

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**ANALÝZA VYRÁBĚNÝCH  
VOZIDEL TRAM – TRAIN  
PRO REGIONÁLNÍ ŽELEZNICE**

**2023**

**DOMINIK  
BANKO**



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

Analýza vyráběných vozidel Tram - Train  
pro regionální železnice

Analysis of produced Tram - Train vehicles  
for regional railways

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
2023**

**Dominik BANKO**

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový  
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Kolář, CSc.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Banko** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **501374**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Analýza vyráběných vozidel Tram - Train pro regionální železnice**

Název bakalářské práce anglicky:

**Analysis of produced Tram - Train vehicles for regional railways**

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte:

1. Rešerši na téma vyráběná vozidla Tram - Train, přehled technických parametrů těchto vozidel a posuďte možnost jejich uplatnění v ČR.
2. Typový výkres vozidla Tram - Train pro ČR v měřítku 1:50.
3. Hmotnostní bilanci navrženého vozidla.
4. Návrh základních parametrů vypružení vozidla a výpočet vlastních frekvencí houpání a kývání vozidla.
5. Průvodní technickou zprávu dokumentující splnění dílčích úkolů.

Seznam doporučené literatury:

Odborné časopisy, firemní literatura, patentová literatura, normy.

Skripta ČVUT:

KOLÁŘ, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II,

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II - pojezd

MARUNA, Z., HOFFMANN, V., KOULA, J. KROUPOVÁ, Z.: Metodika konstruování kolejových vozidel - osobní a nákladní podvozky

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Josef Kolář, CSc. ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2023**

doc. Ing. Josef Kolář, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## ANOTAČNÍ ZÁZNAM

Jméno autora:	Dominik Banko
Název práce:	Analýza vyráběných vozidel Tram - Train pro regionální železnice
Anglický název:	Analysis of produced Tram - Train vehicles for regional railways
Rozsah práce:	109 stran 51 obrázků 30 tabulek 5 příloh
Akademický rok:	2022/2023
Ústav:	12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Kolář, CSc.
Klíčová slova:	Tram - Train, typový výkres, hmotnostní bilance, vypružení
Key words:	Tram - Train, blueprint, weight distribution, suspension

## ABSTRAKT

Bakalářská práce nabízí přehled vyráběných a v současnosti provozovaných vozidel Tram - Train včetně jejich technických parametrů. Na základě těchto parametrů hodnotí, zda jsou některá z těchto vozidel schopná provozu v ČR. Součástí práce je návrh typového výkresu vozidla vhodného pro místní provoz včetně jeho hmotnostní bilance. Pro navržené vozidlo jsou určeny základní parametry vypružení, které slouží ke stanovení vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitu houpání a kývání vozidla.

## ABSTRACT

The bachelor thesis offers an overview of manufactured and currently operated Tram - Train vehicles including their technical parameters. Based on these parameters, it evaluates whether some of these vehicles are capable of operation in the Czech Republic. The thesis includes a blueprint of a vehicle suitable for local operation and its weight distribution. For the designed vehicle, the basic suspension parameters are computed. These parameters are then used to determine the natural frequencies and natural shapes of the vehicle's rocking and swaying rhythms.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Analýza vyráběných vozidel Tram - Train pro regionální železnice” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 12.7.2023

.....  
(podpis autora)

## Obsah

Úvod.....	9
1 Vyráběná vozidla Tram - Train, přehled technických parametrů těchto vozidel a možnost jejich uplatnění v ČR .....	10
1.1 Stadler Citylink Tram - Train .....	11
1.2 Alstom Citadis .....	19
1.3 Siemens Avanto Tram - Train.....	24
1.4 Bombardier Flexity Swift.....	29
1.5 Siemens Combino Duo.....	33
1.6 Stadler Tango-type Tram - Train .....	38
1.7 Škoda ForCity Smart 36T.....	40
1.8 Tram - Train v Pražské integrované dopravě .....	43
1.8.1 Trasa Praha – Brandýs nad Labem – Stará Boleslav .....	43
1.8.2 Trasa Praha, Kobylisy – Odolena Voda/Neratovice/Mělník .....	43
1.8.3 Trasa Praha, Hlubočepy – Rudná a Beroun; Trasa Praha, Sídliště Řepy – Hostivice – Chýně – (Rudná) .....	44
1.8.4 Trasa Praha, Modřany – Vrané nad Vltavou – Dobříš .....	44
1.9 Porovnání vozidel Tram - Train .....	45
1.10 Vozidlo Tram - Train schopné provozu v České republice.....	50
2 Typový výkres vozidla Tram - Train pro ČR .....	52
2.1 Podvozky .....	52
2.2 Nástupní výška vozidla.....	55
2.3 Hlavní rozměry vozidla.....	58
2.4 Interiér vozidla .....	58
3 Hmotnostní bilance navrženého vozidla .....	64
3.1 Cestující.....	64
3.2 Hrubá stavba a elektrická výzbroj.....	68
3.3 Výsledky hmotnostní bilance .....	71
4 Návrh základních parametrů vypružení vozidla a výpočet vlastních frekvencí houpání a kývání vozidla.....	77
4.1 Návrh základních parametrů vypružení.....	77
4.2 Výpočet vlastních frekvencí houpání a kývání vozidla .....	78

4.3	Výpočet vlastní frekvence kývání podvozků .....	92
	Závěr .....	94
	Seznam použitých obrázků .....	95
	Seznam tabulek .....	97
	Seznam příloh .....	99
	Zdroje.....	100
	Přílohy.....	105



## Úvod

Vozidla Tram - Train jsou speciálním typem vozidel, který je schopen provozu na tramvajových tratích a zároveň na železnici. Většina těchto vozidel je vybavena dvojitým typem pohonu, a to zařízením umožňujícím odběr stejnosměrného napětí z tramvajových trolejí spolu v kombinaci se zařízením pro odběr střídavého napětí z troleje železniční. V případě, že železniční trať není elektrifikována, jsou opatřena spalovacími motory či bateriovými systémy. Existují také vozidla, která mají pouze jeden typ pohonu, ale také jsou řazena mezi vozidla Tram - Train. Tato lehká kolejová vozidla poskytují rychlé a pohodlné spojení z regionu do centra města bez přestupu. Integrují městskou a regionální dopravu. [1]

Tram - Train vozidla jsou vysoce univerzální a kromě tramvajových tratí mohou využívat běžné již elektrifikované tratě, nově elektrifikované regionální tratě, či tratě, které zatím elektrifikovány nejsou. Ideální jsou pro provoz v regionech, kde se nachází zřídka využívané tratě ve špatném stavu. [1]

## 1 Vyráběná vozidla Tram - Train, přehled technických parametrů těchto vozidel a možnost jejich uplatnění v ČR

Cílem rešeršní části bakalářské práce je sestavit přehled vyráběných a dosud provozovaných vozidel Tram - Train. Rešerše má být opřena o základní technické parametry těchto vozidel, na základě kterých bude možné vybrat ta vozidla, která by byla schopná provozu v České republice.

Vysoké zastoupení mají Tram-Train vozidla v Německu, například ve městech Kassel nebo Chemnitz. V Karlsruhe jsou v provozu již více než 20 let. Po zavedení tohoto způsobu dopravy se zvýšil tamní počet cestujících hromadnou dopravou až o vyšší stovky procent. Dále také obsluhují cestující ve Francii v okolí Paříže, v Nantes, Lyonu či v Mulhouse. Své využití našla vozidla Tram - Train také v Severní Americe. [1]

## 1.1 Stadler Citylink Tram - Train

Vozidla Stadler Citylink Tram - Train jsou projektována na provoz po úzkorozchodných tratích o rozchodu 1 000 mm a tratích o standardním rozchodu 1 435 mm. Používají se jako příměstské tramvaje a zároveň meziměstské vlaky. Jsou vyráběna ve španělské Valencii švýcarským výrobcem kolejových vozidel Stadler, který odkoupil divizi kolejových vozidel od společnosti Vossloh v roce 2015. Tento Tram - Train je v provozu ve Velké Británii, Španělsku, Německu, Maďarsku a Mexiku, plánovaný je také jeho provoz v Rakousku. První model vyjel roku 2003 na železniční síti ve španělském městě Alicante. Jednotlivé modely se od sebe více či méně liší, proto budou technické parametry většiny z nich vypsány samostatně v tabulce níže. Na Obr. 1.1 lze vidět maďarskou variantu tohoto vozidla. [2]



*Obr. 1.1: Stadler Citylink Tram - Train maďarské dopravní společnosti MÁV-START Zrt [2]*

První objednávka na vozidla Citylink byla učiněna španělskou železniční společností Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana pro železniční síť města Alicante. Následovala dodávka sedmi vozů do Velké Británie v červnu roku 2013, které se tak staly prvními britskými vozidly Tram - Train, viz Obr. 1.2. Zde pokrývají provoz na tramvajové síti Supertram a národní železniční síti mezi Sheffieldem a Rotherhamem. Stadler dodá dalších 36 tříčlánkových Citylinků pro provoz ve Walesu. [2]

Německem bylo objednáno 8 hybridních vozidel pro železniční projekt Chemnitzer Modell, který spojuje Chemnitzskou tramvajovou trať se sítí příměstské železnice. Stalo se tak v srpnu 2012 a další 4 vozidla byla objednána v červenci 2015 v rámci druhé fáze projektu. Dalších 19 vozidel bylo objednáno v březnu roku 2022 s možností objednávky

dalších 27 v blízké budoucnosti. Do provozu by měla být uvedena tato nejnovější vozidla v létě roku 2026 a měla by to být obousměrná vozidla druhé generace se třemi články. Objednávka má hodnotu 189 milionů eur, byla zaplacená třemi německými bankami. [2]

V květnu 2017 podepsal se společností Stadler smlouvu na dodání 8 vozidel Citylink Tram - Train maďarský dopravní podnik MÁV-START. Smlouva zahrnovala také 4 dodatečné jednotky. Obousměrná diesel-elektrická dvousilová Tram - Train vozidla spojují tramvajové trati Segedínu a města Hódmezővásárhely bez nutnosti přestupu. Dodána byla začátkem roku 2021. [2]



*Obr. 1.2: Stadler Citylink Tram - Train britské dopravní společnosti SYPTE [4]*

Německo-rakouské konsorcium v lednu roku 2022 sjednalo se společností Stadler kontrakt na 504 vozidel Tram - Train v celkové hodnotě 4 miliard eur, jakožto součást projektu VDV Tram - Train. Dohoda zahrnuje také servis těchto vozidel po dobu 32 let. Konsorcium se skládá z šesti německých a rakouských dopravních společností. 246 vozidel by mělo být dodáno v rámci 10 nadcházejících let, první 4 kusy v roce 2024 do německého Sárška. Zde by mělo od roku 2027 jezdit 28 vozidel ve městě Saarbrücken a na tratích spojujících německý Lebach a Saargemünd na severovýchodě Francie. Další 24 Tram - Train vozidel bude dodáno počátkem roku 2025 a nahradí tak dosud provozované tramvaje. [2]

V provozu je také 75 vozidel v německém Karlsruhe, napájena jsou 750 V DC. Dále se používají 2 vozidla v mexickém městě Puebla, či na španělské Mallorce. [3]

Stadler Citylink Tram - Train je obousměrné vozidlo. Součástí jeho výbavy je akustická izolace zajišťující hladký a tichý provoz, moderní informační systém pro cestující, klimatizace a světlý interiér, nechybí ani kamerový systém. Okna byla navržena tak, aby cestujícím poskytovala panoramatické výhledy. [2]

Při výrobě tohoto vozidla je možné umístit všechny dveře do požadované výšky tak, aby vyhovovala výšce nástupiště v místech provozu vozidla. Všechny modely tohoto vozidla jsou minimálně z části nízkopodlažní a bezbariérové. Vozidla provozovaná v německém Chemnitzu mají dveře v různých výškách, díky kterým jsou dosaženy dvě různé nástupní výšky, a to 405 mm a 570 mm. Součástí dveří jsou výsuvné rampy, které se dokáží naklonit do požadované výšky. Rampy spojují i jednotlivé části vozidla, které je díky nim nízkopodlažní v celé své délce. Stejně je tomu tak v případě Maďarského modelu, rozdílné jsou pouze samotné výšky nástupišť, v tomto případě to je 300 mm a 550 mm. [5; 6]

Model pro Wales bude také 100% nízkopodlažní a bezbariérový, v provozu bude jako metro, viz Obr. 1.3. Nástupní výška bude činit 915 mm a uvnitř se bude nacházet systém ramp. Nástupní výška vozidla určeného pro Sheffield činí 425 mm. Odpružení podvozku zahrnuje prvky, které regulují výšku tak, aby byl nástup do vozidla vždy bezbariérový. Část zastávek, kterými toto vozidlo projíždí, prošlo úpravou z důvodu snadného nástupu. Vozidlo ale není nízkopodlažní celé, je tomu tak pouze v nástupních částech, do ostatních částí se lze dostat pomocí jednoho schodu. Španělský model má podlahu ve výšce 375 mm v nástupních částech. Jelikož výška nástupišť činí 360 mm, tak je v těchto částech vozidlo nízkopodlažní. Do zbývajících částí vozidla, kde je podlaha ve výšce 900 mm se lze dostat pomocí několika schodů. [4; 7; 8]



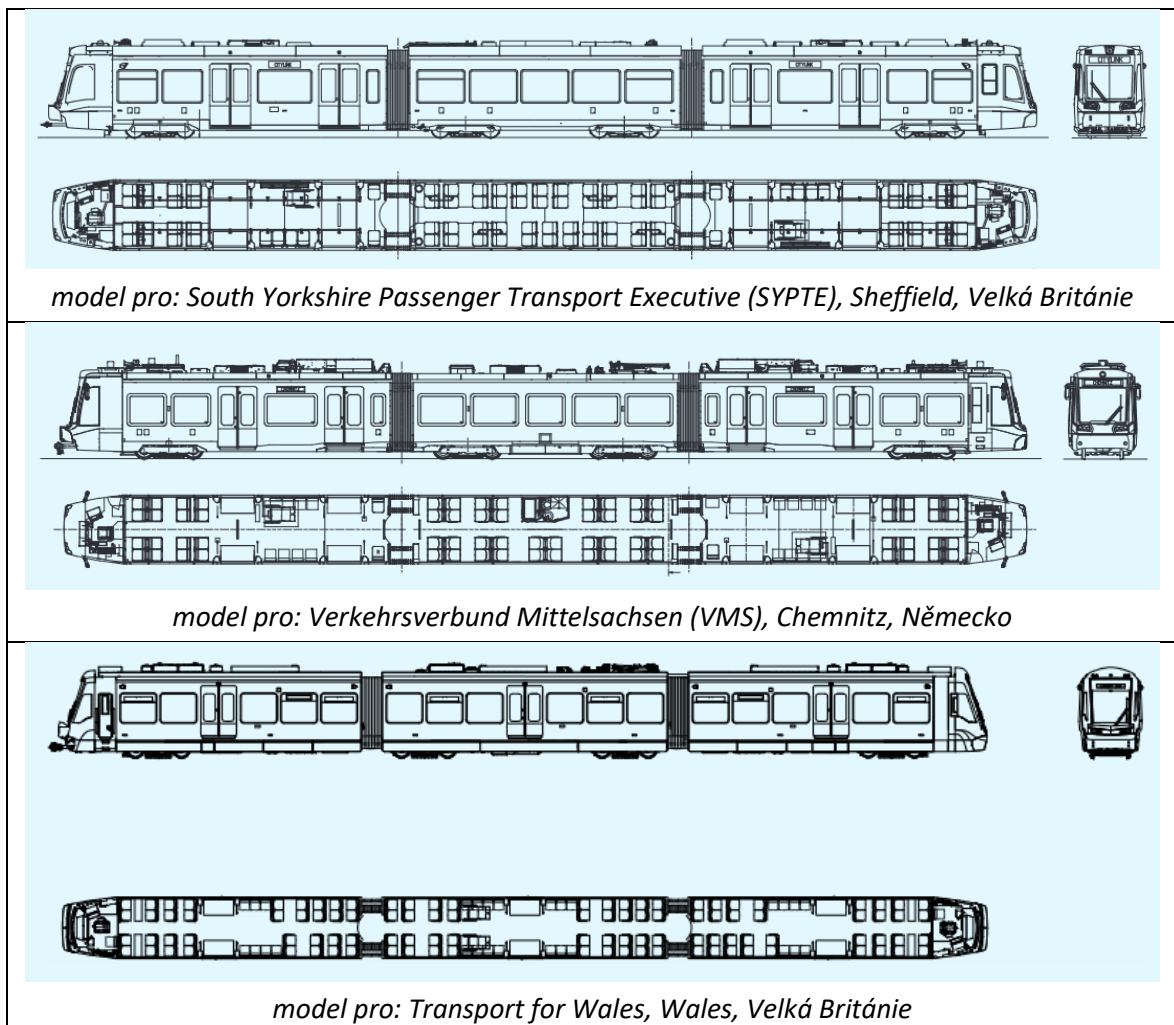
Obr. 1.3: Stadler Citylink Tram - Train společnosti Transport for Wales [8]

Citylink lze používat pro provoz na tramvajové i železniční trati do rychlosti 100 km/h. V Maďarsku se bude pohybovat maximální rychlostí 50 km/h ve městě a až 100 km/h na otevřené trati mezi městy pomocí dieselových motorů. Rychlost je nastavena tak, aby splňovala tamější dopravní regulace. [2]

V anglickém Sheffieldu jsou vozidla napájena stejnosměrným napětím o velikosti 750 V na tramvajové části a 25 kV střídavého napětí na části železniční. V Maďarsku jsou napájena 600 V stejnosměrného napětí ve městech a dieselovými motory při provozu mezi městy. Kompletní informace o pohonech všech modelů lze nalézt v Tab. 1.2. [2]

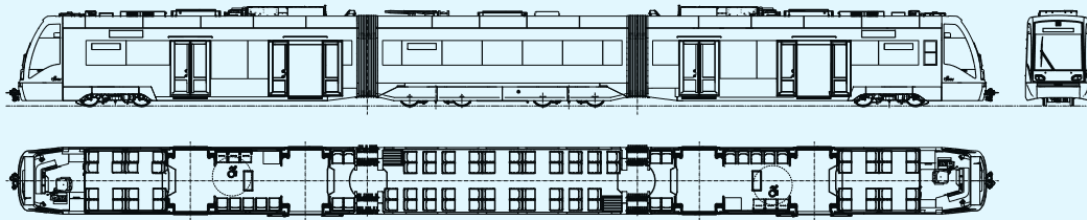
Pro porovnání jednotlivých modelů slouží Tab. 1.1 s typovými výkresy jednotlivých vozidel a Tab. 1.2 obsahující jejich technické parametry.

