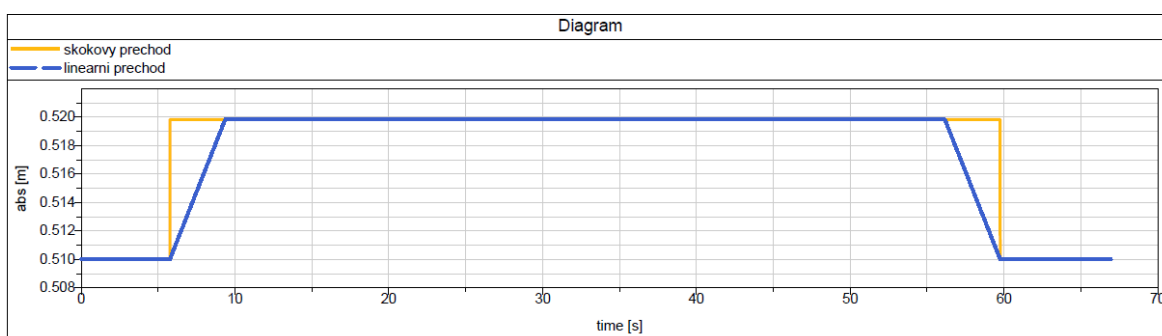
Obrázek 141. Geometrie výsuvu servoaktuátoru. [autor DP]

$$f = \sqrt{(e + b)^2 + (n - a)^2} = \sqrt{(e + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot a)^2 + (n - n \cdot \cos(\alpha))^2} \quad (86)$$

$$= \sqrt{(e + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot n \cdot \cos(\alpha))^2 + (n - n \cdot \cos(\alpha))^2}$$

#### 18.1.4. Funkce výsuvu v závislosti na čase

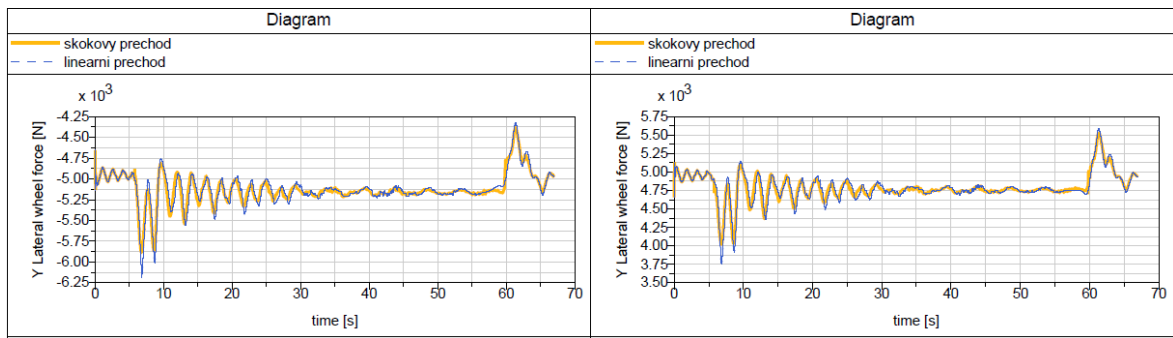
Průběh funkce výsuvu v závislosti na čase je uveden na obr 147. Pro dílčí simulace se průběh výsuvu liší s ohledem na zvolený poloměr, délku oblouku a výskyt přechodnic. Výsuv může mít buď skokový průběh nebo lineární (lineární rampy). „Skokový průběh“ je taktéž sklopen pod úhlem. Tento úhel je však velmi malý. Takto navržené funkce slouží k první aproximaci průběhu výsuvu. V dalším rozvoji by bylo vhodné zvolit průběh bez ostrých hran např. sinusový průběh tak, aby nevznikaly špičky v odezvě systému.



Obrázek 142. Porovnání skokového a lineárního výsuvu aktuátoru v závislosti na čase. [autor DP]

#### 18.1.5. Porovnání skokového a lineárního výsuvu servoaktuátoru

Lineární průběh je vhodný pro trať s přechodnicemi. Na následujícím obrázku je porovnán „skokový“ a lineární průběh výsuvu aktuátoru pro následující trať: přímá trať - oblouk o poloměru 150 m bez přechodnic - přímá trať. Výsledkem toho porovnání je závislost vodicích sil předního podvozku vozidla.



Obrázek 143. Porovnání vlivů výsuvů servoaktuátorů na průběh vodících sil. [autor DP]

Z hlediska výpočtu a možných nepřesností lze ze závislosti konstatovat, že se výsledek výrazně neliší. Při podrobnějším pohledu na závislost je nicméně rozpoznatelné, že skokový přechod výsuvu aktuátoru vykazuje, při vjezdu podvozku do oblouku, lehce menší výkmit v průběhu vodících sil na čase. Pro trať bez přechodnice je tedy patrně vhodnější „skokový“ přechod.

### 18.1.6. Algoritmus výsuvu v programu

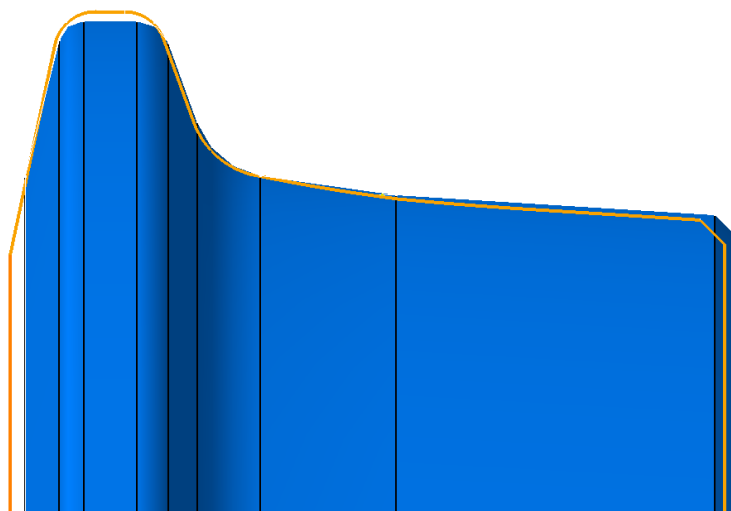
Výpočetní model je parametrizován pomocí subvars – proměnných, které jsou propojené tak, že se dílčí výsledky dopočítávají prostřednictvím softwaru. Dopčítávání je založené na základním fyzikálním vztahu:  $s = v \cdot t$ . Lze tedy jednoduše nastavit délku přímé trati, délku přechodnice a libovolný oblouk o libovolné délce a rychlosti. Doba jízdy vozidla a výsuv servoaktuátoru se dopočte bez zásahu uživatele. Model je tedy připravený pro simulaci jízdy aktivně natáčenými podvozky v různých traťových poměrech kolejové sítě.

### 18.1.7. Kontakt kolo – kolejnice

Pro výpočetní simulace byl použit profil kol viz příloha č3. Profil s označením KP-1 je používán pro tramvaje ve městě Plzeň.

Krátce před dokončením DP byla získána data k profilu kol, který používá DP Praha u tramvajů s nezávisle otáčivými koly.

Porovnání obou profilů kol je na obr.144. Oranžovou barvou je vyznačen obrys používaný v Praze. Z porovnání vyplývá, že profil kola použitý pro simulace má ve srovnání s profilem DP Praha stejný sklon boku okolku a mírně nižší kuželovitost v oblasti jízdní plochy



Obrázek 144. Porovnání profilů kol.



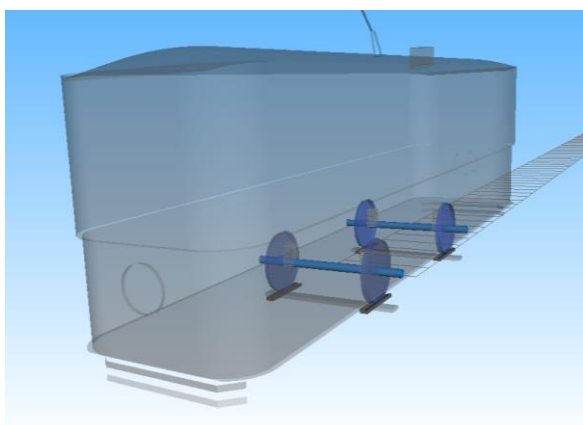
V Praze je nejvíce zastoupená kolejnice typu NT1 cca 50%. Dále kolejnice typu B1 cca 30-35% a S49E 15 – 20%. Viz kapitola 7. Proto tyto tři typy kolejnic jsem provedl simulace v MBS SIMPACK.

### 18.1.8. Porovnání s dvounápravovou tramvají typu Ringhoffer

Srovnání těchto vozidel bylo provedeno pomocí zjednodušených modelů proto, aby bylo zjištěno, pro jaký poloměr oblouku by měla mít Segmentová tramvaj s tuhým vedením kol stejný úhel náběhu, jako má Ringhoferova tramvaj v oblouku  $R = 20\text{ m}$ .

Na obr.149 a 150 jsou zobrazeny zjednodušené modely vozidel a dále jsou popsány jejich základní parametry.