*Tab. 1.1: Typové výkresy vozidla Stadler Citylink Tram - Train [4; 5; 6; 7; 8]*





*model pro: MÁV-START Zrt., Maďarsko*



*model pro: Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana, Alicante L9, Španělsko*

Tab. 1.2: Porovnání provozovaných variant vozidla Stadler Citylink Tram - Train [4; 5; 6; 7; 8]

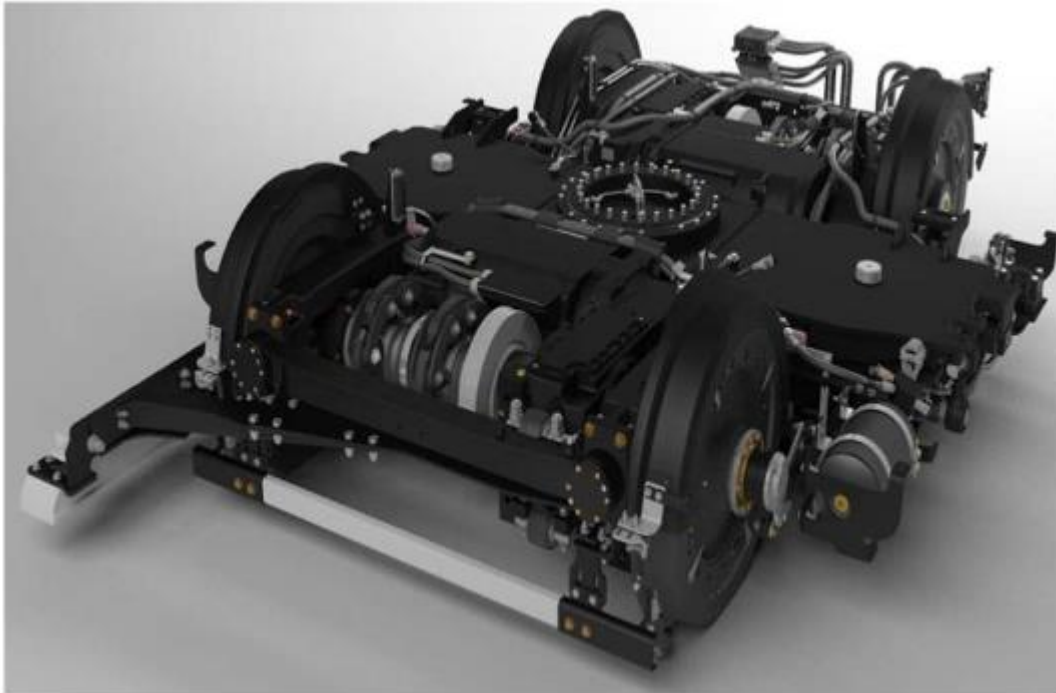
vozidlo	Stadler Citylink Tram - Train				
region	Sheffield, Velká Británie	Chemnitz, Německo	Wales, Velká Británie	Segedín – Hódmezővásárhely, Maďarsko	Alicante, Španělsko
provozovatel	South Yorkshire Passenger Transport Executive (SYPTE)	Verkehrsverbund Mittelsachsen (VMS)	Transport for Wales	MÁV-START Zrt	Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana (FGV)
počet vozů	7	12	36	8	6
uvedení do provozu	2017	2016	2023	2021	2019
počet článků	3				
rozchod	1 435 mm				1 000 mm
podvozek	Bo'2'Bo'Bo'	Bo'2'2'Bo'			
počet hnaných podvozků	3 ze 4	2 ze 4			
pohon	750 V DC + 25 kV AC	600/750 V DC + diesel-elektrické agregáty	25 kV AC + baterie	600 V DC + diesel-elektrické agregáty	750 V DC + diesel-elektrické agregáty
výkon trakčních motorů	6 x 145 kW	4 x 145 kW + 2 x 390 kW	4 x 150 kW	4 x 145 kW + 2 x 390 kW	4 x 145 kW + 2 x 390 kW



délka	37 200 mm	37 200 mm	40 070 mm	37 200 mm	37 510 mm
šířka	2 650 mm				2 550 mm
výška	3 720 mm	3 990 mm	-	3 800 mm	3 800 mm
nástupní výška	425 mm	405 mm a 570 mm	915 mm	300 mm a 550 mm	375 mm
výška nástupiště	375 mm	190 mm, 380 mm a 550 mm	915 mm	300 mm a 550 mm	360 mm
min. poloměr směr. trať. oblouku	22 m	25 m	25 m	22 m	30 m
max. sklon	100 ‰	-	-	-	60 ‰
počet míst k sezení	96	87	126	92	100
počet míst k stání [4 os./m <sup>2</sup> ]	140	141	126	124	135
celková kapacita [4 os./m <sup>2</sup> ]	236	228	252	216	235
průměr kol	720 mm	720 mm	740 mm	720 mm	720 mm
maximální rychlost	100 km/h				
dveře	4 dvojitě na obou stranách	4 dvojitě na obou stranách	3 dvojitě na obou stranách	4 dvojitě na obou stranách	4 dvojitě na obou stranách
EN 12663 / 15227 <sup>1)</sup>	P-III / C-III				

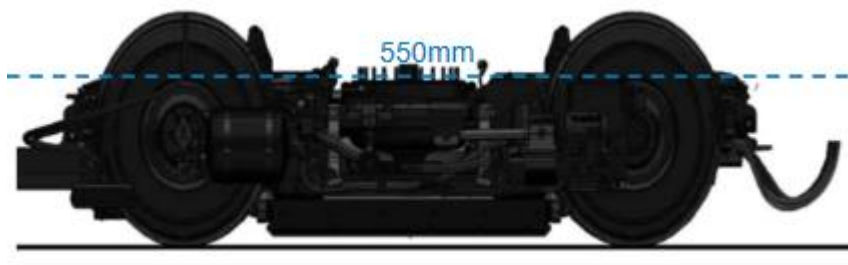
<sup>1)</sup> Norma EN 12663 udává konstrukční požadavky na skříň kolejových vozidel, norma EN 15227 udává požadavky na odolnost skříní železničních vozidel proti nárazu.

Podvozek vozidla má světlou výšku svých spodních dílů minimálně 100 mm (požadavek EBO je minimálně 80 mm). Umožňuje, aby bylo celé vozidlo nízkopodlažní, na úzkém rozchodu 900 mm musí být doplněno o vnitřní schody. Minimální poloměr oblouku, kterým je podvozek schopen projet, má velikost 22 m. Model podvozku se nachází na Obr. 1.4. [3]



*Obr. 1.4: Podvozek vozidla Stadler Citylink [3]*

Podvozek je otočný s konvenční nápravou dvojkolí. Kola mají průměr 720 mm. Podvozek má tvar H a je vybaven transverzálními motory, odpruženými koly, sekundárním vzduchovým odpružením a plně odpruženou převodovkou. Jedná se o nejnižší konvenční podvozek své třídy navržený pro komfortní jízdu při rychlostech až do 110 km/h, viz Obr. 1.5. Podvozek je navržen v souladu s normami EBO a BOStrab, také je certifikován ve Velké Británii. [3]



*Obr. 1.5: Výška podvozku vozidla Stadler Citylink [3]*

## 1.2 Alstom Citadis

Alstom vyrábí Tram - Train vozidla v rámci skupiny tramvajů Citadis. Mezi lety 2005 až 2011 dodal Alstom 100 vozidel pod označením Regio Citadis, které se dostaly do provozu v nizozemském Haagu a v německém Kasselu. [9]

Dalších 125 jednotek je průběžně dodáváno francouzské železniční společnosti SNCF, určeny jsou pro provoz v Nantes, Lyonu a okolí Paříže, viz Obr. 1.6. Nesou označení Alstom Citadis Dualis. V roce 2011 byly předány první kusy z celkových 24 vozidel do Nantes, kde jsou nasazovány na dvojici linek, jež nejsou napojeny na zdejší tramvajovou síť, s napojením je ale do budoucna plánováno. Dalších 24 vozů je provozováno v okolí Lyonu, přičemž také nejsou napojeny na Lyonskou tramvajovou síť. Další vozy se používají v okolí Paříže v rámci pařížských linek T4 a T11, na obou po 15 vozidlech. Na další pařížské linky T12 a T13 je objednáno 34 vozidel Tram - Train. Nejnovějších 13 kusů doplní linku T12 a na lince T4 nahradí vozidla Siemens Avanto. Stane se tak roku 2025, kdy 15 vozů Avanto bude v provozu po dobu pouhých 19 let. [9]

Americká verze nese označení Citadis Spirit a bude provozována v kanadských městech Ottawa a Toronto. V roce 2019 byla uvedena do provozu nová linka zvaná Confédération Line, pro jejíž obsluhu bylo vyrobeno 34 vozidel. [9]



Obr. 1.6: Vozidla Alstom Citadis Dualis v Nantes [9]

Dále bude popsáno pouze vozidlo Regio Citadis, jelikož je svými parametry nejvhodnější pro provoz v České republice. Skládá se ze tří článků a má 4 podvozky. Vozidla Citadis Dualis jsou delší, mají 4 nebo 5 článků. Citadis Spirit je také dodáván ve variantě 3 článků, případně kratší či delší, nicméně se jedná o model určený pro provoz v Severní Americe.

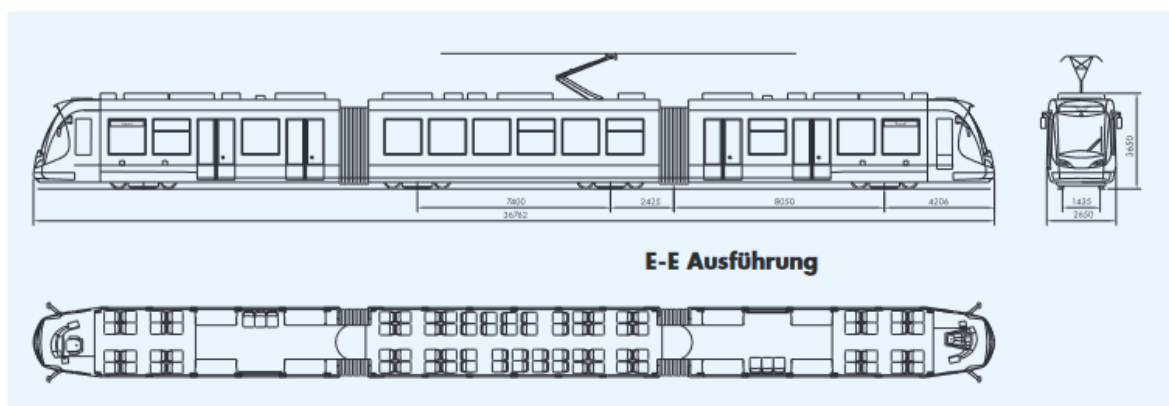
Vozidla Regio Citadis splňují normy EBO a BOStrab. Cestujícím nabízí vysokou úroveň pohodlí díky klimatizovanému prostoru a modernímu systému vytápění. Regio Citadis je nízkopodlažní v místě nástupu, u každých dveří má výsuvnou rampu. Nabízí víceúčelový a zavazadlový prostor a ve střední části také bezpečná komfortní místa k sezení při delších regionálních cestách. Okna jsou dvojitá a přispívají tak k tichosti odhlučněného interiéru. [10]

Řada Regio Citadis je založena na flexibilní základní konstrukci a nabízí širokou škálu možností provedení a výbavy v závislosti na přání a použití, aby bylo možné vozidlo individuálně přizpůsobit příslušným požadavkům. Lze měnit uspořádání dveří, zvolit vozidlo pro jednosměrný nebo obousměrný provoz. Citadis je možné používat jako čistě tramvajové vozidlo i jako regionální lehké kolejové vozidlo. Vozidlo je vyfoceno na Obr. 1.7, na Obr. 1.8 se nachází jeho typový výkres. [10]



*Obr. 1.7: Alstom Regio Citadis při zkušební jízdě z července roku 2004 [10]*

Vozidlo ve městě využívá pro pohon motorů stejnosměrné napětí o velikosti 750 V. Existují dvě konfigurace tohoto vozidla, první lze napájet také pomocí napětí střídavého o velikosti 15 kV, druhá se provozuje kromě města na neelektrifikované části trati, kde provoz probíhá bez omezení pomocí integrovaného dieselového pohonu. V obou krajních člancích se nachází šestiválcový vznětový motor Man o výkonu 375 kW. Karoserie vozidla je vyrobena z oceli, přední část ze sklolaminátu a je přišroubována ke karoserii. V případě většího poškození při nehodě lze přední část snadno vyměnit. [10]



*Obr. 1.8: Typový výkres vozidla Alstom Regio Citadis [11]*

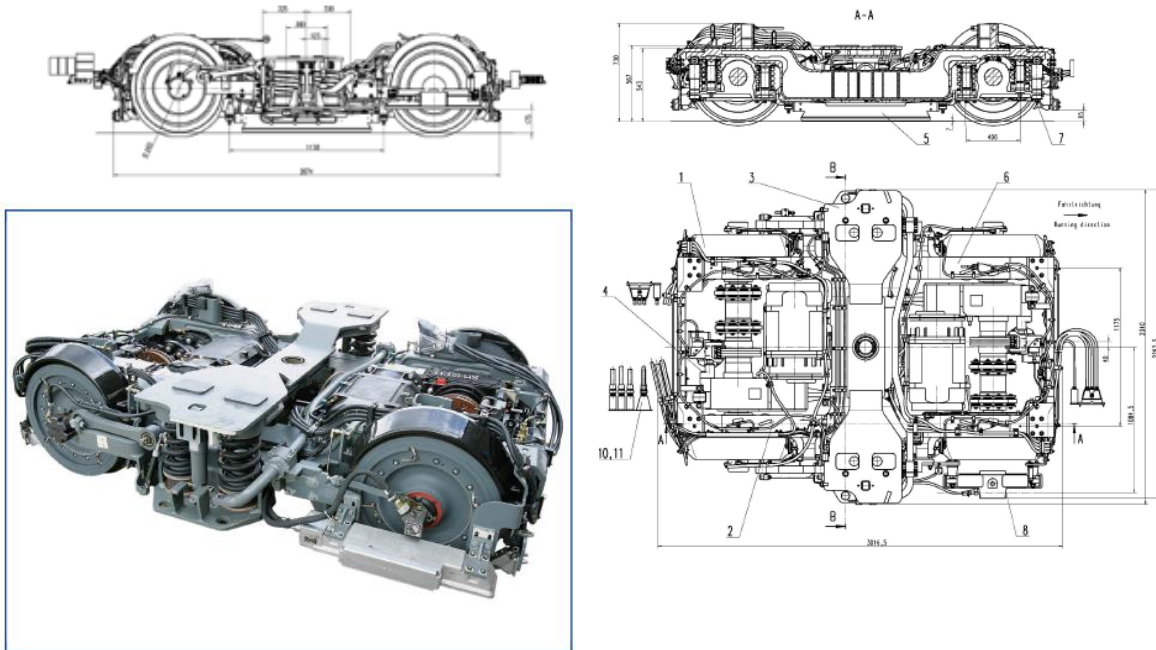
V obou krajních člancích vozidla jsou na každé straně dvoje dveře, které umožňují přístup do velkého víceúčelového prostoru s místem pro kočárky, invalidní vozíky a jízdní kola. V každém tomto článku se nachází 16 sedadel, ve střední části dalších 52. Nástupní výška je maximálně 360 mm nad temenem koleje. Pro překlenutí vzdálenosti mezi vozidlem a hranou nástupiště je možné vysunout již zmíněnou rampu. Pro osoby na invalidním vozíku může řidič použít nájezdovou plošinu, která je umístěna ve skříňce vedle dveří. Ke krajním 16 sedadlům v obou krajních člancích vozidla se cestující dostanou pomocí jednoho schodu, vozidlo tedy není 100% nízkopodlažní. Kompletní technická specifikace je vypsána v Tab. 1.3. [10]

*Tab. 1.3: Technické parametry vozidla Alstom Regio Citadis [10; 11]*

vozidlo	Alstom Regio Citadis	
region	Kassel, Německo	
provozovatel	RBK Regionalbahn Kassel GmbH	
konfigurace	hybridní	dvousilové
počet vozů	18	10
uvedení do provozu	prosinec 2004	
počet článků	3	
rozchod	1 435 mm	
podvozek	Bo'2'2'Bo'	
počet hnaných podvozků	2 ze 4	
pohon	750 V DC + 15 kV AC 16 2/3 Hz	750 V DC + diesel-elektrické agregáty

výkon trakčních motorů	4x 150 kW	4x 150 kW + 2x 375 kW
délka	36 762 mm	
šířka	2 650 mm	
výška	3 650 mm	
nástupní výška	max. 360 mm	
výška nástupiště	cca 380 mm	
výška podlahy	420 mm a 660 mm	
podíl nízkopodlažních částí	75 %	
hmotnost prázdného vozidla	59,8 t	63,4 t
hmotnost plně obsazeného vozidla	82,5 t	85,2 t
min. poloměr směr. trať. oblouku	22 m	
počet míst k sezení	84 + 6 výklopných	
počet míst k stání [4 os./m <sup>2</sup> ]	139	127
celková kapacita [4 os./m <sup>2</sup> ]	223	211
maximální rychlost	100 km/h	
dveře	4 dvojitě na obou stranách	

Podvozek vozidel Regio Citadis nese označení CL 300, viz Obr. 1.9. Jedná se o podvozek pro vozidla Tram - Train, který je vyprojektován v souladu s normou BOStrab. Jeho součástí je plně odpružená převodovka. Současně je v provozu zhruba 400 těchto podvozků, používají se pro vozidla Regio Citadis v německém Kasselu a na nizozemské RandstadRail. [11]



Obr. 1.9: Podvozek CL 300 vozidel Regio Citadis a jeho výkres [12]

Dostupné technické parametry tohoto podvozku jsou vypsány v Tab. 1.4.