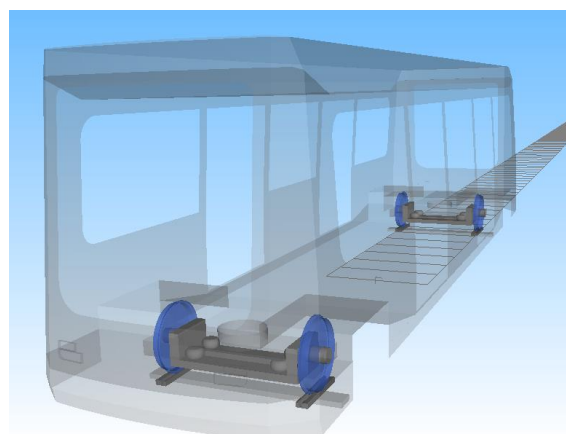
**Tramvaj typu „Ringhofer“**



Obrázek 145. Ringhoferova tramvaj. [autor DP]

Rozvor: 3 100 mm  
 $k_y = k_x = 10e7\text{ Nm}$   
 (Délka: 10 820 mm)  
 (Šířka: 2 130 mm)

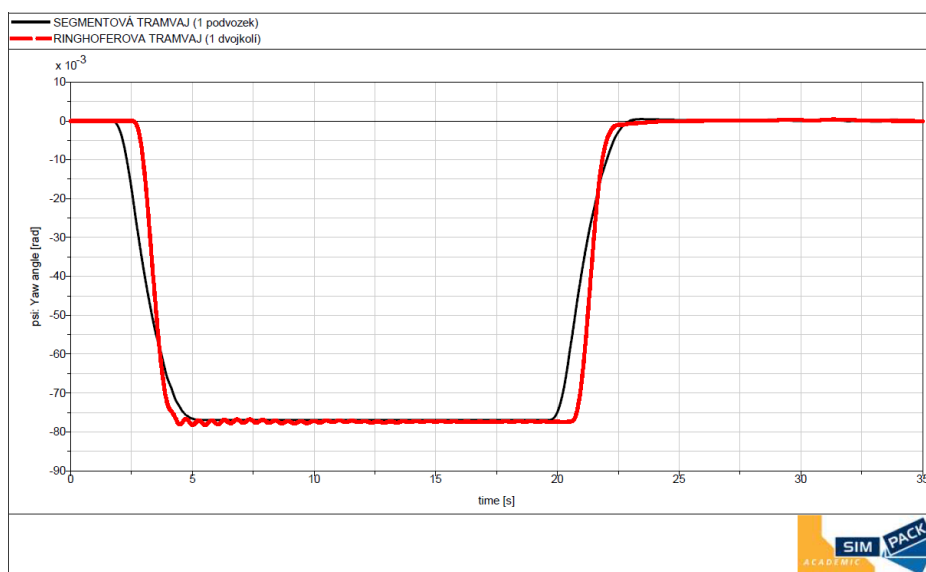
**Segmentová tramvaj**



Obrázek 146. Segmentová tramvaj. [autor DP]

Rozvor: 8 000 mm  
 $k_y = k_x = 10e7\text{ Nm}$   
 (Délka: 11 000 mm)  
 (Šířka: 2 400 mm +)

Bylo zjištěno, že stejný úhel náběhu má Segmentová tramvaj v oblouku o poloměru  $R = 52\text{ m}$ .



Obrázek 147. Porovnání úhlu náběhu. Ring. a Seg. tramvají. [autor DP]

$$\alpha = 0,077\text{ rad} = 4,4^\circ$$

$$\alpha = 0,077\text{ rad} = 4,4^\circ$$

$$R = 20 \text{ m}$$

$$R = 52 \text{ m}$$

$$\text{Ověření dle vzorece (1): } \alpha = \frac{p}{2 \cdot R} + \frac{y}{p}$$

Pro podvozek v těživé poloze lze získat hodnoty po dosazení  $y=0$ . Dosazení do rovnice:

$$\alpha = \frac{3,1}{2 \cdot 20} + \frac{0}{3,1} = 0,077 \text{ rad} = 4,4^\circ \qquad \alpha = \frac{8}{2 \cdot 52} + \frac{0}{8} = 0,077 \text{ rad} = 4,4^\circ$$

Simulací bylo ověřeno, že vozidlo s rozvorem 8 m a tuze vedeným dvojkolím, nemůže projet oblouk o poloměru 20 m. Aby vozidlo mohlo malé oblouky projíždět, musí být podvozek otočný.

## 18.2. Simulace jízdních vlastností vozidla

Přehled simulací:

- jízda obloukem o minimálním poloměru ( $R = 20 \text{ m}$ ) - cílem je zjistit požadavky na rejdovnost dvojkolí, hodnoty  $Y/Q$  a velikosti sil mezi vozidlem a kolejí
- jízda obloukem o poloměru 150 m - simulace ověření BPV na zborčené koleji (prázdný vůz), kolejnice 49E, výsledkem síly  $Y$  a  $Q$ .

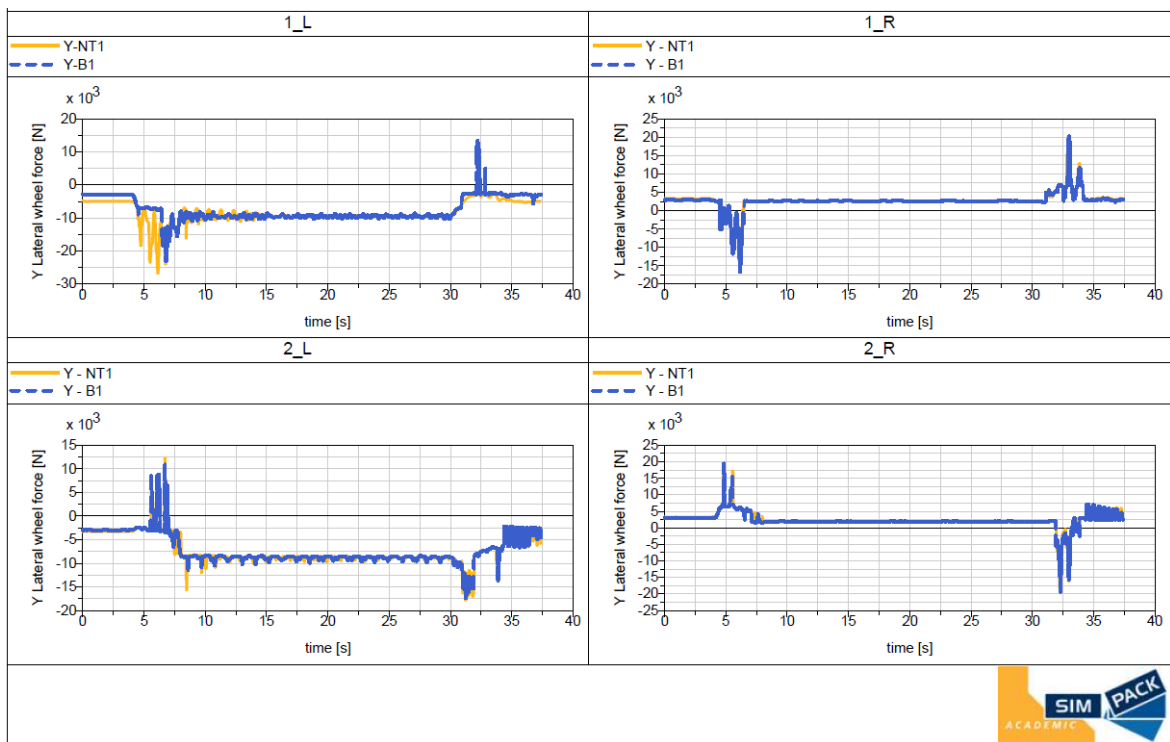
### 18.2.1. Jízda obloukem o poloměru $R=20 \text{ m}$

Pro simulaci byla použita trať skládající se z přímé trati, přechodnice a oblouku. Uspořádání tratě je přímá trať-přechodnice-oblouk-přechodnice-přímá trať.

<b>Vozidlo:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Rychlost vozidla 10 km/h</li></ul>	<b>Trať:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Přímá trať 15 m</li><li>• oblouk <math>R=20 \text{ m}</math>, délka <math>L=100 \text{ m}</math></li><li>• Přímá trať 15 m</li><li>• Přechodnice 10 m</li><li>• Kolejnice NT1, B1</li></ul>
--	--

Tabulka 37. Parametry pro jízdu vozidla v malém oblouku.

Délka oblouku byla takto zvolena, aby bylo možné zjistit hodnoty vodicích sil  $Y$ , blízcích se k hodnotám kvazistatickým.



Obrázek 148. Průběh vodicích sil v závislosti na čase pro  $R=20$  m. [autor DP]

Z průběhů vodicích sil je zřejmé, že algoritmus pro výsuv servoaktuátoru pro přední a zadní „dvojkolí“ při vjezdu do oblouku není optimální. Bylo by tedy vhodné najít funkci která splňuje: Když se začíná natáčet přední podvozek, vjíždí do oblouku, vůči reakční tyči, je nutné, aby se začal natáčet nějakým menším úhlem i zadní podvozek.

### 18.2.2. Bezpečnost proti vykolejení $\left(\frac{Y}{Q}\right)$ .

Vyhodnocení BPV je provedeno dle ČSN 14363 metodou 2. Zkouška se skládá z dvou dílčích zkoušek.

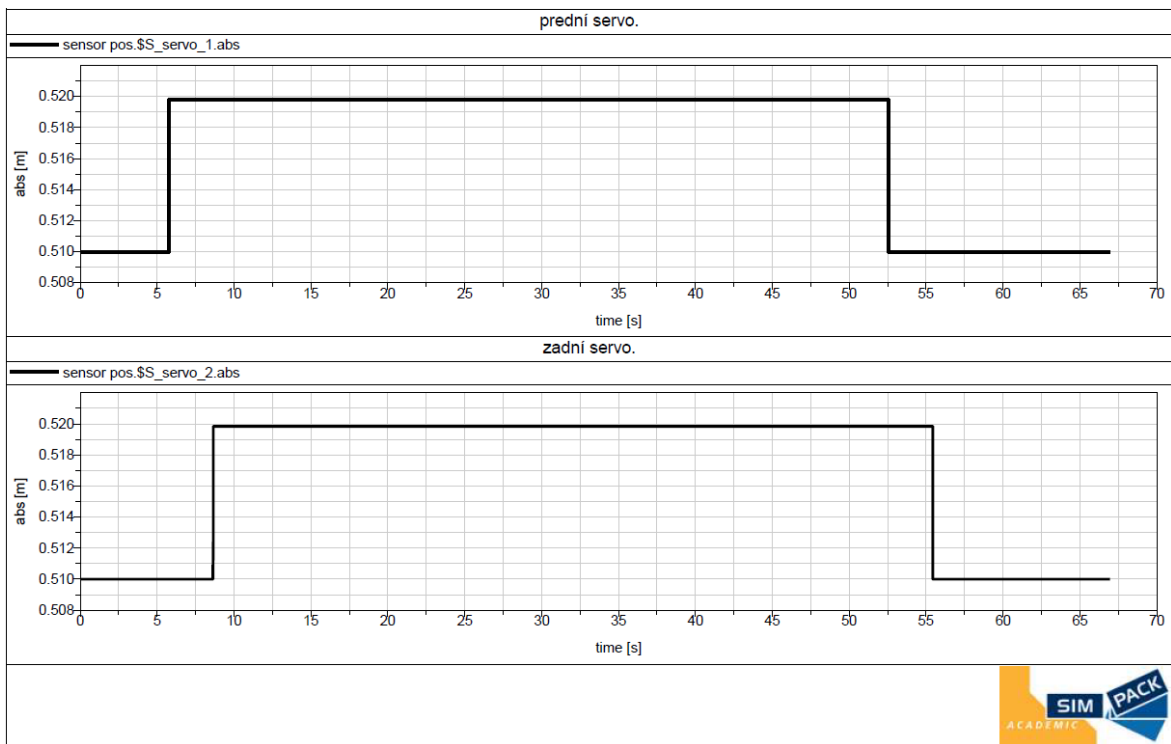
- 1) Jízda definovanou rychlostí po definované trati. Viz tabulka 38. Výsledkem je Y-vodící síla.
- 2) Zjištění změn kolových sil vlivem zborcení koleje – zkrucovací zkouška. Výsledkem je  $Q_{min}$ .

**Simulace jízdy za účelem zjištění síly Y byla provedena za těchto okrajových podmínek:**

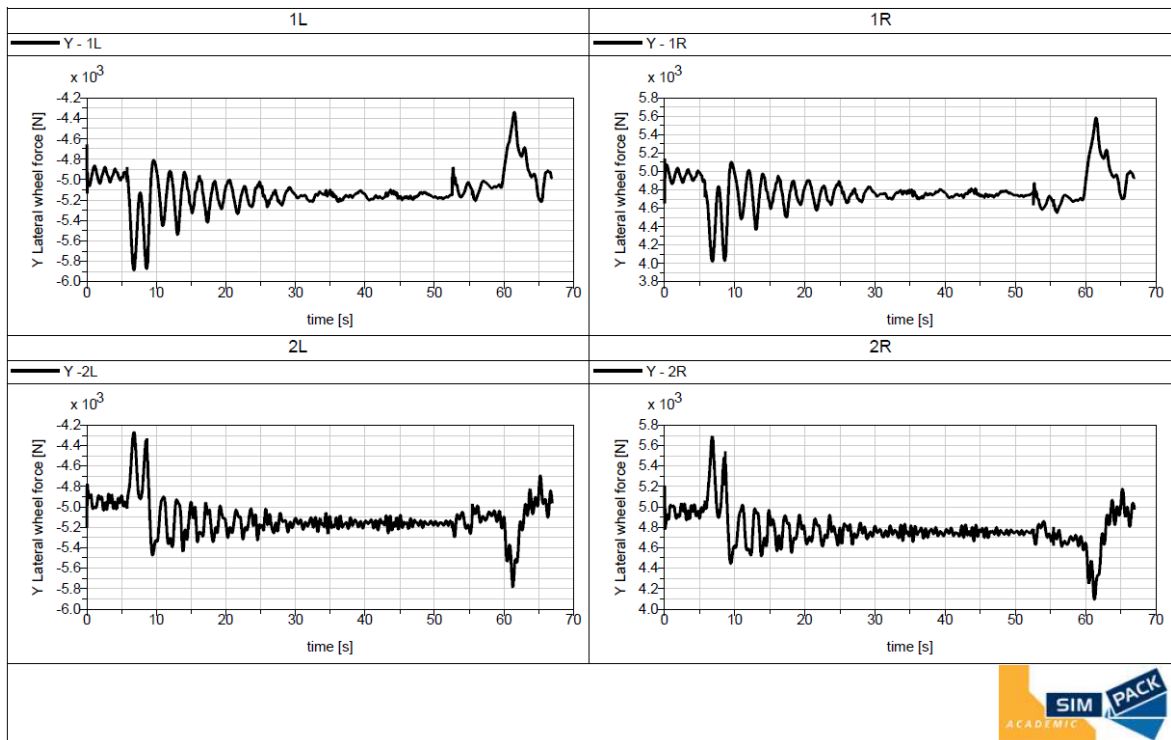
<p><b>Vozidlo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rychlost vozidla 10 km/h</li> </ul>	<p><b>Trať:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Přímá trať 15 m</li> <li>• oblouk 150 m bez přechodnice</li> <li>• Přímá trať 15 m</li> <li>• Kolejnice S49</li> </ul>
---	---

Tabulka 38. Parametry pro simulaci jízdy pro BPV.

Výsledek simulace je uveden na obr. 154 Na obr. 153. je zobrazen zvolený průběh výsuvu servoaktuátoru v závislosti na čase.



Obrázek 149. Výsuv servoaktuátoru. [autor DP]

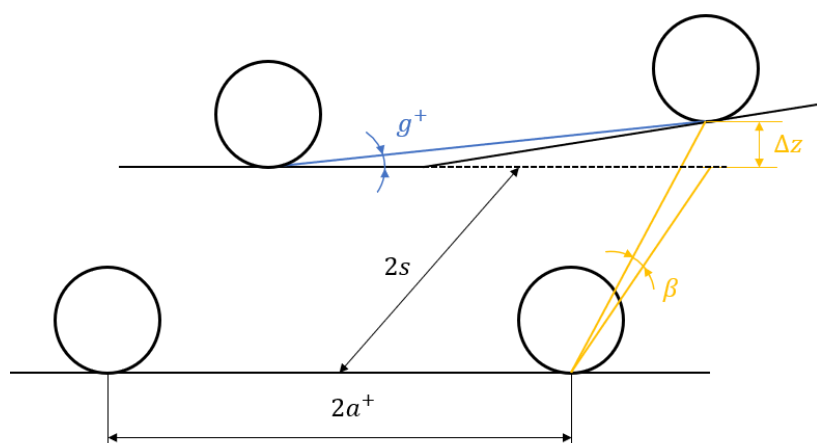


Obrázek 150. Y pro výpočet BPV. [autor DP]

Z grafu je zřejmé, že  $Y_{max} = 5\,300\text{ N}$ , pro „kvazistatickou“ jízdu obloukem. Tedy v časovém úseku cca 15 až 60 s.

## Minimální kolová síla na zborcené koleji

Základní princip výpočtu zkroucení vozidla je zobrazen na obr. 155.



Obrázek 151. Pojezd na zborcené koleji. [autor DP]

Dle normy EN 14363 je pro metodu 2 dáno:

$$g_{lim}^+ = \frac{15}{2a^+} + 2 \quad (87)$$

Z obrázku vyplývá:

$$\Delta z = g^+ \cdot 2a^+ \quad (88)$$

$$\beta = \frac{\Delta z}{2s} \quad (89)$$

rozvor vozidla	$2a^+$	8	m
tuhost prim	$k_1$	9 296 898	N/m
tuhost sekund	$k_2$	750 000	N/m
báze prim. vypružení.	$2w_1$	1	m
báze sek. vypružení	$2w_2$	0,8	m
vzdálenost styčných k.	$2s$	1,5	m

Tabulka 39. Parametry vozidla pro zkroucovací zkoušku.