Tab. 1.4: Technické parametry podvozku CL 300 vozidel Alstom Regio Citadis [12]

podvozek	CL 300
provozní rychlost	100 km/h
rozchod	1 435 mm
typ podvozku	motorový i standardní otočný
max. nápravová hmotnost	11 t
hmotnost motorový/standardní	5,6 t / 4,2 t
typ primárního / sekundárního odpružení	vinuté pružiny
typ brzd hnacího podvozku	2 hydraulické brzdě jednotky + magnetické kolejnicové brzdy
typ brzd hnaného podvozku	4 hydraulické brzdě jednotky + magnetické kolejnicové brzdy
průměr kola nové/opotřebené	660 mm / 580 mm

### 1.3 Siemens Avanto Tram - Train

Řada lehkých kolejových vozidel Siemens S70 je v Evropě nabízena pod obchodním názvem Avanto v úpravě Tram - Train, viz Obr. 1.10. Vozidla byla využívána francouzskou národní železniční společností SNFC. 15 těchto vozidel bylo v provozu od roku 2006 na lince T4 v okolí Paříže, roku 2025 je zde nahradí Alstom Citadis Dualis, který je zde také již v provozu. Od roku 2009 bylo také 12 vozidel v provozu ve městě Mulhouse. Od roku 2022 jsou určena všechna tato vozidla k prodeji, cena jednoho vozu se pohybuje okolo 2,4 milionu eur. Náhrada pro město Mulhouse zatím není známa. [12]

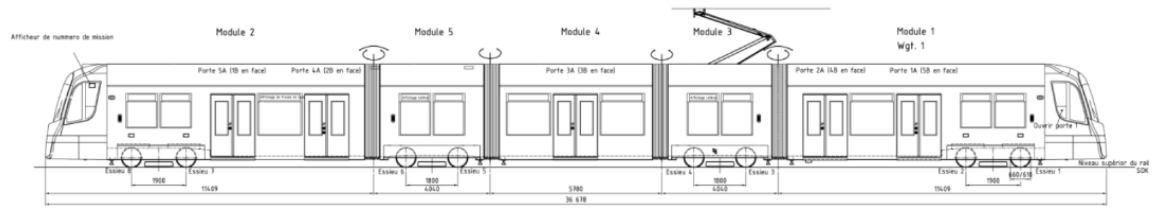
Tato vozidla jsou uzpůsobena pro provoz na francouzské národní železniční síti a také na městských tramvajových sítích, jelikož mohou být napájena napětím 750 V DC a zároveň 25 kV 50 Hz AC. Mají oproti standardním tramvajím zesílenou karoserii a jsou uzpůsobeny francouzskému, tedy standardnímu rozchodu. [12]



*Obr. 1.10: Siemens Avanto Tram - Train [13]*

Avanto Tram - Train je nízkopodlažní, obousměrné, kloubové vozidlo. Je sestaveno z pěti článků na celkem čtyřech podvozcích, z čehož krajní články spočívají na motorizovaných podvozcích, dva vnitřní články na standardních podvozcích a jsou přibližně stejně dlouhé jako tyto podvozky, a uprostřed se nachází článek nesený. Na každé straně mají 5 dvojítych dveří o šířce 1,30 m, viz Obr. 1.11. [12]





*Obr. 1.11: Typový výkres vozu Siemens Avanto Tram - Train [13]*

Vozidla jsou plně klimatizována, vybavena jsou také moderním informačním systémem, kamerovým systémem a kamerami z vnějšku, které slouží jako zpětná zrcátka. Celková kapacita činí 242 cestujících, což zahrnuje 80 míst k sezení a 6 míst sklopitelných. Podíl nízkopodlažních částí vozidel činí 80 % délky, jsou tedy dostupná pro osoby se zhoršenou pohyblivostí. Pouze směrem od vnějších dveří ke kabině řidiče se nachází schod. Každé dveře obsahují automaticky výsuvnou rampu. Vozidla měla zpočátku viditelné podvozky, ale později byly zakryty plechy v barvách jejich karoserie. Kompletní technická specifikace se nachází v Tab. 1.5. [12]

*Tab. 1.5: Technické parametry vozidla Siemens Avanto Tram - Train [13]*

vozidlo	Siemens Avanto Tram - Train
region	Île-de-France a Mulhouse, Francie
provozovatel	Société nationale des chemins de fer français (SNCF)
počet vozů	15 + 12
vedení do provozu	2006 a 2009
počet článků	5
rozchod	1 435 mm
podvozek	Bo'2'2'Bo'
počet hnaných podvozků	2 ze 4
pohon	750 V DC + 25 kV AC 50 Hz
výkon trakčních motorů	4 x 130 kW
délka	36 978 mm
šířka	2 650 mm
výška	3 520 mm
výška podlahy	381 mm a 655 mm
podíl nízkopodlažních částí	80 %

hmotnost	59,7 t
min. poloměr směr. trať. oblouku	25 m
max. sklon	70 ‰
počet míst k sezení	80 + 6 výklopných
počet míst k stání [4 os./m <sup>2</sup> ]	162
celková kapacita [4 os./m <sup>2</sup> ]	242
maximální rychlost ve městě	70 km/h
maximální rychlost na železnici	100 km/h
dveře	5 dvojitě na obou stranách

Vozidla Avanto Tram - Train využívají dva typy podvozků. Motorizovaný nese označení SF 70 a standardní SF 40, viz Obr. 1.12 a Obr. 1.13. [13]

Motorový podvozek SF 70 je navržený pro nízkopodlažní vozidla s výškou 655 mm nad podvozkem. K překlenutí nízkopodlažní a vysokopodlažní části je nutné využití pouze jednoho schodu. SF 70 je konvenční podvozek, který se může natáčet o úhel 12 ° pod vozidlem. [13]

Rám podvozku má tvar H a je tvořen kombinací desek a litých dílů. Primární odpružení se skládá ze 4 laminovaných ocelovo-pryžových vinutých pružin s dobrými samočinnými charakteristikami tlumení, zajišťujícími boční pružnost vedení nápravy. Sekundární odpružení tvoří 2 hydropneumatické pružiny, které zvyšují jízdní komfort a umožňují vyrovnávání zatížení. Pro postranní vypružení jsou namontovány pryžové nárazníky. [13]



Obr. 1.12: Motorový podvozek SF 70 vozidla Siemens Avanto Tram - Train [14]

Trakční jednotka se skládá z příčně umístěného třífázového asynchronního motoru s vlastní ventilací a ozubené převodovky. Jednotka je zcela odpružena v rámu podvozku, aby se minimalizovala neodpružená hmotnost. [13]

Na převodovku je namontována hydraulicky odpružená kotoučová brzda o průměru 360 mm. V závislosti na požadovaném brzděném účinku lze namontovat jednu nebo dvě třecí magnetické brzdy na každou nápravu. [13]



*Obr. 1.13: Standardní podvozek SF 40 vozidla Siemens Avanto Tram - Train [14]*

Standardní podvozek SF 40 je navržen pro vozidla s výškou podlahy 381 mm. Tento podvozek se používá pod krátkými články 3člankového vozidla S70 a 5člankového vozidla Avanto. Podvozek je připojen ke skříni pomocí dvou podélných hřídelů odolných proti krutu. To zajišťuje optimální šířku uličky mezi kryty kol. [13]

Rám podvozku má tvar H a je složen z trubek obdélníkového profilu a litých dílů. Primární odpružení je tvořeno kuželovými ocelovo-pryžovými pružinami. Je navrženo tak, aby mělo dobré samočinné tlumicí vlastnosti, což zajistí pružné vedení nápravy v příčném směru. Sekundární odpružení je realizováno pomocí 4 vinutých pružin v kombinaci s pryžovou pružinou. Jako volitelná výbava jsou k dispozici 4 hydropneumatické pružiny zvyšující jízdní komfort a umožňující vyrovnávání zatížení. [13]

Čepová náprava je lité konstrukce. Na tuto nápravu jsou namontována kola, jež jsou pryžově odpružena, společně s kuželíkovými ložisky. Průměr kola má velikost 660 mm, opotřebované má 580 mm. [13]

Každý podvozek je vybaven 4 brzdovými kotouči a 4 třecími magnetickými brzdami sloužícími jako brzdy nouzové. Také je možné instalovat pružinové brzdové jednotky. Technické parametry obou podvozků obsahuje Tab. 1.6. [13]

Tab. 1.6: Technické parametry podvozku SF 70 a SF 40 vozidla Siemens Avanto Tram - Train [14]

podvozek	SF 70	SF 40
provozní rychlost	106 km/h	106 km/h
rozchod	1 435 mm	1 435 mm
typ podvozku	motorový otočný	standardní neotočný
max. nápravová hmotnost	10,5 t	11,5 t
hmotnost	5,7 t	3,6 t
rozvor náprav	1 900 mm	1 800 mm
typ primárního odpružení	vinuté pružiny	kuželové pružiny
typ sekundárního odpružení	hydropneumatické	vinuté pružiny
typ brzd	kotoučové + třecí magnetické	4 kotoučové + 4 třecí magnetické
průměr kol nové/opotřebované	660 mm / 580 mm	660 mm / 580 mm
výkon dvojkolí	140 kW	
min. poloměr směr. trať. oblouku	25 m	

## 1.4 Bombardier Flexity Swift

Vozidla Bombardier Flexity Swift jsou v provozu jako Tram - Train v německém městě Karlsruhe, viz Obr. 1.14. Celkem bylo vyrobeno 30 těchto hybridních vozidel za celkovou částku kolem 129 milionů eur. Dodána byla mezi lety 2011 a 2013. Vyrobená byla v německém Budyšině a ve Vídni. Elektrickou výzbroj dodal Bombardier Mitrac z Mannheimu a podvozky FLEXX Urban 2500 Bombardier Siegen. [14]



*Obr. 1.14: Bombardier Flexity Swift v německém Karlsruhe [17]*

Vozidla FLEXITY Swift jsou přizpůsobena požadavkům města a regionu Karlsruhe. Pro optimální přizpůsobení stávající infrastruktury jsou všechny nástupní prostory středněpodlažní, což zajišťuje rychlý tok cestujících a usnadňuje přístup osobám s omezenou schopností pohybu a cestujícím s kočárky nebo těžkými zavazadly. Do vyšších částí vozidla se cestující dostanou pomocí jednoho schodu. Vozidla se skládají ze tří článků a interiér je po celé délce průchozí. Konvenční podvozky se vzduchovými pružinami zaručují plynulou jízdu snižující opotřebení kol i kolejí na naprosté minimum. Typový výkres tohoto vozidla se nachází na Obr. 1.15. [14]



*Obr. 1.15: Typový výkres vozidla Bombardier Flexity Swift [17]*

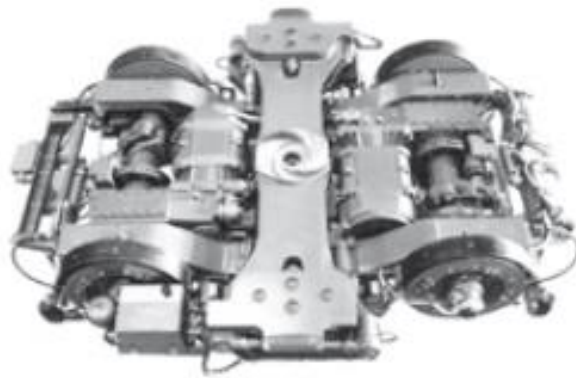
V roce 2016 si německý dopravce AVG přiojednal dalších 12 vozidel za cenu 59,5 milionu eur. Vozidla splňují podmínky provozu dle norem BOStrab pro tramvaje a EBO pro železnice. Jedná se opět o tříčlánková vozidla stejné délky i kapacity. Vozidla jsou koncipována jako středněpodlažní kvůli železniční infrastruktuře. Při jízdě po železnici je nástup bezbariérový, nicméně ve městě je nutné využít výsuvné schody. Vozidla jsou plně klimatizována, vybavena prostorem pro kočárky, invalidní vozíky a zavazadla, dále také toaletou. Maximální rychlost je omezena na 100 km/h. Vozidla byla vyrobena ve stejných

závodech jako ta starší, jsou s nimi prakticky identická. Technické parametry tohoto vozidla se nachází v Tab. 1.7. [15]

*Tab. 1.7: Technické parametry vozidla Bombardier Flexity Swift [17]*

vozidlo	Bombardier Flexity Swift
region	Karlsruhe, Německo
provozovatel	Albtal-Verkehrs-Gesellschaft (AVG)
počet vozů	42
uvedení do provozu	2011-2013, 2016
počet článků	3
rozchod	1 435 mm
podvozek	Bo'2'2'Bo'
počet hnaných podvozků	2 ze 4
pohon	750 V DC + 15 kV AC
výkon trakčních motorů	4x 150 kW
délka	37 030 mm
šířka	2 650 mm
výška	4 000 mm
nástupní výška	580 mm
výška podlahy	646 mm a 889 mm
hmotnost	62,5 t
max. nápravová hmotnost	11,5 t
min. poloměr směr. trať. oblouku	23 m
max. sklon	60 ‰
počet míst k sezení	84 + 9 výklopných
počet míst k stání [4 os./m <sup>2</sup> ]	151
celková kapacita [4 os./m <sup>2</sup> ]	235
průměr kol nové/opotřebované	740 mm / 672 mm
maximální rychlost	100 km/h
dveře	4 dvojité na obou stranách

Vozidla Flexity Swift používají podvozky FLEXX Urban 2500, viz Obr. 1.16. Podvozky FLEXX Urban zajišťují snadný nástup do vozidel díky své kompatibilitě s nízkou podlahou. Pozornost je také věnována aspektům údržby, jako jsou minimální opotřebení kolejnic a kol. Podvozky jsou integrovány do vozidla tak, aby se minimalizoval hluk a vibrace do okolí. Používají se pro tramvaje a lehká kolejová vozidla, od 100% nízkopodlažních městských tramvají po lehká kolejová vozidla, a to jak pro úzký, tak pro standardní rozchod. Podvozky mohou být vyrobeny se standardní nápravou i s technologií nezávislých kol, s vinutými pružinami, hydraulickým nebo pneumatickým odpružením. [16]



*Obr. 1.16: Podvozek FLEXX Urban 2500 vozidla Bombardier Flexity Swift [18]*

Podvozky FLEXX Urban 2500 se standardně používají pro vysokopodlažní nebo 70% nízkopodlažní vysokokapacitní tramvaje. Tento typ podvozku umožňuje 70% nízkopodlažnost v kombinaci s jednoduchostí a robustností technologie standardní nápravy. Malý rozvor podvozku umožňuje plynulý průjezd zatáčkami, což má za následek minimální opotřebení kol. Elastomerové primární odpružení, pružná kola a plně odpružený systém pohonu vedou ke snížení hluku a vibrací. [16]

V provozu je přes 1 000 těchto podvozků od roku 1995, například ve Švédsku, Německu, USA či Nizozemsku. Parametry podvozku obsahuje Tab. 1.8. [16]

Tab. 1.8: Technické parametry podvozku FLEXX Urban 2500 vozidla Bombardier Flexity Swift [18]

podvozek	FLEXX Urban 2500
maximální rychlost	100 km/h
rozchod	1 435 mm
typ podvozku	motorový i standardní
max. nápravová hmotnost	11,5 t
hmotnost motorový/standardní	4,8 t / 3,2 t
rozvor náprav	1 800 mm
průměr kola	(630 ÷ 700) mm
výkon dvojkolí	2x (120 ÷ 140) kW
reference	Kolín, Stockholm, Minneapolis, Haag, ...



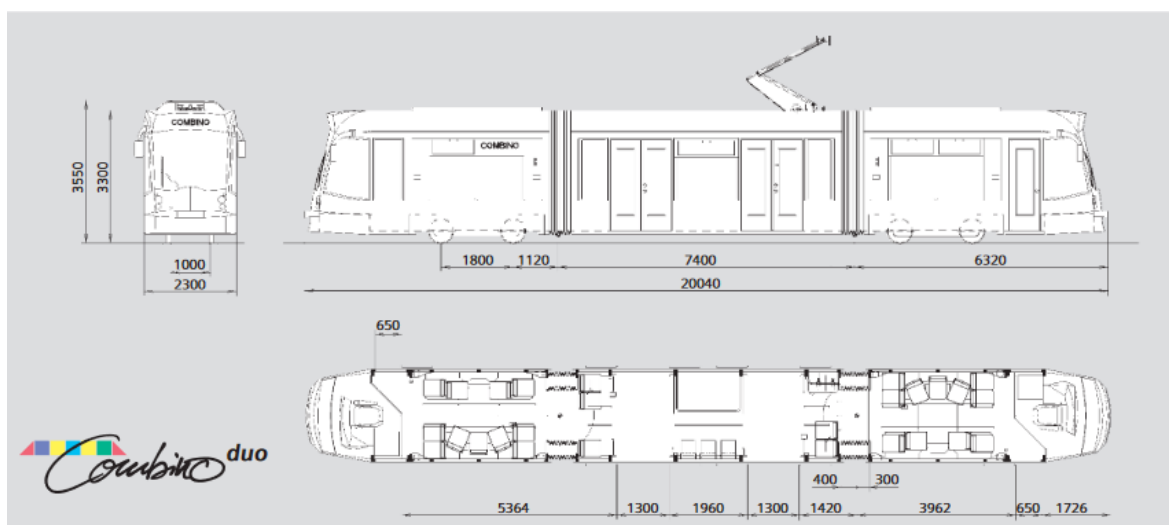
## 1.5 Siemens Combino Duo

Siemens Combino Duo je speciálně upravená tramvaj Combino, která je v provozu v německém Nordhausenu, viz Obr. 1.17. Vznikla kvůli snaze o propojení harzské úzkokolejky s tramvajovou tratí. Podmínky pro propojení byly příznivé, jelikož obě trati mají úzký rozchod 1 000 mm a tramvajová zastávka je od místního nádraží vzdálena pouze 50 m. Železniční trať není elektrifikovaná, a proto bylo nutné tramvaj vybavit alternativním pohonem. Po rozsáhlém testování byly započaty stavební úpravy k propojení obou zastávek. [17]



*Obr. 1.17: Siemens Combino Duo na lince 10 v německém Nordhausenu [19]*

Objednána byly tři obousměrná vozidla Combino, do kterých byla instalována ultrakompaktní pohonná jednotka, jež byla vyvinuta a připravena pro sériovou výrobu. Jedná se o vznětový motor BMW, ke kterému je připojen generátor. Tato jednotka, instalovaná ve velmi stísněném prostoru, vyrábí elektřinu pro trakční motory a pomocné jednotky vozidla. Motor byl umístěn ve středním článku vozidla mezi dveřmi a snížil kapacitu na 27 míst k sezení a 68 k stání. Typový výkres vozidla lze prohlédnout na Obr. 1.18. [17]



*Obr. 1.18: Typový výkres vozidla Siemens Combino Duo [20]*

Poprvé Combino Duo vyjelo 1. května 2004 a od té doby se provozuje v rámci linky 10 z nemocnice Südharzklinikum přes nádraží Nordhausen do nemocnice Neanderklinik v Ilfeldu. Linka je dlouhá přes 10 km. Každý rok ujedou vozy 105 000 km na úzkorozchodných železnicích v Harzu. Pro novou generaci hybridních tramvají nejspíše nebude použit spalovací motor, nicméně v roce 2021 byl prodloužen provoz vozidel Combino Duo o dalších 10 let. Technické specifikace vozidla se nachází v Tab. 1.9. [17]

*Tab. 1.9: Technické parametry vozidla Siemens Combino Duo [20; 21; 22]*

vozidlo	Siemens Combino Duo
region	Nordhausen, Německo
provozovatel	Stadtwerke Nordhausen
počet vozů	3
uvedení do provozu	květen 2004
počet článků	3
rozchod	1 000 mm
podvozek	Bo'Bo'
počet hnaných podvozků	2 ze 2
pohon	750/600 V + diesel-elektrický agregát
výkon trakčních motorů	4x 100 kW + 180 kW
délka	20 048 mm
šířka	2 300 mm

výška	3 510 mm
výška podlahy	300 mm
podíl nízkopodlažní části	100 %
hmotnost	25 t
hmotnost plně obsazeného vozu	34 t
max. nápravová hmotnost	9,5 t
min. poloměr směr. trať. oblouku	15 m
max. sklon	93 ‰
počet míst k sezení	27
počet míst k stání [4 os./m <sup>2</sup> ]	68
celková kapacita [4 os./m <sup>2</sup> ]	95
průměr kol	600 mm
maximální rychlost	70 km/h
diesellový agregát	osmiválec s přímým vstřikováním BMW M67D40
výkon agregátu	180 kW při 4000 ot/min
objem agregátu	3,9 l
točivý moment agregátu	560 Nm
hmotnost agregátu	280 kg
objem nádrže	160 l
dojezd	200 km (bez připojení k vedení)
hmotnost hnacího ústrojí	1,2 t
emisní norma	EURO 3

Vozidlo Combino Duo používá podvozek SF 30 C TFW pro nízkopodlažní tramvaje, viz Obr. 1.19. Navržen byl v roce 1996 a vyrábí se od roku 1998. Umožňuje výšku podlahy 350 mm podél celého vozu. Tyto podvozky jsou vysoce modulární a jsou dostupné v metrovém a standardním rozchodu. [13]

Podvozek je vybaven zcela odpruženým trakčním pohonem s asynchronními třífázovými motory s vlastní ventilací. Hnací ústrojí je umístěno do boku podvozku tak, aby byly snadno přístupné všechny hlavní trakční a brzdné komponenty. Díky tomu je skoro

veškerá údržba možná bez nutnosti využití depa. Celé ústrojí může být jednoduše vyjmuto a instalováno bez zvednutí vozidla či vymontování podvozku. [13]



*Obr. 1.19: Podvozek SF 30 C TFW vozidla Siemens Combino Duo [14]*

Přenos točivého momentu z trakčního motoru na přední a zadní kola je realizován pomocí kuželového převodu s nízkou hlučností a dvou kardanových hřídelí, které jsou uspořádány v různých výškách. Primární odpružení obsahuje rotačně symetrické pryžo-kovové pružiny s dobrými samočinnými vlastnosti, jež zajišťují podélně a příčně pružné vedení dvojkolí. [13]

Sekundární odpružení je sestaveno z ocelových vinutých pružin v kombinaci s přídatnými pryžovými pružinami zajišťujícími progresivní pružné vlastnosti pro komfortní jízdu při jakémkoli zatížení. Vertikální a boční pohyb je tlumen hydraulicky. [13]

Průměr kola má velikost 600 mm nový a 520 mm opotřebovaný pro oba dostupné rozchody. Pro tlumení skřípění kol lze instalovat tlumič hluku. Rám podvozku má tvar H a je složen z plátů, odlitků a kovaných dílů. Dohledatelné parametry jsou vypsány v Tab. 1.10. [13]

Tab. 1.10: Technické parametry podvozku SF 30 C TFW vozidla Siemens Combino Duo [14]

podvozek	SF 30 C TFW
provozní rychlost	70 km/h
rozchod	1 000 mm / 1 435 mm
typ podvozku	motorový
max. nápravová hmotnost	2 x 10 t
hmotnost	(4,3 ÷ 4,5) t
rozvor náprav	1 800 mm
průměr kola nové / opotřebované	600 mm / 520 mm
výkon dvojkolí	2 x 100 kW
min. poloměr směr. trať. oblouku	15 m

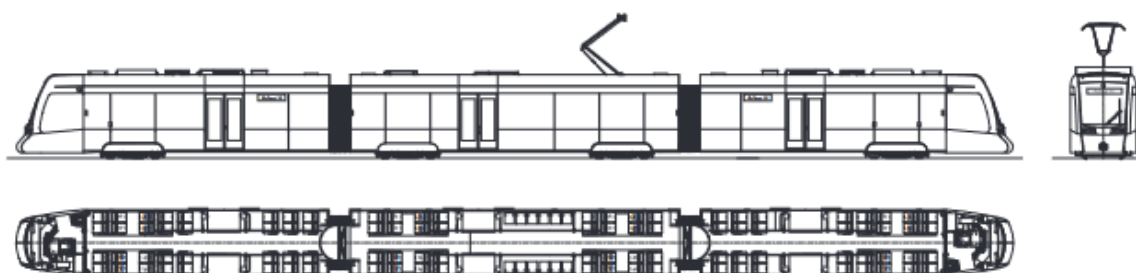
## 1.6 Stadler Tango-type Tram - Train

Stadler Tango-type Tram - Train je v provozu v dánském městě Aarhus. Pro zdejší provoz bylo vyrobeno celkem 24 vozidel, z toho 12 nízkopodlažních lehkých kolejových vozidel Tango a 12 nízkopodlažních tramvají Variobahn. Stadler Tango jsou moderní, 100% nízkopodlažní vozidla s modulárním designem, viz Obr. 1.20. Díky nízkému uložení podvozku a vnějšímu uspořádání pohonu bylo možné zkonstruovat tento Tram - Train jako 100% nízkopodlažní vozidlo se všemi podvozky otočnými. Celková konstrukce vozidla řeší náročné traťové podmínky, které se vyskytují v dopravě v historických centrech měst v kombinaci s hustou vnitroměstskou dopravou. Vozidlo dosahuje maximální rychlosti 100 km/h. [18]



*Obr. 1.20: Stadler Tango-type Tram - Train [23]*

Vozidla Tango jsou obousměrná. Nabízí světlý, komfortní interiér pro cestující s možností individuálního uspořádání. Vozidla jsou plně klimatizována, včetně kabiny pro řidiče. Mezi jednotlivými články se přechází prostorným kloubovým přechodem. Jelikož je vozidlo nízkopodlažní, tak umožňuje přístup osobám s omezenou pohyblivostí. Motorové i standardní podvozky obsahují pneumatické odpružení. Mezi další prvky výbavy patří výborná tepelná a zvuková izolace. Kabina řidiče je ergonomicky navržena. Typový výkres tohoto vozidla se nachází na Obr. 1.21. [18]



*Obr. 1.21: Typový výkres vozidla Stadler Tango-type Tram - Train [23]*

Technické parametry vozidla Stadler Tango-type Tram - Train jsou vypsány v Tab. 1.11.

*Tab. 1.11: Technické parametry vozidla Stadler Tango-type Tram - Train [23]*

vozidlo	Stadler Tango-type Tram - Train
region	Aarhus, Dánsko
provozovatel	Aarhus Letbane I/S
počet vozů	12
uvedení do provozu	2017
počet článků	3
rozchod	1 435 mm
pohon	750 V DC
výkon trakčních motorů	4x 110 kW
délka	39 987 mm
šířka	2 650 mm
výška	3 650 mm
výška podlahy	390 mm
hmotnost	50 t
min. poloměr směr. trať. oblouku	25 m
počet míst k sezení	96 + 12 výklopných
počet míst k stání [4 os./m <sup>2</sup> ]	148
celková kapacita [4 os./m <sup>2</sup> ]	244
průměr kol nové / opotřebované	650 mm / 590 mm
maximální rychlost	100 km/h
dveře	3 na každé straně

## 1.7 Škoda ForCity Smart 36T

Na veletrhu InnoTrans bylo v roce 2022 představeno plzeňskou společností Škoda Group vozidlo s označením Škoda ForCity Smart 36T. Vznikla ve spolupráci Škody a její finské dceřiné firmy Škoda Transtech. Jedná se o první lehké kolejové vozidlo plzeňského výrobce. Toto vozidlo vzniklo na zakázku pro německou dopravní společnost Rhein Neckar Verkehr (RNV), jež zajišťuje městskou hromadnou dopravu ve městech Mannheim, Heidelberg, Ludwigshafen a regionální linky mezi těmito městy. Ve městech bude jezdit toto vozidlo jako tramvaj, mezi nimi jako Tram - Train. Tato města se nachází ve třech různých spolkových státech Německa, jedná se Bádensko-Württembersko, Hesensko a Porýní-Falc. Vizualizace vozidla je na Obr. 1.22. [19; 20; 21]

Celkově bude vyrobeno 80 vozidel v hodnotě 7 miliard korun, z toho bude 31 vozidel 36T, 37 vozidel 37T a 12 kusů 38T. Součástí kontraktu je i opce na dalších 34 vozidel. Model Škoda ForCity Smart 38T se stane se svou délkou necelých 60 metrů nejdelší tramvají na světě. Tato tramvaj bude tak dlouhá, že se nevejde do klasického depa. Jednotlivé články proto bude možné rozpojit a pro pojiždění v nízkých rychlostech bude sloužit minimalistický ovládací panel ukrytý ve spojích. [19; 20; 21]



*Obr. 1.22: Škoda ForCity Smart 36T [26]*

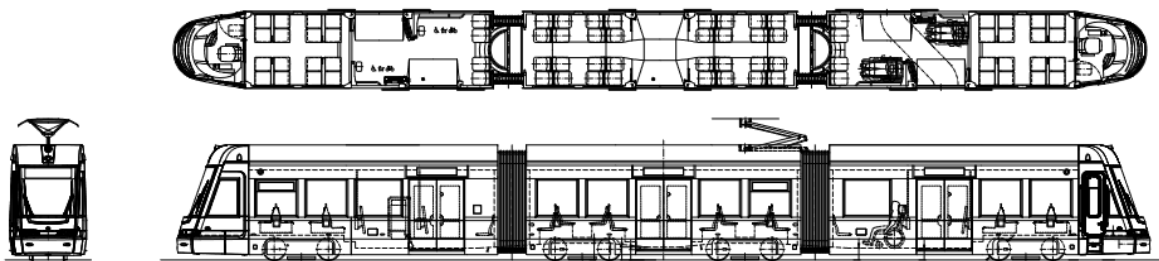
Vozidla by měla vydržet 36 let provozu a měla by být vysoce modulární. Například 60m tramvaj by mělo být možné rozdělit do dvou polovičních, pokud by to bylo nutné. Vozidla budou velmi dobře ovladatelná v zatáčkách, budou tichá a jsou navržena tak, aby docházelo k nízkému opotřebení kol a kolejí. Během údržby je možné se pohybovat po střeše vozidla,



což zajistí dobrý přístup k jednotlivým částem výzbroje. Ty jsou snadně vyměnitelné díky dobře promyšlenému designu vozidla. [22]

Celkem 5 vozidel 36T je vybaveno pro provoz bez trolejového vedení na 1,5 km dlouhém úseku, jenž vede kolem nemocnice v Heidelbergu. Všechna vozidla mohou v případě nouze a pro posun v depu ujet až 800 metrů bez trolejového vedení. Jsou navržena tak, aby bylo možné instalovat kompletní modulární akumulátorovou soupravu pro delší provoz bez trakčního vedení. [23]

Vozidla budou nízkopodlažní a obousměrná, všechny podvozky budou otočné. Vstup bude nízkopodlažní, ve vozidle se bude nacházet bezbariérový prostor pro osoby s omezenou schopností pohybu a pro dětské kočárky. Dvoukřídlé dveře zajistí rychlou výměnu cestujících na zastávkách, a tím docílí vyšší efektivity dopravy. Výbava bude zahrnovat nejnovější informační systémy a kamerový systém, nebude také chybět klimatizace, která má zajistit pohodlí pro cestující až do 50 °C. Model 36T má tři poháněné podvozky, při brzdění nabídne 100% rekuperaci do baterií. Typový výkres je na Obr. 1.23. [19; 20; 21]



*Obr. 1.23: Typový výkres vozidla Škoda ForCity Smart 36T [25]*

Promyšlený design vozidla zahrnuje také sedadla, která jsou mezi sebou vzájemně posunuta tak, aby jednotlivým cestujícím nabízela více prostoru pro ramena. LED osvětlení uvnitř vozidel se automaticky seřizuje podle denního světla. Vozidla by také měla obsahovat prvky, které budou monitorovat výzbroj v reálném čase, z důvodu efektivního plánování údržby. [22]

Technické parametry všech tří modelů jsou vypsány v Tab. 1.12.

Tab. 1.12: Technické parametry tramvají Škoda ForCity Smart [24; 26]

vozidlo	Škoda ForCity Smart		
region	Mannheim, Heidelberg a Ludwigshafen, Německo		
provozovatel	Rhein Neckar Verkehr (RNV)		
model	36T	37T	38T
počet vozů	31	37	12
počet článků	3	4	6
rozchod	1 000 mm		
počet podvozků	4	6	8
pohon	750 V DC		
výkon trakčních motorů	680 kW	1 020 kW	1 360 kW
délka	30 500 mm	40 650 mm	58 690 mm
šířka	2 400 mm		
výška	3 600 mm		
min. poloměr směr. trať. oblouku	15 m		
max. sklon	60 ‰		
počet míst k sezení	72	104	144 + 12 sklopitelných
počet míst k stání [4 os./m <sup>2</sup> ]	106	140	224
celková kapacita [4 os./m <sup>2</sup> ]	178	244	368
průměr kol nové / opotřebované	680 mm / 600 mm		
max. rychlost	80 km/h		
dveře	3 dvojitě na obou stranách	4 dvojitě na obou stranách	6 dvojitých na obou stranách
rozměr dveří	1 500 mm x 2 000 mm		
pantografy	1	2	2

## 1.8 Tram - Train v Pražské integrované dopravě

Nasazení vozidel Tram - Train, které by zajistilo přímé spojení tramvajových tratí na okraji Prahy a regionálních železničních tratí by mohlo přinést velké zlepšení dopravní situace pro Prahu a Středočeský kraj. Tramvajové tratě v Praze se komplexně opravují včetně výměny kolejnic a díky tomu se již na mnoha tratích využívá stejného typu kolejnice jako na železnici, včetně trati do Řep. Své uplatnění by tak mohla tato specifická vozidla najít například pokud by se propojila konečná tramvaj Sídliště Řepy s železniční tratí do Rudné u Prahy nebo tramvajová zastávka Nádraží Modřany s tratí do Vraného nad Vltavou. [1]

### 1.8.1 Trasa Praha – Brandýs nad Labem – Stará Boleslav

Tato trasa byla navržena před více než 100 lety Františkem Křížíkem. Potřeba by byla vybudovat nová trať odbočující ze stávající železniční tratě Praha – Neratovice. Pokud by zde jezdil Tram - Train, zajistil by také vnitroměstskou obsluhu v rámci souměstí Brandýs nad Labem a Stará Boleslav. Výstavba trati by byla rozdělena do dvou etap. V rámci první etapy by byla realizována trať od odbočky za stanicí za stanicí Praha – Kbely z trati 070 na začátek města Brandýs nad Labem. Druhou etapou by bylo pokračování přes centrum města Brandýs nad Labem – Stará Boleslav jakožto normální tramvaje s následným vyústěním na železniční stanici stejného názvu na trati číslo 074. Délka nově vybudované trasy z Kbel na hlavní nádraží Staré Boleslavi by činila 14 km, znázorněna je v příloze A. Tram - Train by zajistil rychlé a přímé spojení nejen pro Brandýs a Starou Boleslav, ale také pro Prahu Vinoř a středočeské obce Přezletice, Podolanka, Dřevčice a Popovice. Napojení na tramvajovou síť by mohlo být realizováno na vlakové stanici Praha – Masarykovo nádraží nebo Praha – Vysočany, kde by vozidlo mohlo pokračovat až do centra Prahy. [1]

### 1.8.2 Trasa Praha, Kobylisy – Odolena Voda/Neratovice/Mělník

Tento projekt by propojil konečnou stanici tramvaje Vozovna Kobylisy s regionální železniční tratí 092 Kralupy nad Vltavou – Neratovice. V Praze by Tram - Train obsluhoval Dolní Chabry. Dále by pokračoval přes obec Zdiby a dále podél silnice 608 přes Klíčany na letiště Vodochody. Poté z letiště Vodochody přes město Odolena Voda až k trati 092, pomocí které by se dostal až do Neratovic. Odtud by se pokračovalo přes Všetaty přímo do Mělníka. Po výše zmíněné trati 092 jezdí linka PID S 43, jejíž celoroční interval se pohybuje mezi 1 až 3 hodinami. Potenciál trati tedy není dostatečně využit. Díky propojení vozidlem Tram - Train by tak mohla být tato železniční trať využívána během pracovního dne několikrát do hodiny, čímž by mohla být zachráněna před zrušením kvůli nedostatečné efektivitě. [1]

Vzhledem k tomu, že pravděpodobně vznikne mezinárodní letiště Vodochody a Odolena Voda a okolí plánované trati patří k hustěji osídleným oblastem, je vhodné zavést

do oblasti mezi Kobylisami a Neratovicemi kapacitní kolejovou dopravu. Kompletní trasu z Vozovny Kobylisy do Neratovic je možné prohlédnout v příloze B. [1]