Pro výpočet jsou předpokladem dokonale tuhé portálové nápravnice tzn., že nedojde ke zkroucení v podvozku.

$$k_{t1} = k_1 \cdot w_1^2 = \frac{9\,296\,898}{4} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 581\,056 \text{ Nm/rad} \quad (90)$$

$$k_{t2} = k_2 \cdot w_2^2 + k_{tstab.} = \frac{750\,000}{4} \cdot \left(\frac{0,8}{2}\right)^2 + 10\,000 = 40\,000 \text{ Nm/rad} \quad (91)$$

$$\frac{1}{k_{tCV}} = \frac{1}{k_{t1}} + \frac{1}{k_{t2}} \rightarrow k_{tCV} = \frac{k_{t1} \cdot k_{t2}}{k_{t1} + k_{t2}} = \frac{581\,056 \cdot 40\,000}{581\,056 + 40\,000} \doteq 37\,400 \text{ Nm/rad} \quad (92)$$

Dále dosazení vztahu (88) do vztahu (89):

$$\beta = \frac{\Delta z}{2s} = \frac{g^+ \cdot 2a^+}{2s \cdot 1000} \quad (93)$$

$$\Delta Q = k_{tCV} \cdot \frac{\beta}{2s} = k_{tCV} \frac{g^+ \cdot 2a^+}{(2s)^2 \cdot 1000} = 37\,424 \cdot \frac{3,875 \cdot 8}{(1,5)^2 \cdot 1000} = 515,6 \text{ N} \quad (94)$$

$$Q_{min} = Q_0 - \Delta Q = 41\,443,4 - 515,6 = 40\,928 \text{ N} \doteq 41 \text{ kN} \quad (95)$$

## Bezpečnosti proti vykolejení

$$\frac{Y}{Q} \leq \left(\frac{Y}{Q}\right)_{lim} = 1,2 \dots \text{ pro úhel sklonu boku okolků } 70^\circ \quad (96)$$

$$\frac{Y}{Q} = \frac{5\,300}{40\,928} = 0,13$$

Na výsledku je zřejmý přínos aktivního stavění kol do radiální polohy. Poměr Y/Q vychází velmi malý. Lze tedy očekávat vysokou bezpečnost při průjezdu vozidla obloukem.

Nutným předpokladem tohoto tvrzení je správná funkce servoaktuátoru a zjišťování úhlu náběhu podvozku. Pakliže tyto parametry nebudou správně zjištěny, aktivní natáčení může představovat pro jízdní vlastnosti vozidla naopak velké nebezpečí.

### 18.3. Popis reálné trati pro simulace v programu SIMPACK.

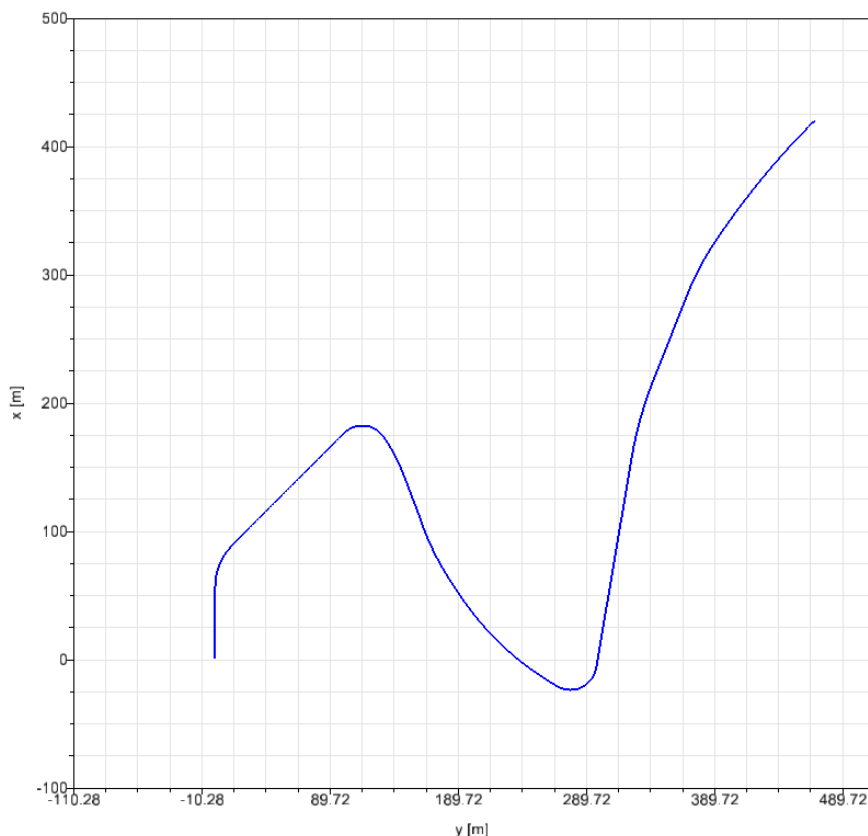
Podklady z rešerše pro potřeby výpočtových simulací byly zpracovány následovně:

Byl vybrán referenční úsek typický pro centrum města (oblouk malého poloměru, oblouky velkého poloměru, oblouky malého poloměru v kolejových konstrukcích, přímá kolej. Pro tyto účely vyhovuje úsek trati: Vodíčková – Národní divadlo. Dále byl tento referenční úsek zpracován do popisu trati ve formě, jakou vyžadují simulace v programu SIMPACK viz obr.153.

Vlastní výpočtové simulace jízdy vozidla po referenční trati nebyly předmětem DP.

Traťový úsek: Vodíčková – Národní divadlo v MBS programu Simpack.

- Svislá a vodorovná osa: poloha tratě [m]



Obrázek 153. Referenční úsek v programu SIMPACK.[autor DP]

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit studii proveditelnosti autonomního tramvajového vozidla s jednonápravovými podvozky. Studie je poměrně rozsáhlá, a tak z časových a rozsahových důvodů nepopisuje rovnocenně všechny konstrukční sestavy. Důraz je kladen především na základní koncepci vozidla, provedení pojezdu, napájení vozidla a vybrané základní výpočty související s jízdními vlastnostmi vozidla.

Práce je rozdělená do tří částí: Rešerše, Teoretická část a Praktická část. Všechny tyto kapitoly jsou vzájemně propojeny.

### **Rešerše**

Rešerše popisuje vozidla, která jsou svým pojezdem, či konceptem inspirací pro Segmentovou tramvaj. Nejprve popisuje historická vozidla se zaměřením především na pojezd. Následují vozidla, jež jsou dle výrobců blízko realizaci. Dále jsou pak představeny autonomně řízené článkové tramvaje běžné stavby. V závěru této části rešerše zobrazuje designerské koncepty autonomních vozidel rozměry shodnými se Segmentovou tramvají, které vymezují prostorové uspořádání vozidla.

V průběhu řešení se ukázalo potřebným rešerši oproti zadání rozšířit o část popisující alternativní napájecí systémy v městské tramvajové infrastruktuře. Podstatou této kapitoly je vytvořit přehled o užívaných systémech, které by mohly být použity pro Segmentovou tramvaj.

Poslední kapitola 4. popisuje infrastrukturu tramvajové sítě na zemi hl. m. Prahy se zaměřením na vztah dvojkolí-kolej. Trať je 142,7 m dlouhá. V síti se objevují oblouky s velmi malým poloměrem oblouku z nichž nejmenší je 19,976 m. Z pohledů sklonových poměrů je trať velmi rozmanitá maximální sklon je 75 ‰. Největší zastoupení v síti má kolejnice typu NT1. Trať je koncipovaná pro maximální rychlost až 60 km/h. Jmenovitá hodnota rozchodu koleje je 1435 mm. Napájecí napětí je 600 V. Na základě této rešerše byla vytvořena trať, na které byly testovány požadavky na dimenzování kapacity baterie pohonu. V kapitole 4.2 je uvedeno zastoupení poloměrů oblouků pro konkrétní zvolený úsek. Z této části rešerše byla vytvořena referenční trať v MBS programu SIMPACK, učená pro jízdní simulace vozidla.

Na základě poznatků o konstrukčním řešení pojezdů vozidel z Rešerše, jsem navrhnul základní koncepci vozidla.

### **Teoretická část**

Je zaměřená především na popis režimu a systému, ve kterém bude tramvaj provozována.

Segmentová tramvaj je navržena tak, aby vyhovovala požadavkům na provoz v režimu dynamické dopravy.

Tramvaj bude vybavená pokročilým systémem řízení, který bude využívat prostředků umělé inteligence. Bude se jednat o plně autonomní vozidlo.

Tramvaj bude vybavená virtuálním spřáhlem. Pro schopnost provozování v režimu segmentové tramvaje, je tato technologie základní podmínkou.

Segmentová tramvaj bude mít přímý pohon kol. Pro pohon uvažují synchronní motor s permanentními magnety s vnitřním rotorem.

Z dostupných nebo možných řešení podsestav vozidla např. dveře, sedadla, informační panely, jsou vybrány prvky vhodné pro segmentovou tramvaj.

## **Praktická část**

Hlavními částmi praktické části jsou: provedení pojezdu, napájení a vybrané základní výpočty související s jízdními vlastnostmi vozidla.

Výsledkem studie proveditelnosti je návrh vozidla, které je „dvounápravové“, obousměrné. Pro které je základním zdrojem energie je elektrický akumulátor dobíjený v provozních přestávkách. Vozidlo tedy není vybavené sběračem.

Vozidlo je navrženo tak, aby bylo schopné projíždět oblouky v Pražské tramvajové síti, za minimálních podmínek jako referenční vozidlo „dvou nápravová historická tramvaj“.

V kapitole 11.1 jsou navrženy dvě varianty uspořádání prostoru pro cestující.

Provedená bilance hmotnosti v kapitole 12. naznačuje že je reálné s vozidlem dané koncepce splnit požadavky tramvajové sítě. Tj. zatížení na dvojkolí méně než 10 t. Pro uspořádání s největší přepravní kapacitou vyšlo zatížení na nápravu 9,7 t.

Základní principy uspořádání hrubé stavby vozidla lze převzít ze stávajících vozidel společnosti ŠT např. prostředního článku tramvaje ŠKODA 15 T.

Navazující kapitola 13.2 popisuje rozmístění Elektrická výzbroj, která bude navržena tak, aby nezmenšovala prostor pro cestující. Perspektivní typy baterií a měničů dovolují zabudovat tyto prvky do spodku vozidla. Čímž mj. dochází ke snížení polohy těžiště tramvaje.

Pojezd vozidla je tvořen dvěma „jednonápravovými“ podvozky. Primární vypružení je realizováno pryžovými prvky. Sekundární vypružení je vzduchové. Podvozek je vybaven aktivním natáčením za účelem nastavení dvojkolí do radiální polohy při jízdě obloukem. Natáčení zajišťují elektromechanické servoaktuátory řízeny řídicím počítačem na základě signálů ze senzorů polohy a dalších informací (mapa trati, lokalizace polohy vozidla atd.) Pro spolehlivé řízení bude nutno využívat údaje z různých typů senzorů v úvahu přicházejí senzory ultrazvukové a optické. Základní ověření možnosti řízení radiální polohy pojezdu na základě virtuální mapy trati je demonstrováno simulací jízdy vozidla obloukem v programu SIMPACK.

Jedná se o vozidlo elektrické nezávislé trakce. Zdrojem energie je elektrický akumulátor. Trakčních baterií jsou navrženy pro reálné úseky tratí v Praze. Úvaha o pohonu je dokumentována návrhem trakčních charakteristik, brzdové charakteristiky EDB a výpočtem tachogramů. Vypočtené tachogramy jsou porovnány s naměřenými hodnotami rychlostí v závislosti na čase v reálném provozu. Na základě výsledků výpočtů byl zvolen režim, kdy se vozidlo nabije v cílové stanici a celý traťový úsek – z cílové stanice na konečnou stanici projede bez nabíjení. Pro provoz vozidla v tomto režimu jsou zapotřebí baterie o hmotnosti: 0,87 t a objemu cca 400 l (včetně bateriové skříňe a komponent).

Byl vytvořen MBS model vozidla v programu Simpack. Součástí modelu vozidla je aktivní natáčení podvozků, realizované prostřednictvím algoritmu, jenž řídí pohyb servoaktuátoru v závislosti na rychlosti jízdy a poloměru projížděného oblouku. Simulacemi s aktivním natáčením podvozku bylo zjištěno, že vlivem řízení radiální polohy vznikají v kontaktu kolo-kolejnice podstatně menší vodící síly. Což má pozitivní vliv na opotřebování kol i kolejnic, hluk, vibrace atd. Přínosem je rovněž vyšší míra bezpečnost proti vykolejení ve srovnání s konvenčními vozidly.



## **Porovnání Segmentové tramvaje s tramvají ŠKODA 15T**

Srovnání je provedeno pro soupravu tramvají, která maximálně možné využívá délku nástupiště o délce 65 m. Segmentovou tramvaj uvažuji v uspořádání interiéru varianty 2. V tomto srovnání již uvažuji hmotnost baterií 0,87 t. Vzdálenost mezi segmenty uvažuji 1 m. Délka spřáhla tramvaje 15 T je cca 1 m.

		cestující			vozidlo		délka
		sezení	stání	celkem	PV [t]	PO [t]	[m]
15T	1x	61	119	180	42	55,5	31,4
	2x	122	238	360	84	111	64,8
SAT	1x	28	40	68	10	15,1	11
	2x	56	80	136	20	30,2	23
	3x	84	120	204	30	45,3	35
	4x	112	160	272	40	60,4	47
	5x	140	200	340	50	75,5	59

		výkon		
		počet motorů	celkový výkon [kW]	měrný t. výkon [kW/t]
15T	1x	16	720	12,97
	2x	32	1440	12,97
SAT	1x	4	180	11,92
	2x	8	360	11,92
	3x	12	540	11,92
	4x	16	720	11,92
	5x	20	900	11,92

*Tabulka 40. Srovnání Segmentové tramvaje s tramvají 15 T ŠKODA.*

Z tohoto srovnání lze vyvodit několik důsledků. Segmentová tramvaj nevyužívá efektivně celou délku nástupiště, proto pro takto zvolené soupravy mají dvě spřažené tramvaje 15 T větší přepravní kapacitu než pět Segmentových tramvají (o 20 cestujících). Je tedy diskutabilní, zda není vhodné pro další rozvoje konceptu Segmentové tramvaje zvolit rozměry – především délku tak, aby efektivněji využívala délku nástupiště. Souprava Segmentových tramvají je výrazně lehčí. Tramvaj 15 T má větší měrný trakční výkon.

### **Finální zhodnocení**

**Předložená studie proveditelnosti ukazuje, že autonomní tramvaj zadané koncepce je technicky realizovatelná. Její eventuelní realizace bude však vyžadovat vyřešení mnoha náročných otevřených otázek.**



*vizualizace Segmentové autonomní tramvaje [autor DP]*

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1. Ringhofferova tramvaj. [1]  
Obrázek 2. Kolejnicová brzda. [2]  
Obrázek 3. Tlapově uložený motor. [2]  
Obrázek 4. Popis rámu R. tramvaje. [2]  
Obrázek 5. Pohled na vypružení a pruž. uchycení motoru. [2]  
Obrázek 6. Tramvaj T2000 v Bruselu. [3]  
Obrázek 7. Podvozek BXL 2000. [4]  
Obrázek 8. Základní rozměry tramvaje T2000. [4]  
Obrázek 9. Tramvaj SWIMO. [5]  
Obrázek 10. Boční pohled na tramvaj SWIMO. [5]  
Obrázek 11. Podvozky tramvaje SWIMO. [5]  
Obrázek 12. Podvozek ULF. [7]  
Obrázek 13. Tramvaj „ULF“. [6]  
Obrázek 14. Boční pohled na tramvaj "ULF". [6]  
Obrázek 15. Pojezdu tramvaje v oblouku. [8]  
Obrázek 16. Pojezd tramvaje L. [8]  
Obrázek 17. Typový výkres tramvaje L. [9]  
Obrázek 18. Tramvaj Cobra. [1]  
Obrázek 19. Natáčení podvozku tramvaje Cobra. [7]  
Obrázek 20. Typový výkres tramvaje Cobra. [10]  
Obrázek 21. Brémská tramvaj. [11]  
Obrázek 22. Podvozek Brémské tramvaje. [7]  
Obrázek 23. 1n podvozek Duewag. [12]  
Obrázek 24. 1n podvozek Breda. [12]  
Obrázek 25. ARS pro přepravu cestujících. [13]  
Obrázek 26. ARS pro přepravu kontejnerů. [13]  
Obrázek 27. ARS bez modulárního řešení. [13]  
Obrázek 28. VLR. [14]  
Obrázek 29. Základní popis vozidla VLR. [14]  
Obrázek 30. Autonomní tramvaj URBI. [15]  
Obrázek 31. vizualizace URBI. [15]  
Obrázek 32. Autonomní tramvaje - Szymona Skiba [16]  
Obrázek 33. Autonomní tramvaj - Tomáš Bláha [17]  
Obrázek 34. Tramvaj 1 z projektu DESIGN+ [18]  
Obrázek 35. Tramvaj 2 z projektu DESIGN+ [18]  
Obrázek 36. Elektrobus Aptis. [19]  
Obrázek 37. Čelní pohled na vozidlo Aptis. [19]  
Obrázek 38. Interiér vozidla nad podvozky. [19]  
Obrázek 39. Tramvaj vybavená senzory pro autonomní řízení v reálném provozu. [20]  
Obrázek 40. Proces vyhodnocení dat ze senzorů. [20]  
Obrázek 41. Tramvaj vybavená senzory pro autonomní řízení v reálném provozu. [21]  
Obrázek 42. Vizualizace vyhodnocování dat. [21]  
Obrázek 43. Tramvaj společnosti vybavená senzory pro autonomní řízení v reálném provozu. [22]  
Obrázek 44. Kabina řidiče vybavená lidarem a kamerami. [22]  
Obrázek 45. Řez napájecím pruhem. [23]  
Obrázek 46. Schéma využití napájení ze třetí koleje. [23]  
Obrázek 47. PRIMOVE. [24]  
Obrázek 48. Infrastruktura pro napájení na zastávce. [25]  
Obrázek 49. Detail napájení baterií. [25]  
Obrázek 50. Vizualizace napájení baterií během stání tramvaje v zastávce. [25]