### 1.8.3 Trasa Praha, Hlubočepy – Rudná a Beroun;

#### Trasa Praha, Sídliště Řepy – Hostivice – Chýně – (Rudná)

Na tomto projektu jsou nutné poměrně malé stavební práce na propojovacích kolejích. První propojka na železnici by se nacházela na zastávce Hlubočepy, dlouhá by byla přibližně 60 metrů a zajistila by možnost přiblížení vozidel Tram - Train blíže městům Rudná a Beroun. Druhá propojka o délce necelých 90 metrů by byla vybudována na tramvajové zastávce Sídliště Řepy a zajistila by přímé spojení do Hostivice a dále na Chýni a Rudnou nebo západním směrem do Kladna. [1]

Z důvodu vysoké hustoty obyvatelstva v této oblasti je nutná okamžitá elektrifikace těchto tratí tak, aby zde mohla tato vozidla jezdit co nejdříve. Například v Rudné či Hostivicích by mohly být tratě vedeny přes střed města tak, aby obsloužily co nejvíce obyvatel. Zároveň by došlo k snížení hlukové a emisní zátěže způsobované autobusy. [1]

Vhodné by bylo také zvážit, jestli by neměly být obdobné přeložky blíže k obyvatelům uskutečněny například i v Jinočanech či Chýni. Provoz vozidel Tram - Train se neodlišuje od provozu tramvají v hl. m. Praze, vedením tramvaje skrz centrum města nejen pomáhá jeho atraktivitě ale také významnému ekonomickému růstu. Části trati vhodné k vybudování jsou zakresleny v příloze C. [1]

### 1.8.4 Trasa Praha, Modřany – Vrané nad Vltavou – Dobříš

Na této trase si nechá Středočeský kraj zpracovat technickou studii potenciálu u Technické univerzity v Dráždanech. Jednou z možností by byla proměna dráhy pro vozidla Tram - Train. Zadání studie bylo schváleno v lednu 2023 za cenu 250 tisíc korun a měla by navázat na dřívější analýzy Integrované dopravy Středočeského kraje (IDSK). Potenciál by trať získala díky napojení do hlavního města, nicméně nutné by byly technické a provozní změny, jež by přinesly výrazné zkrácení stávajících cestovních dob. Tyto doby v současnosti nemohou konkurovat autobusové dopravě, která využívá i dálniční síť. [24]

## 1.9 Porovnání vozidel Tram - Train

Tab. 1.13 níže porovnává požadavky pro provoz vozidel na železničních a tramvajových tratích. Vozidlo Tram - Train je většinou koncipováno jako částečně nízkopodlažní tramvaj s různým stupněm úprav. Oproti klasické tramvaji musí mít toto vozidlo pevnější skříň a čelo (kategorie P III), vlakový zabezpečovač, pojezd, pohon, brzdy a protihluková opatření na vyšší rychlost. Vozidlo není většinou napájeno pouze stejnosměrným napětím, ale i střídavým či potřebuje na neelektrifikované železniční tratě spalovací motory nebo bateriové systémy, tudíž bude oproti klasické tramvaji těžší. Limitním se pro něj tedy stává maximální nápravová hmotnost pro tramvaje. [25]

Tab. 1.13: Odlišnosti tramvajové a železniční infrastruktury [30]

parametr	tramvaj	železnice
rozchod	1 435 mm	1 435 mm
max. sklon	80 ‰	25 ‰
min. poloměr oblouku	18 m	180 m
kolejnice	žlábkové	šírokopatní
výhybky	bez přídržnic	s přídržnicemi
konečné	se smyčkami	bez smyček
nástupiště	po jedné straně	po obou stranách
výška nástupiště	180 mm	550 mm
napájení	600 V (750 V)	3, 15, 25 kV
maximální rychlost	50 km/h	(100 ÷ 160) km/h
zabezpečení	na dohled	zabezpečovací zařízení
max. nápravová hmotnost	(8 ÷ 11) t	22 t

Na většině území ČR je využíván standardní rozchod 1 435 mm, a to pro tramvaje i železnici. Posledním městem, kde jezdily úzkorozchodné tramvaje byl Liberec, místní rozchod činil 1 000 mm. Od 19. července 2021 zde probíhá takzvané přerozchodování na standardní rozchod, úprava kolejí by měla trvat rok a půl. [26]

Na jihu Čech se nachází úzkorozchodná trať z Jindřichova Hradce do Obrataně a Bystřice. Od 3. 10. 2022 byl provoz přerušen na dobu neurčitou a pravděpodobně se již neobnoví. Posledním místem, kde je úzkorozchodná trať ještě v provozu, je severovýchod ČR, konkrétně mezi obcemi Třemešná a Osoblaha. Tyto úzkorozchodné tratě mají rozchod

760 mm. Dále jsou normalizovány rozchody 600, 760, 900 a 1 000 mm pro důlní, průmyslové, polní a lesní využití. [27]

Tabulka 1.14 slouží k porovnání důležitých technických parametrů vozidel Tram - Train. Následně bude použita k výběru vozidla schopného provozu v České republice.

Tab. 1.14: Porovnání technických parametrů vozidel Tram - Train

vozidlo	Stadler Citylink Tram - Train	Alstom Regio Citadis	Siemens Avanto Tram - Train	Bombardier Flexity Link	Siemens Combino Duo	Stadler Tango-type Tram - Train	Škoda ForCity Smart 36T
počet článků	3	3	5	3	3	3	3
rozchod	1 000 mm, 1 435 mm	1 435 mm	1 435 mm	1 435 mm	1 000 mm	1 435 mm	1 000 mm
podvozek	Bo'2'2'Bo'	Bo'2'2'Bo'	Bo'2'2'Bo'	Bo'2'2'Bo'	Bo'Bo'	Bo'2'2'Bo'	
	Bo'2'2'Bo'Bo'						
počet hnaných podvozků	2 ze 4, 3 ze 4	2 ze 4	2 ze 4	2 ze 4	2 ze 2	2 ze 4	
pohon	750 V DC + 25 kV AC	750 V DC + 15 kV AC 16 2/3 Hz <sup>e)</sup>	750 V DC + 25 kV AC 50 Hz	750 V DC + 15 kV AC	600 V DC + dieselelektrický agregát	750 V DC	750 V DC + baterie
	600/750 V DC + diesel-elektrické agregáty	750 V DC + diesel-elektrické agregáty <sup>d)</sup>					
	25 kV AC + baterie						
výkon trakčních motorů	6x 145 kW	4x 150 kW <sup>e)</sup>	4 x 130 kW	4x 150 kW	4x 100 kW + 180 kW	4x 110 kW	680 kW
	4x 145 kW + 2x 390 kW	4x 150 kW + 2x 375 kW <sup>d)</sup>					
	4x 150 kW						

délka	37 200 mm	36 762 mm	36 978 mm	37 030 mm	20 048 mm	39 987 mm	30 500 mm
	37 510 mm						
	40 070 mm						
šířka	2 550 mm	2 650 mm	2 650 mm	2 650 mm	2 300 mm	2 650 mm	2 400 mm
	2 650 mm						
výška	3 720 mm	3 650 mm	3 520 mm	4 000 mm	3 510 mm	3 650 mm	3 600 mm
	3 800 mm						
	3 990 mm						
hmotnost	68 t	59,8 t <sup>e)</sup>	59,7 t	62,5 t	25 t	50 t	
		63,4 t <sup>d)</sup>					
hmotnost plně obsazeného vozidla	88,2 t <sup>1)</sup>	82,5 t <sup>e)</sup>	79 t <sup>1)</sup>	81,3 t <sup>1)</sup>	34 t	69,5 t <sup>1)</sup>	
		85,2 t <sup>d)</sup>					
max. nápravová hmotnost	11,5 t <sup>2)</sup>	11 t	10,5 t / 11,5 t	11,5 t	9,5 t	9 t <sup>2)</sup>	
min. poloměr směr. trať. oblouku	22 m	22 m	25 m	23 m	15 m	25 m	15 m
max. sklon	100 ‰		70 ‰	60 ‰	93 ‰		60 ‰
počet míst k sezení	87 ÷ 126	84 + 6 výklopných	80 + 6 výklopných	84 + 9 výklopných	27	96 + 12 výklopných	72



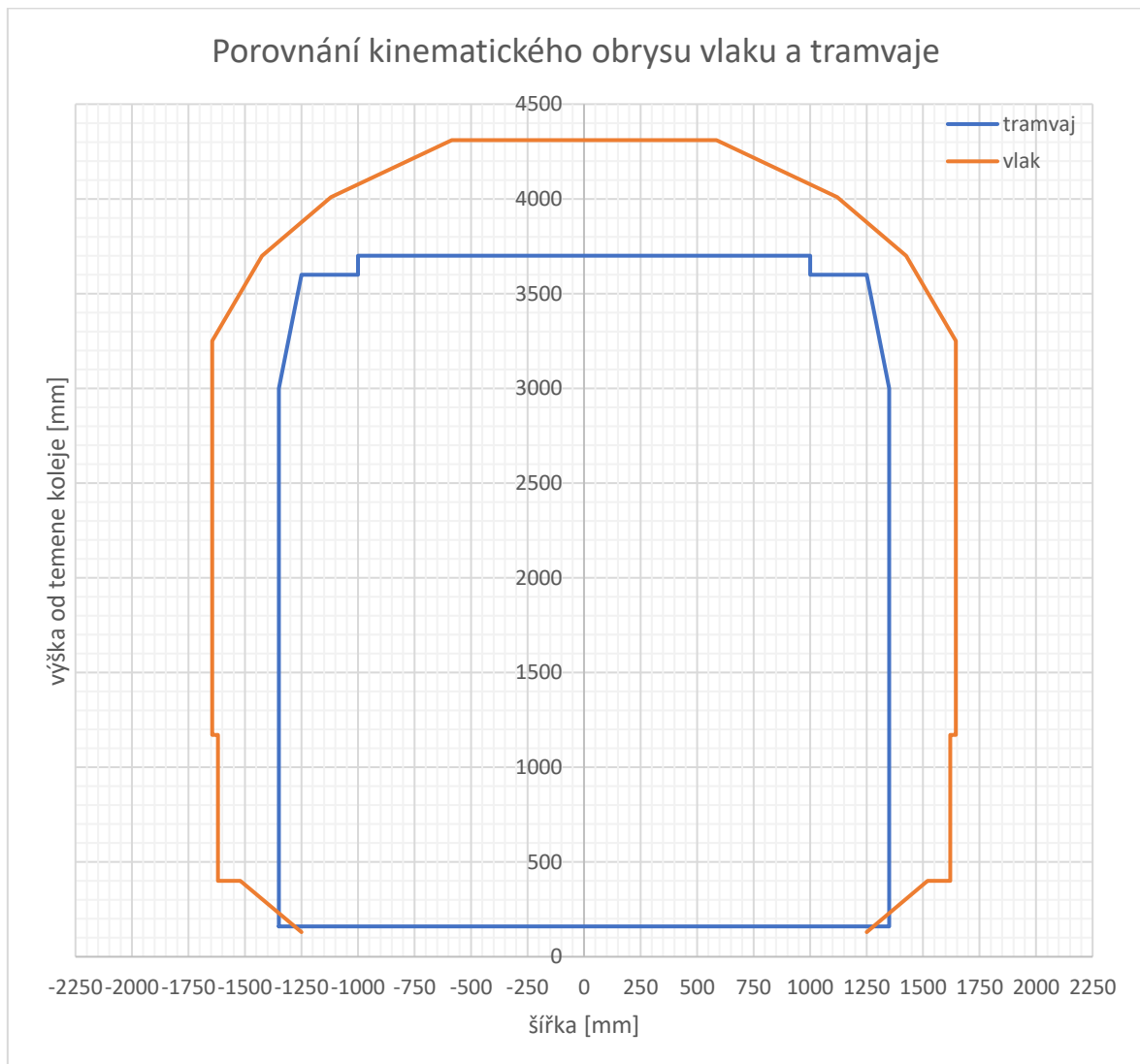
počet míst k stání [4 os./m <sup>2</sup> ]	124 ÷ 141	139 <sup>e)</sup>	162	151	68	148	106
		127 <sup>d)</sup>					
celková kapacita [4 os./m <sup>2</sup> ]	216 ÷ 252	223 <sup>e)</sup>	242	235	95	244	178
		211 <sup>d)</sup>					

U vozidla Alstom Regio Citadis byl použit index e) pro hybridní verzi a index d) pro verzi dvousilovou. Pole s indexem 1) udávají předpokládanou hmotnost plně obsazeného vozidla při naplnění přepravní kapacity. Do výpočtu byla dosazena hmotnost osoby 80 kg. Počet míst k stání byl pro všechna vozidla uveden pro 4 osoby na metr čtvereční. Následně se tato hmotnost podělila počtem náprav vozidla a vznikla tím přibližná maximální nápravová hmotnost. Výpočet byl proveden pro pole označená indexem 2). Pole bez indexu obsahují hodnoty udávané výrobcem.

### 1.10 Vozidlo Tram - Train schopné provozu v České republice

Vozidlo Tram - Train, které by bylo schopné provozu v České republice, se vybere dle Tab. 1.14. Jelikož v ČR probíhá veškerý provoz (kromě výše zmíněné jedné úzkokolejné trati) kolejových vozidel na standardním rozchodu, nelze použít vozidla Siemens Combino Duo a Škoda ForCity Smart 36T, která jsou navržena na rozchod o šířce 1 000 mm. Tento rozchod má také Stadler Citylink Tram - Train provozovaný ve Španělsku.

Zásadním limitním faktorem provozuschopnosti v ČR bude šířka vozidla. Na Obr. 1.24 je zobrazena vztažná linie kinematického obrysu železničního vozidla dle UIC 505. Porovnává se se základní částí obrysu pro odpružené části vozidla dle normy ČSN 28 0318 (Průjezdne průřezy tramvajových tratí a obrysy pro vozidla provozovaná na tramvajových dráhách). Vozidla Tram - Train se musejí vejít do obou těchto obrysů, z obrázku je tedy patrné, že vozidlo musí splnit hlavně kinematický obrys pro průjezd tramvajovou tratí. [28]



Obr. 1.24: Porovnání kinematického obrysu vlaku a tramvaje [33]

Vozidlo Tram - Train tedy může mít na šířku maximálně 2 700 mm, tuto šířku je nicméně nutné zmenšit o příčný posuv a vůle. Při pohybu vozidla po trati se skříň vozidla příčně posouvá vůči svým podvozkům o  $\pm (20 \div 25)$  mm. Mezi rámem podvozku a dvojkolím může být vůle až  $\pm 5$  mm a samotné dvojkolí může mít vůli v koleji  $\pm 20$  mm.

$$2\,700 - 2(25 + 5 + 20) = 2\,600 \text{ mm} \quad (1)$$

Po odečtení vůlí a příčného posuvu může být reálná šířka vozidla maximálně 2 600 mm ve středové rovině podvozku. Ve středové rovině vozidla po započtení jednostranného šířkového zúžení  $E_1$  bývá cca maximálně 2 500 mm.

Všechna vozidla Tram - Train o standardním rozchodu, uvedená v Tab. 1.14, mají šířku 2 650 mm, tedy nejsou schopná v provozu v České republice. Pro porovnání uvádím šířky tramvají provozovaných v Praze: Tatra T3 – 2 500 mm, Škoda 14T a 15T – 2 460 mm.

Závěrem rešeršní části tedy je, že žádné dosud provozované tříčlankové vozidlo typu Tram - Train nevyhovuje provozu v České republice. Pravděpodobně by ovšem bylo možné s menším množstvím úprav navrhnout vozidlo, které by bylo užší a tedy provozuschopné v ČR. Lehká kolejová vozidla se navrhují a vyrábí na zakázku, navíc jsou všechna výše zmíněná vozidla modulární, nemusel by to být tedy velký problém. Větším problémem by mohla být dosud neexistující legislativa.

## 2 Typový výkres vozidla Tram - Train pro ČR

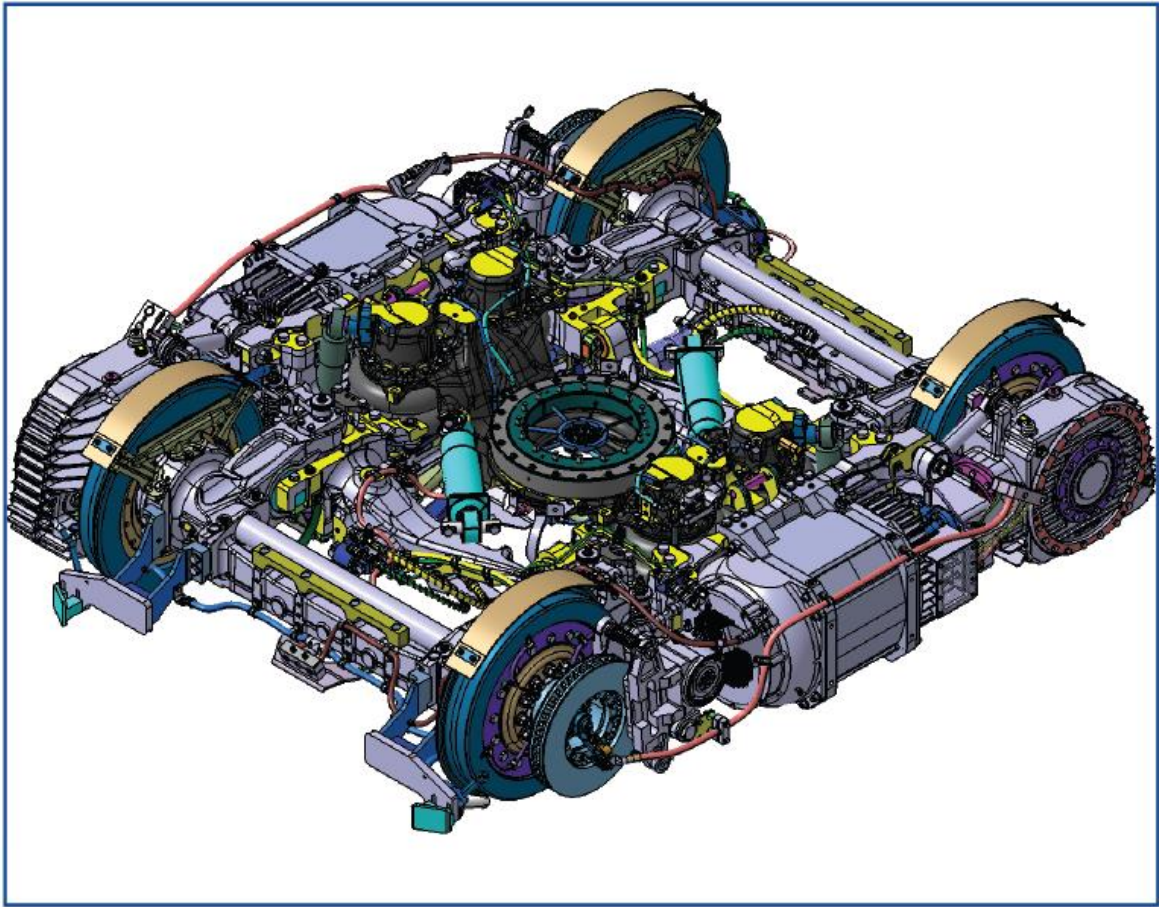
Žádné dosud provozované vozidlo Tram - Train není schopné provozu v České republice, proto je vhodné takové vozidlo navrhnout. Navrhl jsem typový výkres takového vozidla, následně bylo ověřeno, zda navržené rozměry vozidla vyhovují platným normám. Poté byla s pomocí výkresu provedena hmotnostní bilance vozidla, ze které vyplynulo zatížení jednotlivých náprav.