Obrázek 51. Mapa zobrazující poskytnuté výkresy tramvajové sítě hl. m. Prahy [26]  
Obrázek 52. Detail mapy. Vodíčková-Újezd. [26]  
Obrázek 53. Detail mapy Újezd-Bertramka. [26]  
Obrázek 54. Výškový profil tratě [27]  
Obrázek 55. Pohled na dynamicky řízenou dopravu v Praze. [28]  
Obrázek 56. Virtuální mapy dopravy pro modelování dynamické dopravy v Praze.[28]  
Obrázek 57. pooling [28]  
Obrázek 58. Výsledky výpočtů - vlastním autem a MoD. [28]  
Obrázek 59. Vozidlo Olli.[29]  
Obrázek 60. Vozidlo Olli v provozu. [29]  
Obrázek 61. Dynamická doprava v MHD. [30]  
Obrázek 62. Souprava pěti segmentových tramvají. [27], [autor DP]  
Obrázek 63. Rozdělená souprava segmentových tramvají. [27], [autor DP]  
Obrázek 64. Vizualizace depa metra D. [31]  
Obrázek 65. Schéma postupů při realizaci projektu. [autor DP]  
Obrázek 66. Rozmístění senzoru na čele tramvaje. [autor DP]  
Obrázek 67. Neodpružený pohon s kolovým motorem.[7]  
Obrázek 68. Řez motorem použitým v tramvaji 15T [7]  
Obrázek 69. Vizualizace variabilního interiéru pro budoucnost.[32]  
Obrázek 70. Vnější informační plochy vozidla URBI. [15]  
Obrázek 71. Vnější airbag vozidla URBI. [15]  
Obrázek 72. Designerský návrh řešení přechodového prostoru vozidla URBI. [15]  
Obrázek 73. Spřažené tramvaje Urbos 3 společnosti CAF při testování virtuálního spřáhla. [32]  
Obrázek 74. Úhel náběhu-natočení podvozku. [33], [autor DP]  
Obrázek 75. Obálková metoda pohybu podvozků. [autor DP]  
Obrázek 76. Pohled na zástavbový prostor pro podvozek z boku. [autor DP]  
Obrázek 77. Obrys pro vozidlo v přímé trati. [34]  
Obrázek 78. Obrys pro vozidla v oblouku koleje. [34]  
Obrázek 79. Obrys vozidla. [autor DP]  
Obrázek 80. Typový výkres uspořádání vozidla s delším středním oknem. [autor DP]  
Obrázek 81. Typový výkres uspořádání vozidla s kratším středním oknem. [autor DP]  
Obrázek 82. Souprava pěti segmentů. [autor DP]  
Obrázek 83. Uspořádání vozidla - varianta 1. [autor DP]  
Obrázek 84. Půdorys uspořádání - varianta 1. [autor DP]  
Obrázek 85. Uspořádání vozidla - varianta 2. [autor DP]  
Obrázek 86. Půdorys uspořádání - varianta 2. [autor DP]  
Obrázek 87. Půdorys uspořádání - varianta 3. [autor DP]  
Obrázek 88. Půdorys uspořádání - varianta 4. [autor DP]  
Obrázek 89. Půdorys uspořádání - varianta 5. [autor DP]  
Obrázek 90. Uspořádání vozidla - varianta 6. [autor DP]  
Obrázek 91. Půdorys uspořádání - varianta 6. [autor DP]  
Obrázek 92. Uspořádání vozidla - varianta 2. [autor DP]  
Obrázek 93. Půdorys uspořádání - varianta 7. [autor DP]  
Obrázek 94. Zjednodušené schéma zatížení segmentové tramvaje. [autor DP]  
Obrázek 95. Ramena na nichž působí síly. [autor DP]  
Obrázek 96. Návrh hrubé stavby Segmentové tramvaje. [autor DP]  
Obrázek 97. Elektrická výzbroj Segmentové tramvaje. [autor DP]  
Obrázek 98. Pracovní charakteristika motoru tramvaj 15T.[30]  
Obrázek 99. Uložení baterií. [autor DP]  
Obrázek 100. Výměna baterií. [autor DP]  
Obrázek 101. Podvozek Segmentové tramvaje. [autor DP]  
Obrázek 102. Schéma pojezdu Segmentové tramvaje. [autor DP]  
Obrázek 103. Přenos příčných a podélných sil v podvozku. [autor DP]  
Obrázek 104. Podvozek Segmentové tramvaje s aktivním natáčením. [autor DP]  
Obrázek 105. Přední podvozek v oblouku. [autor DP]

Obrázek 106. Podvozky v oblouku. [autor DP]  
Obrázek 107. Základní schéma řízení.[autor DP]  
Obrázek 108. Aktivní natáčení. [autor DP]  
Obrázek 109. Síly působící v podvozku. [autor DP]  
Obrázek 110. Uložení servoaktuátoru. [autor DP]  
Obrázek 111. Dva servoaktuátory. [autor DP]  
Obrázek 112. Přední podvozek v přímé trati. [autor DP]  
Obrázek 113. Přední podvozek natočený při průjezdu levým obloukem. [autor DP]  
Obrázek 114. Přední podvozek natočený při průjezdu pravým obloukem. [autor DP]  
Obrázek 115. Výpočetní model pro návrh reakční tyče. [autor DP]  
Obrázek 116. Vertikální oblouk. [autor DP]  
Obrázek 117 Mechanická brzda. [autor DP]  
Obrázek 118 Podvozek tramvaje ULF. [7]  
Obrázek 119. Druhá varianta aktivního natáčení podvozků. [autor DP]  
Obrázek 120. Detailní pohled na uspořádání pojezdu. [autor DP]  
Obrázek 121. Podvozky s bateriemi. [autor DP]  
Obrázek 122. Pryžový prvek. [autor DP]  
Obrázek 123. Princip funkce vzduchového vypružení. [autor DP]  
Obrázek 124. Schéma zapojení vzduchového pružícího systému. [autor DP]  
Obrázek 125. Mech. senzor. [autor DP]  
Obrázek 126. Optický senzor. [autor DP]  
Obrázek 127. Ultrazvukový senzor. [autor DP]  
Obrázek 128. Výškový profil tratě 1.[25]  
Obrázek 129. Mapa tratě 1.[31]  
Obrázek 130. Výškový profil tratě 2.[27]  
Obrázek 131. Mapa zvolené tratě. [26]  
Obrázek 132. Trakční charakteristika prázdného vozidla. [autor DP]  
Obrázek 133 brzdová charakteristika EDB. [autor DP]  
Obrázek 134. Trasa zkoumaného jízdního cyklu. [27],[autor DP]  
Obrázek 135. Tachogram v závislosti na dráze. [autor DP]  
Obrázek 136. Tachogram v závislosti na čase. [autor DP]  
Obrázek 137. Výpočetní model Segmentové tramvaje. [autor DP]  
Obrázek 138. Popis silových prvků ve výpočetním modelu podvozku. [autor DP]  
Obrázek 139. Popis vazeb ve výpočetním modelu podvozku. [autor DP]  
Obrázek 140. Úhel náklonu skříňe vozidla. [autor DP]  
Obrázek 141. Geometrie výsuvu servoaktuátoru. [autor DP]  
Obrázek 142. Porovnání skokového a lineárního výsuvu aktuátoru v závislosti na čase. [autor DP]  
Obrázek 143. Porovnání vlivů výsuvů servoaktuátorů na průběh vodících sil. [autor DP]  
Obrázek 144. Porovnání profilů kol.  
Obrázek 145. Ringhoferova tramvaj. [autor DP]  
Obrázek 146. Segmentová tramvaj. [autor DP]  
Obrázek 147. Porovnání úhlu náběhu. Ring. a Seg. tramvaj. [autor DP]  
Obrázek 148. Průběh vodících sil v závislosti na čase pro R=20 m. [autor DP]  
Obrázek 149. Výsuv servoaktuátoru. [autor DP]  
Obrázek 150. Y pro výpočet BPV. [autor DP]  
Obrázek 151. Pojezd na zborcené koleji. [autor DP]  
Obrázek 152. Mapa referenčního úseku.  
Obrázek 153. Referenční úsek v programu SIMAPCK.[autor DP]

## SEZNAM TABULEK

- Tabulka 1. Technické parametry R. tramvaje. [1], [2]
- Tabulka 2. Technické parametry tramvaje T2000. [3]
- Tabulka 3. Technické parametry tramvaje SWIMO. [4]
- Tabulka 4. Technické parametry tramvaje ULF [5], [6]
- Tabulka 5. Technické parametry tramvaje Lendreichachser. [7]
- Tabulka 6. Technické parametry tramvaje Cobra. [9]
- Tabulka 7. Technické parametry tramvaje. [10]
- Tabulka 8. Technické parametry vozidla. [12]
- Tabulka 9. Základní technické parametry vozidla. [13]
- Tabulka 10. Základní parametry tramvajové tratě v Praze.
- Tabulka 11. Zastoupení typů kolejnic v Praze.
- Tabulka 12. Četnosti oblouků na vybraném úseku
- Tabulka 13. Procentuální zastoupení intervalů ve vybrané trati
- Tabulka 14. Přehled základních senzorů. [24]
- Tabulka 15. Shrnutí požadavků a nových příležitostí autonomních vozidel. [24]
- Tabulka 16. Parametry SAT.
- Tabulka 17. Výsledky výpočtů dle ČSN 280337.
- Tabulka 18. Porovnání dalších rozměrových uspořádání.
- Tabulka 19. Parametry uspořádání - varianta 1
- Tabulka 20. Parametry uspořádání - varianta 2.
- Tabulka 21. Parametry uspořádání - varianta 3
- Tabulka 22. Parametry uspořádání - varianta 4.
- Tabulka 23. Parametry uspořádání - varianta 5.
- Tabulka 24. Parametry uspořádání - varianta 6.
- Tabulka 25. Parametry uspořádání - varianta 7.
- Tabulka 26. Hmotnostní bilance vozidla.
- Tabulka 27. Parametry motoru tramvaje 15 T. [29]
- Tabulka 28. Hmotnosti pro 2m soustavu.
- Tabulka 29. Parametry tratě 1.
- Tabulka 30. Parametry tratě 2.
- Tabulka 31. Dráhy a rychlosti.
- Tabulka 32. Přehled parametrů varianty 2.
- Tabulka 33. Přehled parametrů doporučených technologií článků.
- Tabulka 34. Parametry baterie pro variantu 1.
- Tabulka 35. Parametry výpočetního modelu.
- Tabulka 36. Parametry pro jízdu vozidla v malém oblouku.
- Tabulka 37. Parametry pro simulaci jízdy pro BPV.
- Tabulka 38. Parametry vozidla pro zkrucovací zkoušku.
- Tabulka 39. Srovnání Segmentové tramvaje s tramvají 15 T ŠKODA.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Historická tramvaj RINGHOFFER - PDF. Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 29.10.2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2340465-Historicka-tramvaj-ringhoffer.html>
- [2] O tramvaji č.223 | Dopravní podnik města Olomouce, a.s.. Dopravní podnik města Olomouce, a.s. [online]. Copyright © 2016 Dopravní podnik města Olomouce, a.s. [cit. 29.10.2019]. Dostupné z: <https://www.dpmo.cz/dpmo/historie/historicka-vozidla/o-tramvaji-c-223/>
- [3] Technische Daten: Bombardier BN / GEC-Alsthom - T2000. Strassenbahn-Online - Home [online]. Copyright © 2011 Chris [cit. 30.06.2020]. Dostupné z: [http://www.strassenbahn-online.de/Betriebshof/LF100/T2000\\_Brussel/Technische\\_Daten.html](http://www.strassenbahn-online.de/Betriebshof/LF100/T2000_Brussel/Technische_Daten.html)
- [4] Low Floor, Battery-Powered Tram SWIMO Completed | Kawasaki Heavy Industries, Ltd.. Kawasaki Heavy Industries, Ltd. [online]. Copyright © 2018 Kawasaki Heavy Industries, Ltd. All rights reserved. [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: [http://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/ba\\_c3071119-1.html](http://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/ba_c3071119-1.html)
- [5] Ultra Low Floor tram - Mobility - Siemens. *Siemens AG*. [Online] 1996 - 2018. [Citace: 27. října 2019.]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:bab137c522d71edd55d4aafaf7e50f07656ba37a/version:1493112672/ulf-brochure-en.pdf>
- [6] doc. Ing. Kolář, Josef. Podklady pro předmět Pohony kolejových vozidel. Studium - podklady pro studium na Fakultě strojní. [Online] [cit. 15.02.2020] [https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211073-Pohony\\_kolejovych\\_vozidel/Pohony%20kolejov%C3%BDch%20vozidel%20-%202011.pdf](https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211073-Pohony_kolejovych_vozidel/Pohony%20kolejov%C3%BDch%20vozidel%20-%202011.pdf)
- [7] Lenkdreiechser – Wikipedia. [online]. [cit. 15.05.2020]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lenkdreiechser>
- [8] Beiwagen Typ m 5.65 [online]. [cit. 15.05.2020] Dostupné z: <http://www.tram.org/fmtm/museum/m5.65.html>
- [9] Cobra - Stadt Zürich. 302 Found [online]. Copyright © 2020 Stadt Z [cit. 25.04.2020]. Dostupné z: [https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die\\_vbz/fahrzeuge/trams/cobra.html](https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/fahrzeuge/trams/cobra.html)
- [10] Freunde der Bremer Straßenbahn e.V.. Freunde der Bremer Straßenbahn e.V. [online]. [cit. 25.04.2020]. Dostupné z: <https://www.fdb.net/>
- [11] Applicability of Low-floor Light Rail Vehicles in North America - Michael I. Darter, Booz, Allen & Hamilton, Kathleen T. Hall, Chen-Ming Kuo - Knihy Google. Knihy Google [online]. [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=aJnm7jjYd9sC&pg=PA34&lpg=PA34&dq=breda+Irv+duewag&source=bl&ots=tQKkaDfBXx&sig=ACfU3U1aHYZcUCP6OLU0VGHS-UCigU-T2Q&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjAmZf8p9PnAhWIO8AKHeVBB5EQ6AEwAXoECAkQAQ#v=onepage&q&f=false>
- [12] Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler, Časopis ZEV Rail č. 9/2019 článek: „RWTH Aachen entwickelt fahrerlosen Schienenbus
- [13] Department for Transport to give keynote address at WMG's Very Light Rail Conference. Welcome to the University of Warwick [online]. Copyright © MMXX [cit. 18.06.2020]. Dostupné z: [https://warwick.ac.uk/newsandevents/pressreleases/department\\_for\\_transport/](https://warwick.ac.uk/newsandevents/pressreleases/department_for_transport/)
- [14] Carbon-fibre composite frame braided for very light rail | IOM3. IOM3 - The Institute of Materials, Minerals & Mining [online]. [cit. 18.06.2020]. Dostupné z: <https://www.iom3.org/materials-world-magazine/news/2019/jul/01/carbonfibre-composite-frame-braided-very-light-rail>

- [15] Tomáš Chludil. Tomáš Chludil [online]. Copyright © Tomáš Chludil 2019 [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <http://tomaschludil.com/urbi.html>
- [16] Alstom Aptis. About Alstom [online]. Copyright © Alstom 2020 [cit. 30.06.2020]. Dostupné z: <https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/aptis-so-much-more-12-metre-bus>
- [17] Copyright © [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/BT-%2020150721%20-%20Data%20sheet%20Driver%20Assistance%20System%20EN.pdf>
- [18] Autonomous tram | Trams and light rail | Siemens Mobility Global. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © Siemens Mobility 2020 [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/rolling-stock/trams-and-light-rail/autonomous-tram.html>
- [19] Russia's first autonomous tram will be launched in Moscow. Intelligent Transport [online]. Copyright © [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.intelligenttransport.com/transport-news/75915/autonomous-tram-development-russia/>
- [20] APS – Ground-level power supply. Alstom [online]. 2015 [cit. 28.04.2020]. Dostupné z : <http://www.alstom.com/products-services/productcatalogue/rail-systems/Infrastructures/products/aps-ground-level-powersupply/>
- [21] Bombardier's PRIMOVE Technology Enters Service on Scandinavia's First Inductively Charged Bus Line - Bombardier . 301 Moved Permanently [online]. Copyright © Bombardier 1997 [cit. 28.04.2020]. Dostupné z: <https://www.bombardier.com/en/media/newsList/details.bt-20161207-bombardier-primove-technology-enters-service-on-scan.bombardiercom.html>
- [22] Cap, Michal, and Javier Alonso-Mora. "Multi-Objective Analysis of Ridesharing in Automated Mobility-on-Demand." In Robotics:Science and Systems XIV. Robotics: Science and Systems Foundation, 2018. <https://doi.org/10.15607/RSS.2018.XIV.039>.
- [23] Trasa metra D - YouTube. YouTube [online]. [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=wbegBXzZTmQ>
- [24] TPSD | Technologická platforma silniční doprava - TPSD [online]. Copyright ©q [cit. 25.02.2020]. Dostupné z: <https://www.tpsd-ertrac.cz/file/oblast-autonomni-vozidla/>
- [25] ČVUT DSpace [online]. Copyright © [cit. 02.07.2020]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80847/F2-BP-2018-Hetfleisch-Lukas-BP\\_Hetfleisch.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80847/F2-BP-2018-Hetfleisch-Lukas-BP_Hetfleisch.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)
- [26] MAŘÍK, Jan. \textit{Designová studie tramvajového vozu} [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <<https://theses.cz/id/vmuh7h/>>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc..
- [27] InnoTrans - Home. InnoTrans - Home [online]. Copyright © 2020 Messe Berlin [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.innotrans.com/>
- [28] Synchronised Dance of Virtually Connected Trams - Shift2Rail. Home - Shift2Rail [online]. Copyright © shift2rail.org [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://shift2rail.org/innotrans/synchronised-dance-of-virtually-connected-trams/>
- [29] ČVUT DSpace [online]. Copyright © [cit. 02.07.2020]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80532/F2-DP-2018-Hromadka-Tomas-Diplomova%20prace%20Tomas%20Hromadka.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [30] Konzultace Ing. Jiří Vokoun - ŠKODA TRANSPORTATION, 15.2.2020



[31] Konzultace, Prof. Ing. Jaroslav Novák CSc ČVUT, 27.5.2020.