Typový výkres by měl být doplněn výpočty, jež by ověřily, zda by navržené vozidlo bylo opravdu schopné provozu v ČR. K těmto výpočtům byl použit Excelový soubor Výpočet statického obrysu osminápravové tříčlánekové kloubové tramvaje s klouby mezivozových přechodů umístěnými mimo střední podvozky, poskytnutý panem docentem Kolářem. Soubor vychází z platných norem a po doplnění rozměrů navrženého vozidla ověřil, zda vozidlo bez problému dokáže projet oblouky o poloměrech od 18 m do 10 000 m.

### 2.1 Podvozky

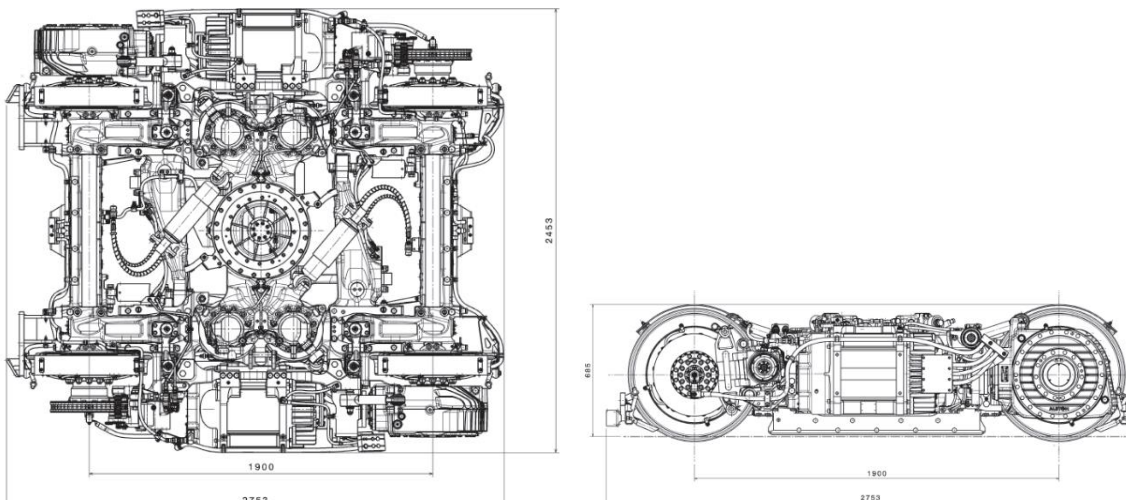
Vozidlo je navrženo tak, aby bylo provozuschopné na již výše popsané trati mezi Prahou a Brandýsem nad Labem/Starou Boleslaví. Provoz v Praze je náročný z toho důvodu, že vozidla musí být schopna projet oblouky o velmi nízkých poloměrech a překonat strmá stoupání. Je tedy vhodné, aby všechny podvozky byly otočné motorové, viz tramvaj Škoda 15T, jež má speciální podvozky s motorem pro každé kolo. Vozidlo je obousměrné, 100% nízkopodlažní a bezbariérové, viz dále.

Zvolen byl podvozek Iponam francouzské společnosti Alstom, který se používá od roku 2018 ve vozidlech Alstom Citadis Spirit v Otavě, viz Obr. 2.1. Podvozek je vybaven vzduchovými vlnovci v rámci sekundárního vypružení, díky čemuž lze regulovat výšku podlahy podle výšky nástupiště a zachovat stejnou výšku při různém zatížení. Další výhodou je, že podlaha může mít nižší výšku nad rovinou temene koleje, než je průměr kola. Výkres tohoto podvozku se nachází na Obr. 2.2, jeho technické parametry v Tab. 2.1. [11]



*Obr. 2.1: 3D model podvozku Alstom Iponam [12]*

Tento podvozek se vyrábí jak motorový otočný, tak standardní otočný i neotočný. V rámci návrhu vozidla Tram - Train se počítá se všemi podvozky motorovými. Podvozek má standardní rozchod 1 435 mm, umožňuje 100% nízkopodlažnost, lze jej používat do -40 °C a je možné nad něj umístit až 16 sedadel pro cestující. [11]



*Obr. 2.2: Výkres podvozku Alstom Iponam [12]*

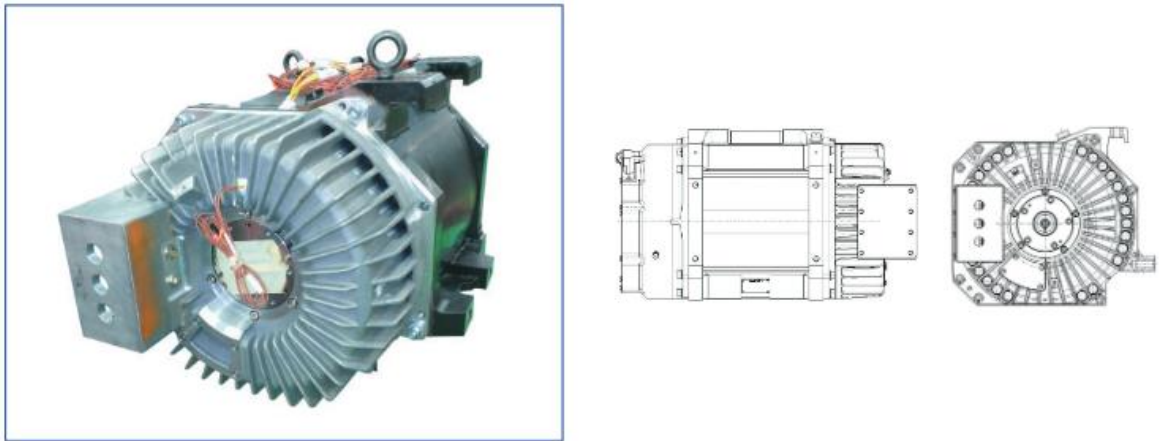
Tab. 2.1: Technické parametry podvozku Alstom Iponam [12]

podvozek	Iponam
provozní rychlost	100 km/h
rozchod	1 435 mm
typ podvozku	motorový otočný / standardní otočný nebo neotočný
max. nápravová hmotnost	13 t
hmotnost motorový/standardní	5,3 t / 3,8 t
typ primárního odpružení	šroubovitě pružiny
typ sekundárního odpružení	pneumatické
typ brzd motorového podvozku	2 hydraulické brzdné jednotky + magnetické kolejnicové brzdy
typ brzd standardního podvozku	4 hydraulické brzdné jednotky + magnetické kolejnicové brzdy
průměr kola nové/opotřebené	640 mm / 570 mm

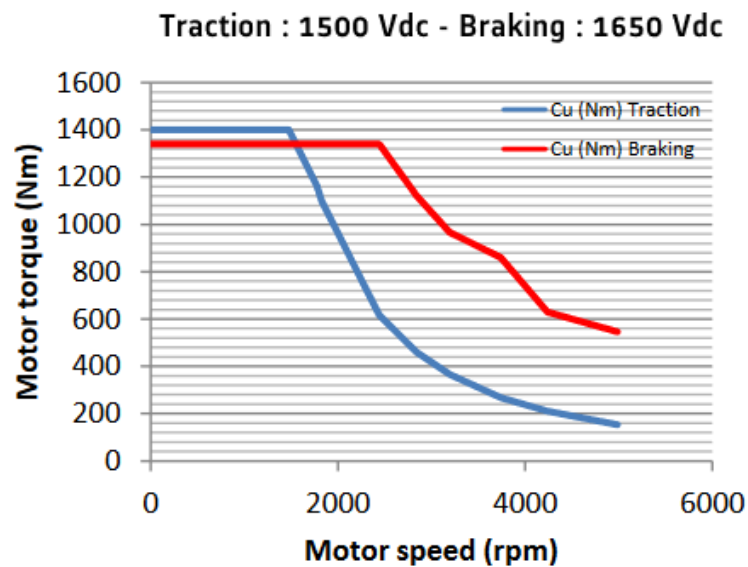
Podvozky Alstom Iponam jsou vybaveny asynchronními motory 4 LMA 1648, které jsou navrženy pro provoz i v extrémních teplotách (-40 ÷ +40) °C. Tyto motory dosahují maximálního výkonu 130 kW při 2 257 ot/min. Detailnější specifikace se nachází v Tab. 2.2, na Obr. 2.3 si lze motor prohlédnout včetně jeho výkresu. Momentová charakteristika je na Obr. 2.4. [29]

Tab. 2.2: Technické parametry motoru 4 LMA 1648 [29]

motor	4 LMA 1648
typ motoru	asynchronní
jmenovitý výkon	130 kW při 2 257 ot/min
jmenovitý točivý moment	550 Nm
max. nápravová hmotnost	13 t
chladicí systém	vlastní chlazení
vnější rozměry: šířka x výška x délka	390 x 431 x 720 [mm]
hmotnost	530 kg



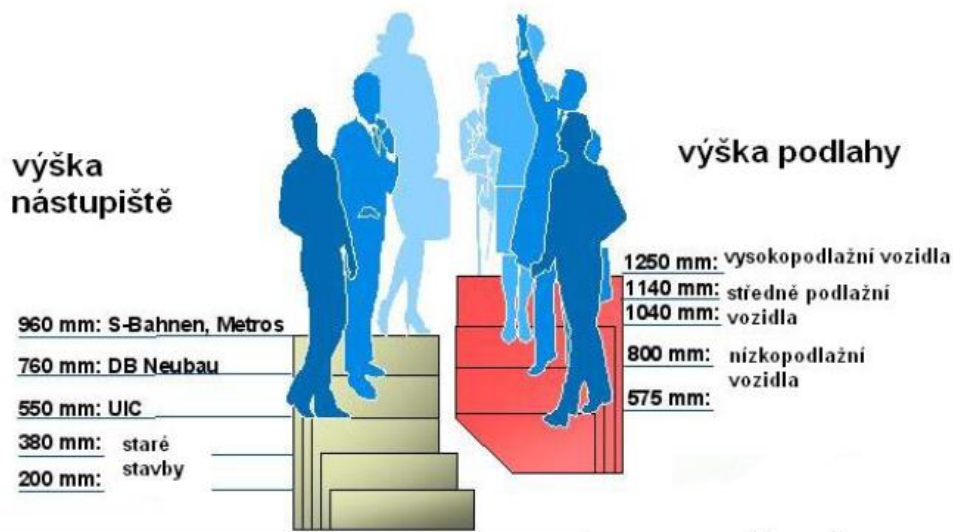
Obr. 2.3: Asynchronní motor Alstom 4 LMA 1648 [29]



Obr. 2.4: Momentová charakteristika motoru 4 LMA 1648 [29]

## 2.2 Nástupní výška vozidla

Vozidlo Tram - Train bude 100% nízkopodlažní po celé své délce, a to jak na části železniční, tak tramvajové. Ve městech mají tramvajové zastávky výšku 200 mm nad temenem koleje, na železnici 550 mm dle normy UIC, viz Obr. 2.3. Aby bylo vozidlo plně nízkopodlažní, je potřeba, aby se adekvátně k výšce nástupiště měnila i nástupní výška do vozidla. Toto je náročný požadavek pro návrh vozidla, proto je vhodné se inspirovat již fungujícími systémy.



*Obr. 2.5: Porovnání výšky nástupiště a výšky podlahy kolejových vozidel [30]*

Vozidla Stadler Citylink Tram - Train z anglického Sheffieldu nejsou 100% nízkopodlažní, ve vnějších člancích mají ode dveří směrem k čelům vozidla jeden schod. Nástupní výška činí 425 mm a výška zastávek by měla být 375 mm, zastávky prošly konstrukčními úpravami, aby požadované výšky dosáhly. Pro překlenutí rozdílů výšek bylo do podvozků instalováno odpružení, které samo nastavuje svou výšku. Vozidla ze Španělského Alicante mají více schodů, pomocí kterých se cestující dostanou také do prostředního článku. Varianta, která bude v provozu ve Walesu jako metro, má nástupní výšku 915 mm. Jelikož se jedná o metro, byly všechny zastávky navrženy na stejnou výšku. [4; 7; 8]

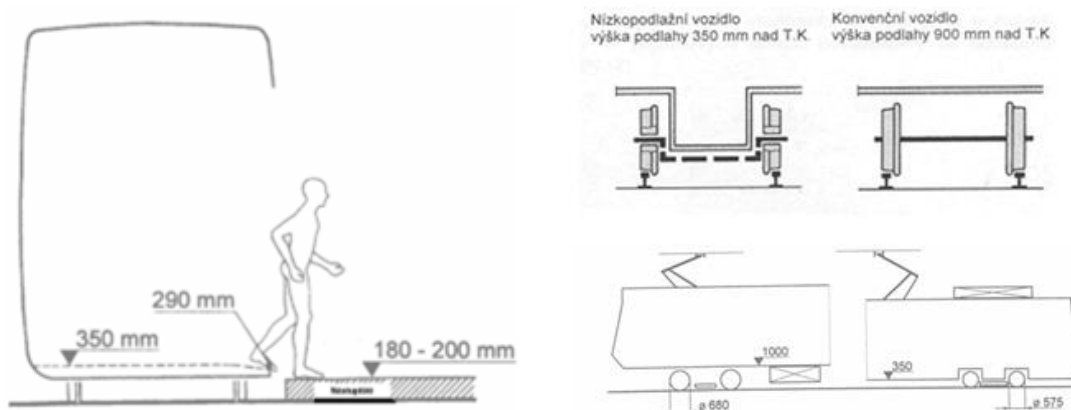
Varianta tohoto vozidla pro Německo a pro Maďarsko řeší rozdílné výšky nástupiště pomocí dveří v různých výškách. Při otevírání dveří se automaticky vysune rampa, která pomáhá překlenout vzdálenost mezi nástupištěm a vozidlem. Tato vozidla jsou 100% nízkopodlažní. [5; 6]

Alstom Regio Citadis není 100% nízkopodlažní, k sedadlům nacházejícím se v krajních člancích se cestující dostanou pomocí schodu. Tato vozidla také využívají výsuvné rampy, které mohou dosáhnout výšky až 360 mm nad temenem koleje. Tamní výška nástupiště se pohybuje kolem 380 mm. [10]

Siemens Avanto Tram - Train také využívá výsuvné rampy. Vozidlo má jeden schod vedoucí k sedadlům v krajních člancích. Nástupiště byla upravena do požadované výšky. Bombardier Flexity Swift je vozidlo nízkopodlažní, ale pouze na železnici. Nástupiště mají výšku 550 mm, nástupní výška činí 580 mm. Na tramvajových částech tratě využívá výsuvné schody. Jeden schod také vede do prostředního článku vozidla a k sedadlům v jeho krajních částech. [12; 13; 15; 30]

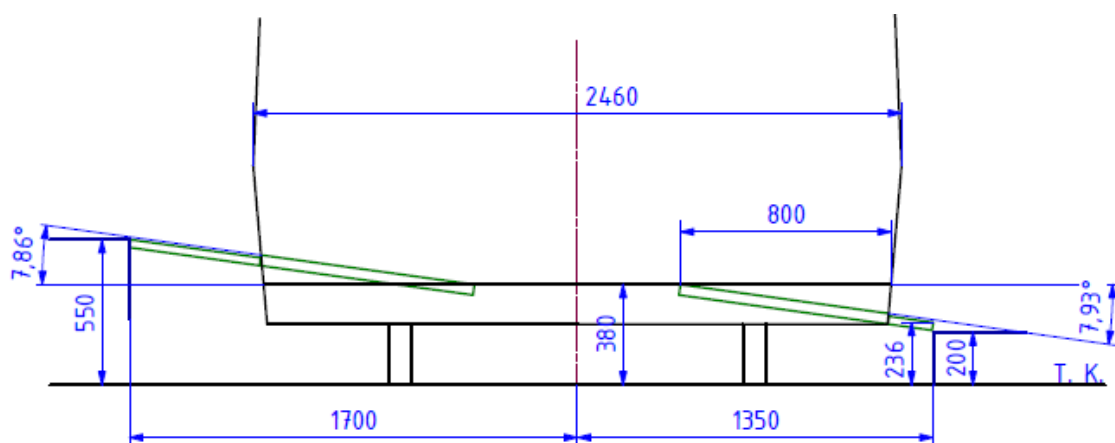


Aby bylo vozidlo 100% nízkopodlažní, je třeba zajistit co nejmenší mezeru mezi nástupní výškou do vozidla a výškou nástupiště. Pro nástupiště ve výšce (180 ÷ 200) mm by měla být nástupní výška maximálně 290 mm, viz Obr. 2.6. Výška průchozí podlahy by se tak měla pohybovat kolem 350 mm nad temenem koleje, je tedy nutné použít speciální podvozky, které umožňují mít podlahu mezi koly nápravy níže, než průměr samotného kola, viz Obr. 2.6.