[32] TOSA flash-charging e-bus, Geneva, Switzerland - References Selector | ABB. ABB Group - Leading digital technologies for industry [online]. Copyright © Copyright 2020 ABB [cit. 02.06.2020]. Dostupné z: <https://new.abb.com/substations/references-selector/tosa-flash-charging-e-bus-geneva-switzerland>

[33] NOVÁK, J. – SADÍLEK, O. – SÝKORA, P.: Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu, část 1. Časopis ELEKTRO 2016, roč. 26, č. 11, vydavatel FCC Public, Praha 2016, ISSN 1210-0889

## ZDROJE POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

[1] Historická linka č. 41 | Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová společnost. Cestující | Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová společnost [online]. Copyright © 2020 Dopravní podnik hlavního města Prahy, a.s. [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.dpp.cz/zabava-a-zazitky/historie-dpp/historicka-linka-c-41>

[2] Historická tramvaj RINGHOFFER - PDF. Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 29.10.2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2340465-Historicka-tramvaj-ringhoffer.html>

[3] File:Bxl - Tram 2000 (2029) à Musée du Tram - Ligne 94.JPG - Wikimedia Commons. [online]. [cit. 29.11.2019]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bxl\\_-\\_Tram\\_2000\\_\(2029\)\\_%C3%A0\\_Mus%C3%A9\\_du\\_Tram\\_-\\_Ligne\\_94.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bxl_-_Tram_2000_(2029)_%C3%A0_Mus%C3%A9_du_Tram_-_Ligne_94.JPG)

[4] Using three-dimensional finite element analysis in time domain to model railway-induced ground vibrations - ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997814000167>

[5] Low Floor, Battery-Powered Tram SWIMO Completed | Kawasaki Heavy Industries, Ltd.. Kawasaki Heavy Industries, Ltd. [online]. Copyright © 2018 Kawasaki Heavy Industries, Ltd. All rights reserved. [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: [http://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/ba\\_c3071119-1.html](http://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/ba_c3071119-1.html)

[6] Ultra Low Floor tram - Mobility - Siemens. *Siemens AG*. [Online] Copyright © [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:bab137c522d71edd55d4aafaf7e50f07656ba37a/version:1493112672/ulf-brochure-en.pdf>

[7] doc. Ing. Kolář, Josef. Podklady pro předmět Pohony kolejových vozidel. Studium - podklady pro studium na Fakultě strojní. [Online] [cit. 15.02.2020] [https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211073-Pohony\\_kolejovych\\_vozidel/Pohony%20kolejov%C3%BDch%20vozidel%20-%202011.pdf](https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211073-Pohony_kolejovych_vozidel/Pohony%20kolejov%C3%BDch%20vozidel%20-%202011.pdf)

[7] doc. Ing. Kolář, Josef. Podklady pro předmět Pohony kolejových vozidel. Studium - podklady pro studium na Fakultě strojní. [Online] [cit. 15.02.2020] [https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211073-Pohony\\_kolejovych\\_vozidel/Pohony%20kolejov%C3%BDch%20vozidel%20-%202011.pdf](https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211073-Pohony_kolejovych_vozidel/Pohony%20kolejov%C3%BDch%20vozidel%20-%202011.pdf)

[8] Lenkdreiaxser – Wikipedia. [online]. [cit. 15.05.2020]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lenkdreiaxser>

[9] Beiwagen Typ m 5.65 [online]. [cit. 15.05.2020] Dostupné z: <http://www.tram.org/fmtm/museum/m5.65.html>

[10] Cobra - Stadt Zürich. 302 Found [online]. Copyright © 2020 Stadt Z [cit. 30.06.2020]. Dostupné z: [https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die\\_vbz/fahrzeuge/trams/cobra.html](https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/fahrzeuge/trams/cobra.html)

[11] Freunde der Bremer Straßenbahn e.V.. Freunde der Bremer Straßenbahn e.V. [online]. [cit. 25.04.2020]. Dostupné z: <https://www.fdbns.net/>

[12] Applicability of Low-floor Light Rail Vehicles in North America - Michael I. Darter, Booz, Allen & Hamilton, Kathleen T. Hall, Chen-Ming Kuo - Knihy Google. Knihy Google [online]. [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=aJnm7jjYd9sC&pg=PA34&lpg=PA34&dq=breda+Irv+duewag&source=bl&ots=tQKkaDfBXx&sig=ACfU3U1aHYZcUCP6OLU0VGHs-UCigU-T2Q&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjAmZf8p9PnAhWIO8AKHeVBB5EQ6AEwAXoECAkQAQ#v=onepage&q&f=false>

[13] Časopis ZEV Rail č. 9/2019 článek: „RWTH Aachen entwickelt fahrerlosen Schienenbus Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler“

[14] Department for Transport to give keynote address at WMG's Very Light Rail Conference. Welcome to the University of Warwick [online]. Copyright © MMXX [cit. 18.06.2020]. Dostupné z: [https://warwick.ac.uk/newsandevents/pressreleases/department\\_for\\_transport/](https://warwick.ac.uk/newsandevents/pressreleases/department_for_transport/)

[15] Tomáš Chludil. Tomáš Chludil [online]. Copyright © Tomáš Chludil 2019 [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <http://tomaschludil.com/urbi.html>

[16] Autonomous Modular Tram Concept - YouTube. YouTube [online]. [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=nabe-69LknQ>

[17] BLAHA, T. Design tramvaje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. akad. soch. Miroslav Zvonek, ArtD.

[18] Tramvaj bez řidiče. Studenti představili svoji vizi městské kolejové dopravy 2050 - INFO - zpravodajský portál ZČU. INFO - zpravodajský portál ZČU [online]. Dostupné z: <https://info.zcu.cz/clanek.jsp?id=2781>

[19] Alstom Aptis. About Alstom [online]. Copyright © Alstom 2020 [cit. 30.06.2020]. Dostupné z: <https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/aptis-so-much-more-12-metre-bus>

[20] Copyright © [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/BT-%202020150721%20-%20Data%20sheet%20Driver%20Assistance%20System%20EN.pdf>

[21] Autonomous tram | Trams and light rail | Siemens Mobility Global. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © Siemens Mobility 2020 [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/rolling-stock/trams-and-light-rail/autonomous-tram.html>

[22] Russia's first autonomous tram will be launched in Moscow. Intelligent Transport [online]. Copyright © [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.intelligenttransport.com/transport-news/75915/autonomous-tram-development-russia/>

[23] Session 4 Roland Scheich. Share and Discover Knowledge on LinkedIn SlideShare [online]. Copyright © 2020 [cit. 03.07.2020]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/Transportforum/session-4-roland-scheich>

[24] Bombardier's PRIMOVE Technology Enters Service on Scandinavia's First Inductively Charged Bus Line - Bombardier . 301 Moved Permanently [online]. Copyright © Bombardier 1997 [cit. 28.04.2020]. Dostupné z: <https://www.bombardier.com/en/media/newsList/details.bt-20161207-bombardier-primove-technology-enters-service-on-scan.bombardiercom.html?>

[25] APS – Ground-level power supply. Alstom [online]. 2015 [cit. 2016-01-26]. Dostupné z : [http://www.alstom.com/products-services/productcatalogue/rail-systems/Infrastructures/products/aps-ground-level-powersupply/.](http://www.alstom.com/products-services/productcatalogue/rail-systems/Infrastructures/products/aps-ground-level-powersupply/)

- [26] Mapa měst České republiky. Mapa měst České republiky [online]. Copyright © [cit. 30.06.2020]. Dostupné z: <https://2gis.cz/>
- [27] Mapy.cz Copyright © Seznam.cz [online]. [cit. 02.03.2020].
- [28] Cap, Michal, and Javier Alonso-Mora. "Multi-Objective Analysis of Ridesharing in Automated Mobility-on-Demand." In Robotics: Science and Systems XIV. Robotics: Science and Systems Foundation, 2018. <https://doi.org/10.15607/RSS.2018.XIV.039>.
- [29] YouTube. YouTube [online]. Olli Copyright © 2020 Google LLC [cit. 30.06.2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Ymz4SYVrEE>
- [30] IoT based Smart Transportation System – Trinetra T-Sense. IoT Solution and Services | M2M Solutions | Industrial IoT Platforms - Trinetra T-Sense [online]. Copyright © 2020 TRINETRA T [cit. 02.03.2020]. Dostupné z: <https://www.trinetratsense.com/industries/smart-transportation/>
- [31] Trasa metra D - YouTube. YouTube [online]. [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=wbegBXzZTmQ>
- [32] We are navigator[online]. [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <http://www.wearenavigator.com/people-we-are-1>
- [33] Synchronised Dance of Virtually Connected Trams - Shift2Rail. Home - Shift2Rail [online]. Copyright © shift2rail.org [cit. 20.05.2020]. Dostupné z <https://shift2rail.org/innotrans/synchronised-dance-of-virtually-connected-trams/>
- [33] Podvozek (železnice) – Wikipedie. [online]. [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Podvozek\\_\(%C5%BEeleznice\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Podvozek_(%C5%BEeleznice))
- [34] DSpace VŠB-TUO [online]. Copyright © [cit. 09.03.2020]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129602/DOB0092\\_FS\\_B2341\\_2302R010\\_40\\_2018.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129602/DOB0092_FS_B2341_2302R010_40_2018.pdf?sequence=1)