*Obr. 2.6: Výška podlahy nízkopodlažního vozidla, porovnání nízkopodlažního a vysokopodlažního vozidla [31]*

Ani po celé délce vozidla se nesmí v interiéru nacházet žádný schod. Pro překlenutí výškového rozdílu mezi podlahou vozidla a nástupištěm byly v rámci návrhu vozidla pro ČR použity naklápěcí rampy umístěné zevnitř u všech dveří vozidla. Tyto rampy obsahují výsuvné části, které se na zastávkách vysunou pod stejným úhlem, pod jakým bude skloněna samotná rampa. Podlaha je umístěna ve výšce 380 mm nad temenem koleje a díky skloněným rampám až o  $\pm 8^\circ$ , lze dosáhnout nejnižší nástupní výšky 236 mm a nejvyšší přes 550 mm, viz Obr. 2.7.



*Obr. 2.7: Naklápěcí rampy s výsuvnými částmi pode dveřmi vozidla*

Podlaha je v uličce mezi podvozky ve výšce 450 mm, nad každým podvozkem je umístěno 16 sedadel. Na nižší část podlahy je napojena pomocí ramp, které mají maximální povolený sklon 8 °. Celé vozidlo je tak 100% nízkopodlažní po celé své délce.

### 2.3 Hlavní rozměry vozidla

Navržené vozidlo Tram - Train má maximální šířku 2 460 mm, stejně jako např. tramvaj Škoda 15T. Vozidlo je tak o 190 mm užší než většina aktuálně provozovaných konkurentů v zahraničí (2 650 mm). S touto šířkou bude možný provoz na tramvajových tratích v Praze. Vozidlo je takto široké ve výšce 830 mm nad temenem koleje, což znamená 450 mm nad úrovní podlahy, kde jsou umístěny sedáky všech sedadel. Směrem dolů ke koleji se šířka zužuje pod úhlem 5 ° a směrem nahoru se zužuje pod úhlem 2,5 °.

Navržené vozidlo má celkovou délku 36 812 mm. Podle vyhlášky č. 209/2018 Sb. může mít jízdní souprava tramvajů a kloubové tramvaje včetně spřáhel maximální délku 65 m. Vozidlo je složeno ze dvou identických krajních článků s jedním podvozkem a z vloženého středního článku, jenž je nesen na dvou podvozcích. Krajní článek má délku 12 256 mm, střední 12 300 mm. [25]

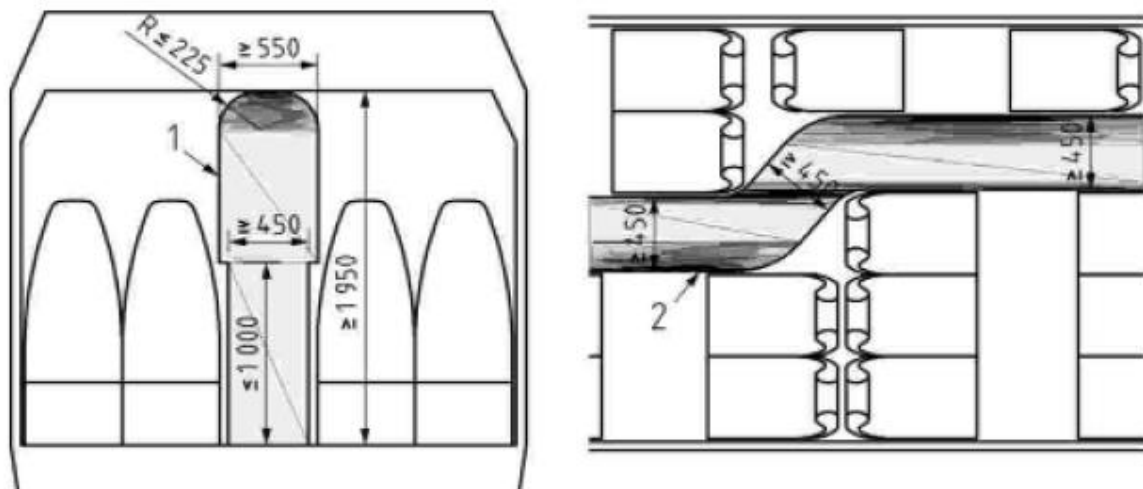
Na výšku vozidlo dosahuje 3 150 mm nad temenem koleje, a to včetně výzbroje mimo pantografů. Vozidlo je vybaveno 2 pantografy nad krajními články. Výška sběru se pohybuje od 3 600 mm do 6 000 mm, což jsou minimální a maximální pracovní polohy dle normy ČSN 28 0337.

Krajní články vozidla jsou totožné, proto budu dále popisovat pouze jeden z nich. Prostřední článek nemá žádné dveře, krajní článek má dvoje dvoukřídlé o šířce 1 500 mm a výšce 2 165 mm. Po otevření dveří má nástupní prostor šířku 1 300 mm. Okna mají rozměr 1 500 mm x 1 030 mm.

### 2.4 Interiér vozidla

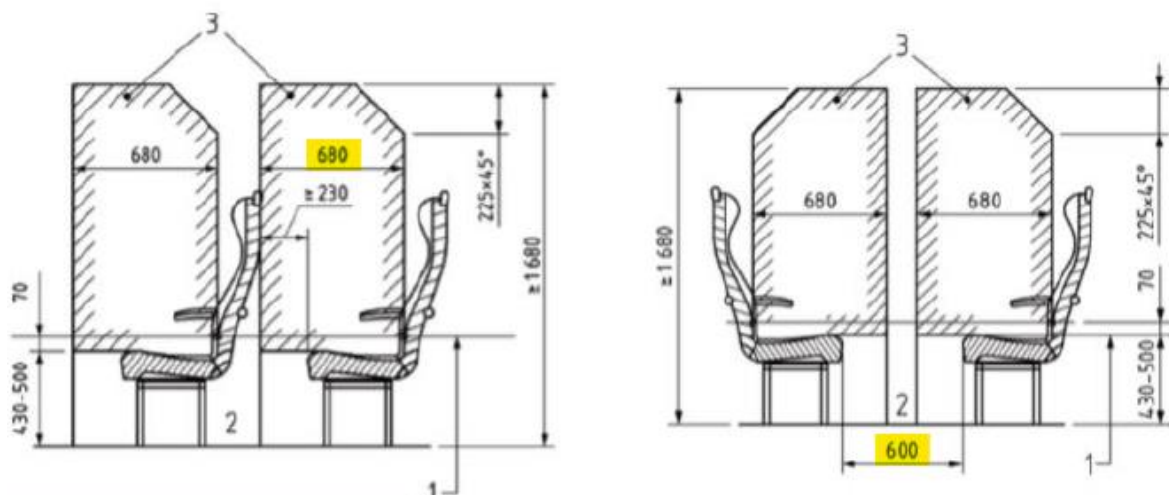
Jak již bylo zmíněno, prostřední článek nemá žádné dveře, a to z toho důvodu, aby se do něj vešlo co nejvíce sedadel. Vozidlo má sloužit primárně pro delší přejezdy mezi městy a proto je vhodné, aby se v něm nacházelo pohodlné místo pro cestující dále ode dveří. Stejný přístup používá například Alstom Regio Citadis.

Ze stejného důvodu nebyla použita běžná tramvajová sedadla, ale větší pohodlnější sedadla pro regionální přepravu Opál od slezské společnosti MSV interiéry, viz výkres na příloze D. Dvojice sedadel má šířku 1 114 mm, pokud by se umístily dvě dvojice vedle sebe, měla by ulička mezi nimi šířku pouze kolem 100 mm. Ve vozidle jsou sedadla umístěna vždy tak, že na jedné straně je dvojice sedadel a druhé straně sedadlo samostatné. Díky tomu má ulička šířku 620 mm, minimální šířka by měla být 450 mm dle přednášek z předmětu Příslušenství kolejových vozidel (dále jen PKV), viz Obr. 2.8. [32; 33]



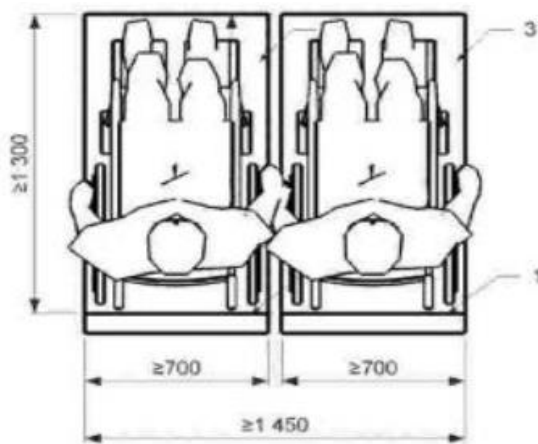
Obr. 2.8: Šířka uličky mezi sedadly [33]

Zákon TSI PRM udává požadavky na prostor, který musí být k dispozici pro osobu sedící na sedadle, viz Obr. 2.9. Z typového výkresu vozidla vyplývá, že navržené vozidlo daný zákon pro všechna sedadla splňuje. Nejužší prostor pro sedící cestující mají sedadla umístěná směrem ke kabinám řidiče, vzdálenost ke stěně kabiny činí 685 mm. Vzdálenost mezi sedadly orientovanými k sobě činí 655 mm a 705 mm. Sedadla jsou umístěna ve výšce 450 mm nad úrovní podlahy. [33]

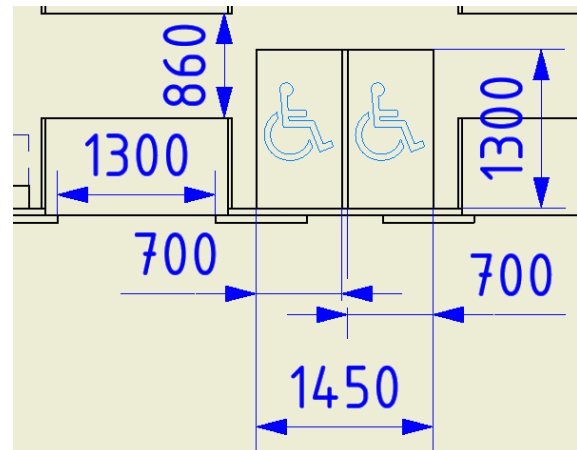


Obr. 2.9: TSI PRM – Sedadla v interiéru vozové skříně [33]

V krajním článku jsou mezi dveřmi umístěna dvě místa pro invalidní vozíky. Rozměry těchto míst vychází opět ze zákona TSI PRM, viz Obr. 2.10. Dalším omezením je minimální průchozí profil cesty k místům pro invalidní vozíky. Jelikož má nástupní prostor šířku 1 300 mm po otevření dveří, měl by mít průchozí profil chodby minimálně 800 mm. Navržené vozidlo má tento profil široký 860 mm, plní tím všechny výše uvedené požadavky. [33]

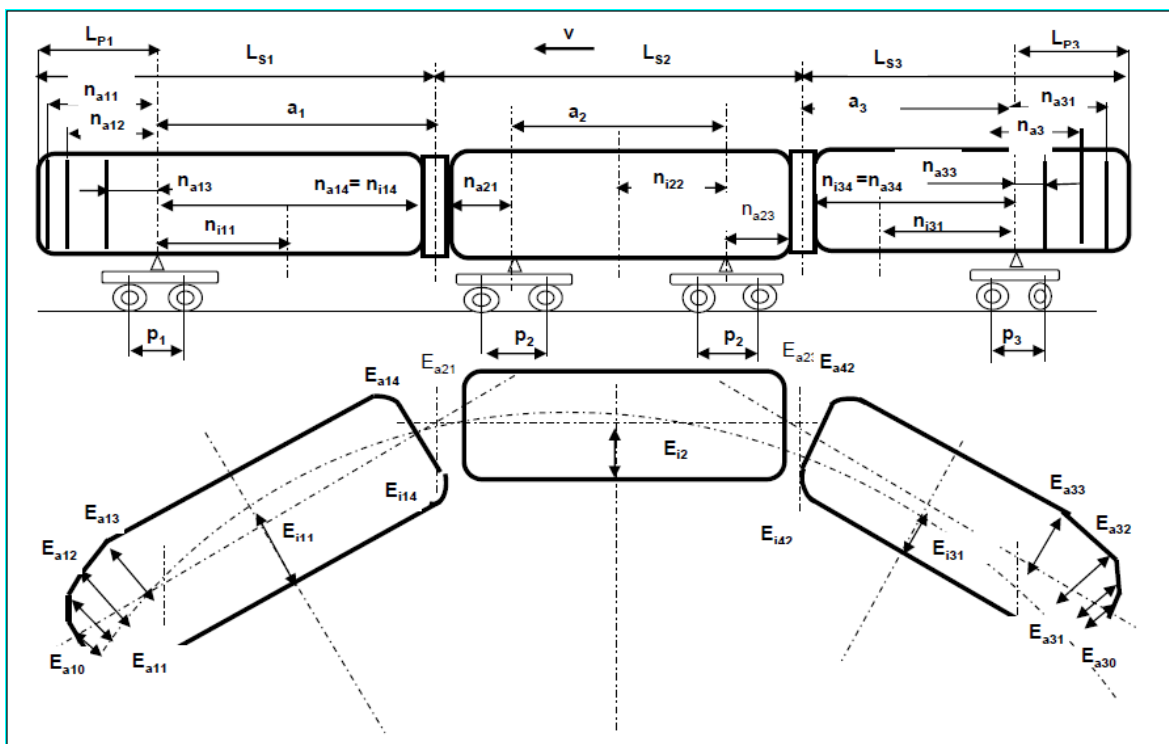


Obr. 2.10: TSI PRM – Rozměry prostoru pro dva invalidní vozíky vedle sebe [33]



Obr. 2.11: Dosažené rozměry pro invalidní vozíky navrženého vozidla

Typový výkres navrženého vozidla Tram – Train v měřítku 1:50 lze prohlédnout v rámci přílohy E. Větší výkres formátu A3 je také přiložený k této práci. Po návrhu vozidla jsem zadal potřebné rozměry do výpočetního excelu poskytnutého panem docentem Kolářem. Program ověřil, že mnou navržené vozidlo se dokáže pohybovat po tratích s oblouky o poloměrech mezi 18 až 10 000 m. Na Obr. 2.12 jsou zakótovány rozměry vozidla potřebné pro kontrolu.



Obr. 2.12: Rozměry potřebné pro kontrolu průjezdu obloukem

Program počítá na základě zadaných rozměrů vybočení představek jednotlivých článků vozidla ve vzpříčené poloze, a to pro kombinace vysunutí podvozků k vnitřní a vnější kolejnici. Následně vypočítaná vybočení porovnává s mezním vybočením dle ČSN 28 0337 a pokud je dosažené vybočení menší než mezní hodnota, vypíše, že pro daný poloměr oblouku byla kontrola splněna. Navržené vozidlo splnilo celkovou kontrolu dle statického obrysu, jelikož pro všechny zadané poloměry oblouku dosáhlo vybočení představku hodnoty nižší, než je hodnota mezní. Výsledky kontroly jsou uvedeny v Tab. 2.3.



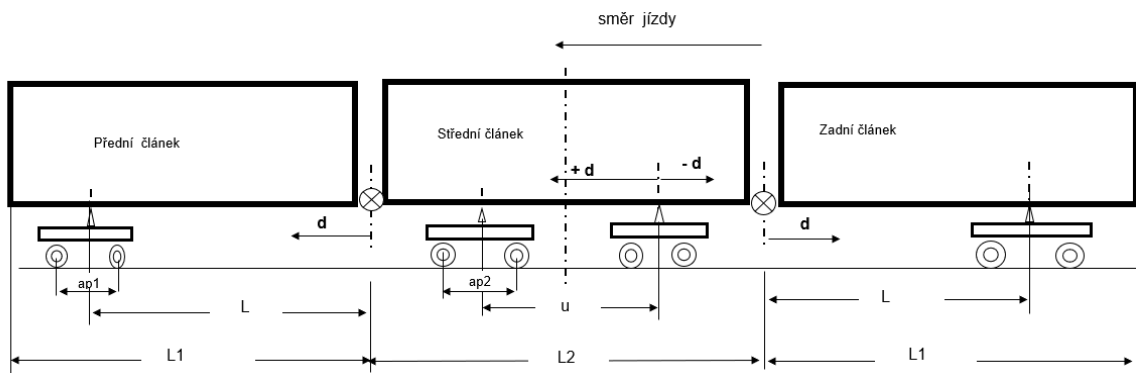


Vypočtená data kontroly průřezu vozidla dle statického obrysu														
Kontrola vybočení představku předního článu ve vzpříčené poloze $E_H < k + \Delta_s$					Kontrola vybočení střední části předního článu $E_H < k + \Delta_s$			Kontrola vybočení představku předního článu ve vzpříčené poloze $E_H < k + \Delta_s$						
1. podvozek vysunut k vnější kolejnici 2. podvozek vysunut k vnější kolejnici 3. podvozek vysunut k vnitřní kolejnici					1. podvozek vysunut k vnitřní kolejnici			1. podvozek vysunut k vnější kolejnici 2. podvozek vysunut k vnitřní kolejnici 3. podvozek vysunut k vnější kolejnici			1. pod. k vnitřní 2. pod. k vnější 3. pod. k vnitřní			
$n_{H10}$	$n_{H11}$	$n_{H12}$	$n_{H13}$	$n_{H14}$				$n_{H10}$	$n_{H11}$	$n_{H12}$	$n_{H13}$	$n_{H14}$	$n_{H15}$	$n_{H16}$
4,208	3,978	2,820	1,820	7,660				7,660	4,208	3,978	2,820	1,820	7,660	
$E_{H10}$ [m]	$E_{H11}$ [m]	$E_{H12}$ [m]	$E_{H13}$ [m]	$E_{H14}$ [m]	$n_{H11}$ [m]	$E_{H11}$ [m]	$E_{H12}$ [m]	$E_{H10}$ [m]	$E_{H11}$ [m]	$E_{H12}$ [m]	$E_{H13}$ [m]	$E_{H14}$ [m]	$E_{H15}$ [m]	$E_{H16}$ [m]
1,629	1,605	1,524	1,533	1,707	2,638	1,462	0,797	1,481	1,457	1,473	1,381	1,698	1,598	1,698
1,583	1,536	1,581	1,512	1,674	2,638	1,445	0,843	1,404	1,386	1,429	1,359	1,665	1,565	1,665
1,461	1,451	1,528	1,485	1,634	2,638	1,425	0,898	1,310	1,299	1,375	1,331	1,625	1,525	1,625
1,346	1,345	1,462	1,452	1,583	2,638	1,400	0,964	1,193	1,192	1,308	1,297	1,575	1,475	1,575
1,262	1,268	1,413	1,428	1,546	2,638	1,383	1,011	1,108	1,114	1,259	1,272	1,538	1,438	1,538
1,198	1,209	1,377	1,409	1,518	2,638	1,369	1,046	1,046	1,054	1,221	1,253	1,510	1,410	1,510
1,148	1,163	1,348	1,395	1,495	2,638	1,359	1,072	0,993	1,008	1,192	1,239	1,488	1,388	1,488
1,107	1,126	1,324	1,383	1,477	2,638	1,351	1,093	0,952	0,970	1,169	1,226	1,470	1,370	1,470
0,983	1,011	1,251	1,344	1,418	2,638	1,324	1,154	0,835	0,863	1,103	1,196	1,411	1,311	1,411
0,921	0,954	1,215	1,326	1,389	2,638	1,312	1,185	0,772	0,806	1,067	1,177	1,383	1,283	1,383
0,858	0,897	1,179	1,307	1,361	2,638	1,299	1,215	0,710	0,748	1,030	1,158	1,355	1,255	1,355
0,827	0,868	1,160	1,297	1,346	2,638	1,293	1,230	0,678	0,719	1,012	1,149	1,340	1,240	1,340
0,808	0,851	1,149	1,292	1,338	2,638	1,290	1,239	0,659	0,702	1,001	1,143	1,332	1,232	1,332
0,795	0,839	1,142	1,288	1,332	2,638	1,287	1,245	0,647	0,690	0,993	1,139	1,326	1,226	1,326
0,779	0,824	1,132	1,283	1,325	2,638	1,284	1,253	0,631	0,676	0,984	1,134	1,319	1,219	1,319
0,770	0,816	1,127	1,280	1,320	2,638	1,282	1,257	0,621	0,667	0,978	1,131	1,314	1,214	1,314
0,755	0,802	1,117	1,274	1,310	2,638	1,277	1,261	0,615	0,662	0,977	1,134	1,305	1,205	1,305
0,749	0,796	1,114	1,272	1,307	2,638	1,276	1,264	0,609	0,656	0,973	1,132	1,302	1,202	1,302
0,732	0,781	1,104	1,267	1,299	2,638	1,273	1,272	0,592	0,640	0,963	1,126	1,294	1,194	1,294
1,719	1,688	1,675	1,559	1,746	2,638	1,483	0,739	1,573	1,541	1,526	1,407	1,736	1,636	1,736
Kontrola vybočení předního představku středního článu ve vzpříčené poloze $E_H < k + \Delta_s$					Kontrola vybočení střední části středního článu $E_H < k + \Delta_s$			Kontrola vybočení zadního představku středního článu ve vzpříčené poloze $E_H < k + \Delta_s$						
2. podvozek vysunut k vnější kolejnici 3. podvozek vysunut k vnitřní kolejnici					2. a 3. podvozek vysunuty k vnitřní kolejnici			2. podvozek vysunut k vnější kolejnici 3. podvozek vysunut k vnější kolejnici						
					$n_{H21}$	$n_{H22}$	$n_{H23}$							
					1,826	3,726	1,826							
					$E_{H21}$ [m]	$E_{H22}$ [m]	$E_{H23}$ [m]							
					1,417	1,651	1,417							
					1,386	1,617	1,386							
					1,347	1,575	1,347							
					1,299	1,525	1,299							
					1,264	1,490	1,264							
					1,236	1,463	1,236							
					1,215	1,442	1,215							
					1,198	1,426	1,198							
					1,141	1,374	1,141							
					1,114	1,349	1,114							
					1,087	1,324	1,087							
					1,073	1,312	1,073							
					1,064	1,305	1,064							
					1,059	1,300	1,059							
					1,052	1,293	1,052							
					1,048	1,290	1,048							
					1,038	1,282	1,038							
					1,035	1,280	1,035							
					1,028	1,273	1,028							
					1,454	1,694	1,454							
Kontrola vybočení představku zadního článu ve vzpříčené poloze $E_H < k + \Delta_s$					Kontrola vybočení střední části zadního článu $E_H < k + \Delta_s$			Kontrola vybočení představku zadního článu ve vzpříčené poloze $E_H < k + \Delta_s$						
2. podvozek vysunut k vnitřní kolejnici 3. podvozek vysunut k vnější kolejnici 4. podvozek vysunut k vnější kolejnici					4. podvozek vysunut k vnitřní kolejnici			2. podvozek vysunut k vnější kolejnici 3. podvozek vysunut k vnitřní kolejnici 4. podvozek vysunut k vnější kolejnici						
$n_{H20}$	$n_{H21}$	$n_{H22}$	$n_{H23}$	$n_{H24}$				$n_{H20}$	$n_{H21}$	$n_{H22}$	$n_{H23}$	$n_{H24}$	$n_{H25}$	$n_{H26}$
4,208	3,978	2,820	1,820	7,660				7,660	4,208	3,978	2,820	1,820	7,660	
$E_{H20}$ [m]	$E_{H21}$ [m]	$E_{H22}$ [m]	$E_{H23}$ [m]	$E_{H24}$ [m]	$n_{H21}$ [m]	$E_{H21}$ [m]	$E_{H22}$ [m]	$E_{H20}$ [m]	$E_{H21}$ [m]	$E_{H22}$ [m]	$E_{H23}$ [m]	$E_{H24}$ [m]	$E_{H25}$ [m]	$E_{H26}$ [m]
1,605	1,582	1,603	1,514	1,705	2,638	1,462	0,797	1,505	1,480	1,494	1,400	1,696	1,596	1,696
1,534	1,516	1,563	1,495	1,673	2,638	1,445	0,843	1,424	1,405	1,447	1,375	1,664	1,564	1,664
1,445	1,435	1,514	1,472	1,633	2,638	1,425	0,898	1,326	1,315	1,389	1,344	1,624	1,524	1,624
1,334	1,334	1,462	1,443	1,582	2,638	1,400	0,964	1,204	1,203	1,318	1,305	1,574	1,474	1,574
1,253	1,259	1,406	1,421	1,545	2,638	1,383	1,011	1,116	1,122	1,266	1,279	1,537	1,437	1,537
1,191	1,203	1,371	1,404	1,517	2,638	1,369	1,046	1,050	1,061	1,227	1,259	1,509	1,409	1,509
1,142	1,158	1,343	1,390	1,495	2,638	1,359	1,072	0,998	1,013	1,197	1,243	1,487	1,387	1,487
1,103	1,122	1,321	1,379	1,477	2,638	1,351	1,093	0,955	0,975	1,172	1,230	1,469	1,369	1,469
0,981	1,010	1,250	1,343	1,418	2,638	1,324	1,154	0,837	0,865	1,105	1,197	1,411	1,311	1,411
0,920	0,953	1,214	1,325	1,389	2,638	1,312	1,185	0,774	0,807	1,068	1,178	1,383	1,283	1,383
0,858	0,896	1,178	1,306	1,361	2,638	1,299	1,215	0,710	0,749	1,031	1,159	1,355	1,255	1,355
0,826	0,868	1,160	1,297	1,346	2,638	1,293	1,230	0,678	0,720	1,012	1,149	1,340	1,240	1,340
0,808	0,850	1,149	1,291	1,338	2,638	1,290	1,239	0,659	0,702	1,001	1,143	1,332	1,232	1,332
0,795	0,839	1,142	1,288	1,332	2,638	1,287	1,245	0,647	0,690	0,993	1,139	1,326	1,226	1,326
0,779	0,824	1,132	1,283	1,325	2,638	1,284	1,253	0,631	0,676	0,984	1,134	1,319	1,219	1,319
0,770	0,816	1,127	1,280	1,320	2,638	1,282	1,257	0,621	0,667	0,978	1,131	1,314	1,214	1,314
0,755	0,802	1,117	1,274	1,310	2,638	1,277	1,261	0,615	0,662	0,977	1,134	1,305	1,205	1,305
0,749	0,796	1,114	1,272	1,307	2,638	1,276	1,264	0,609	0,656	0,973	1,132	1,302	1,202	1,302
0,732	0,781	1,104	1,267	1,299	2,638	1,273	1,272	0,592	0,640	0,963	1,126	1,294	1,194	1,294
1,691	1,660	1,650	1,535	1,744	2,638	1,483	0,739	1,602	1,569	1,552	1,431	1,734	1,634	1,734

### 3 Hmotnostní bilance navrženého vozidla

Hmotnostní bilance se skládá ze tří částí. Je nutné určit hmotnost a umístění cestujících ve vozidle, kromě cestujících také jednotlivých dílů hrubé stavby a elektrické výbroje. Po získání těchto hodnot se vypočítá nápravové zatížení jednotlivých náprav, celkové nápravové zatížení kolébek a spojovacích kloubů a celková hmotnost vozidla. Cílem hmotnostní bilance je zjistit, zda jsou všechny podvozky zatíženy přibližně rovnoměrně a zda nápravové zatížení podvozku nepřevyšuje hodnotu maximálního nápravového zatížení (11 t).

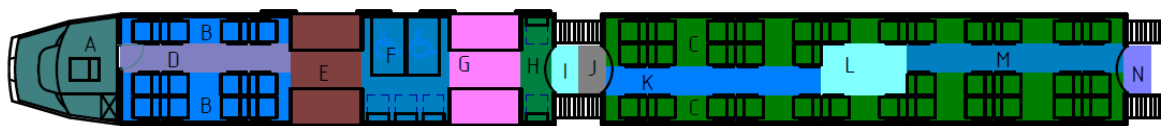
Zatížení jednotlivých náprav a jednotlivých podvozků se vypočítá pomocí rovnic statické momentové rovnováhy. Je tedy nutné znát hmotnost jednotlivých dílů a vzdálenost od zvoleného bodu. Tento bod je znázorněn na Obr. 3.1, a to zvláště pro každý podvozek.



Obr. 3.1: Rozměry potřebné pro hmotnostní bilanci

#### 3.1 Cestující

Nejprve jsem určil potřebné vzdálenosti a hmotnosti cestujících osob. Navržené vozidlo jsem si pro jednodušší výpočet rozdělil do jednotlivých zón dle Obr. 3.2. Počítá se s tím, že jedna osoba váží 80 kg. Nejprve jsem určil dle typového výkresu vzdálenost těžiště zón A a B od spojovacího kloubu vozidla. Jelikož je střední článek symetrický, nachází se těžiště zóny C uprostřed tohoto článku. Dále jsem spočítal počet sedadel v těchto zónách, vynásobil hmotností cestujícího a poté vynásobil vzdáleností od daného bodu a tím získal potřebné momenty do rovnice rovnováhy, viz Tab. 3.1. Jelikož jsou krajní články identické, počítal jsem s předním článkem a poté násobil 2 tam, kde to bylo pro výpočty třeba.



Obr. 3.2: Rozdělení vozidla na jednotlivé zóny



Tab. 3.1: Data o sedících cestujících potřebná k hmotnostní bilanci

sedící cestující						
článek	přední + zadní				střední	
plocha	A	B	celkem		C	celkem
d [mm]	10 735	8 019				
sedící	1	12	13		34	60
m [kg]	80	960	1 040		2 720	4 800
M [Nm]	8 425	75 520	83 945		99 395	

Výpočet pro stojící cestující je o něco komplikovanější. Kromě vzdálenosti těžiště plochy od kloubu pro přední článek a od kolébky třetího podvozku pro střední článek je také nutné vypočítat plochu podlahy dané zóny pomocí rozměrů získaných z typového výkresu. Dále se výpočet větví pro různé stupně obsaditelnosti, a to pro 4 / 5 / 6 / 6,67 a pro 8 osob na metr čtvereční podlahy. Každá plocha zóny se vynásobí daným stupněm obsaditelnosti, čímž se získá maximální počet osob stojících v dané zóně a dále se každé číslo obdobně vynásobí hmotností jednoho cestujícího a následně danou vzdáleností. Získal jsem tedy potřebné momenty a také celkovou hmotnost stojících cestujících. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 3.2 a Tab. 3.3.

Tab. 3.2: Data o stojících cestujících v krajních člancích potřebná k hmotnostní bilanci

stojící cestující								
článek	přední + zadní							celkem
plocha	D	E	F	G	H	I		
rozměr [m <sup>2</sup> ]	2,3	3,5	4,0	3,5	1,3	0,6		
d [mm]	8019	5431	3721	2012	897	280		
stojící	[4/m <sup>2</sup> ]	9	14	16	14	5	3	61
	[5/m <sup>2</sup> ]	11	18	20	18	7	3	77
	[6/m <sup>2</sup> ]	14	21	24	21	8	4	92
	[6,67/m <sup>2</sup> ]	15	23	27	23	9	4	101
	[8/m <sup>2</sup> ]	18	28	32	28	11	5	122
m [kg]	[4/m <sup>2</sup> ]	720	1120	1280	1120	400	240	4 880
	[5/m <sup>2</sup> ]	880	1440	1600	1440	560	240	6 160
	[6/m <sup>2</sup> ]	1120	1680	1920	1680	640	320	7 360
	[6,67/m <sup>2</sup> ]	1200	1840	2160	1840	720	320	8 080
	[8/m <sup>2</sup> ]	1440	2240	2560	2240	880	400	9 760
M [Nm]	[4/m <sup>2</sup> ]	56 640	59 671	46 724	22 106	3 520	659	189 320
	[5/m <sup>2</sup> ]	69 226	76 720	58 405	28 422	4 928	659	238 361
	[6/m <sup>2</sup> ]	88 106	89 507	70 086	33 159	5 632	879	287 369
	[6,67/m <sup>2</sup> ]	94 400	98 032	78 847	36 317	6 336	879	314 810
	[8/m <sup>2</sup> ]	113 280	119 343	93 448	44 212	7 744	1 099	379 125

Tab. 3.3: Data o stojících cestujících ve středním článku potřebná k hmotnostní bilanci

stojící cestující								
článek	střední							
plocha	J	K	L	M	N	celkem		celkem
rozměr [m <sup>2</sup> ]	0,6	2,9	2,1	2,9	0,6			
d [mm]	9595	6983	3725	468	-2145			
stojící	[4/m <sup>2</sup> ]	3	11	8	11	3	36	158
	[5/m <sup>2</sup> ]	3	14	10	14	3	44	198
	[6/m <sup>2</sup> ]	4	17	13	17	4	55	239
	[6,67/m <sup>2</sup> ]	4	19	14	19	4	60	262
	[8/m <sup>2</sup> ]	5	23	17	23	5	73	317
m [kg]	[4/m <sup>2</sup> ]	240	880	640	880	240	2 880	12 640
	[5/m <sup>2</sup> ]	240	1120	800	1120	240	3 520	15 840
	[6/m <sup>2</sup> ]	320	1360	1040	1360	320	4 400	19 120
	[6,67/m <sup>2</sup> ]	320	1520	1120	1520	320	4 800	20 960
	[8/m <sup>2</sup> ]	400	1840	1360	1840	400	5 840	25 360
M [Nm]	[4/m <sup>2</sup> ]	22 590	60 283	23 387	4 040	-5 050	105 250	
	[5/m <sup>2</sup> ]	22 590	76 724	29 234	5 142	-5 050	128 640	
	[6/m <sup>2</sup> ]	30 121	93 164	38 004	6 244	-6 734	160 799	
	[6,67/m <sup>2</sup> ]	30 121	104 125	40 927	6 978	-6 734	175 418	
	[8/m <sup>2</sup> ]	37 651	126 046	49 697	8 448	-8 417	213 425	

Z tabulek 3.1, 3.2 a 3.3 jsem určil celkový možný počet osob cestujících vozidlem včetně jejich celkových hmotností, a to pro všechny výše zmíněné stupně obsaditelnosti, viz Tab. 3.4.

Tab. 3.4: Obsaditelnost navrženého vozidla Tram – Train včetně celkové hmotnosti cestujících

	článek			celkem	stojící + sedící	hmotnost [kg]
	přední	střední	zadní			
sedící + řidič	12	34	12	58	58	4 640
stojící [4/m <sup>2</sup> ]	61	36	61	158	216	17 280
stojící [5/m <sup>2</sup> ]	77	44	77	198	256	20 480
stojící [6/m <sup>2</sup> ]	92	55	92	239	297	23 760
stojící [6,67/m <sup>2</sup> ]	101	60	101	262	320	25 600
stojící [8/m <sup>2</sup> ]	122	73	122	317	375	30 000

### 3.2 Hrubá stavba a elektrická výzbroj

Hmotnosti jednotlivých součástí hrubé stavby a elektrické výzbroje jsem získal z dokumentu návrhu tramvaje LT 38 V stejné koncepce jako je mnou navržené vozidlo Tram - Train, tedy 3článekové vozidlo s podvozkem pod krajním článkem a 2 podvozky pod článkem prostředním. Dokument mi byl poskytnut panem docentem Kolářem.

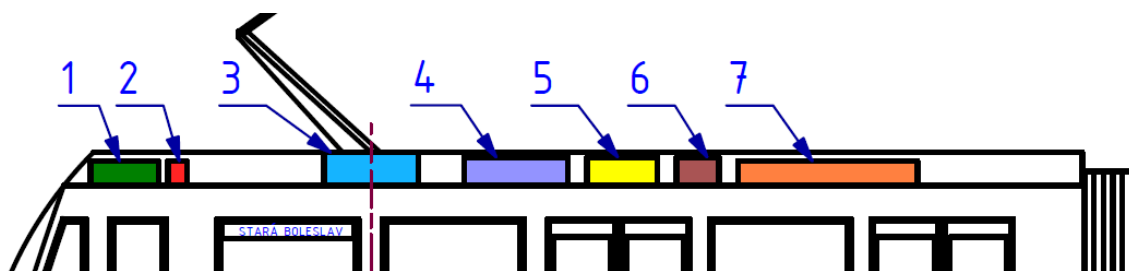
Do hrubé stavby jsem zahrnul pouze ty součásti, které významně ovlivňují hmotnostní bilanci. Jednotlivé součásti jsou uvedeny v Tab. 3.5 včetně jejich hmotností, vzdálenosti od kloubu pro krajní článek a od kolébky 3. podvozku pro střední článek a momentů k těmto bodům.

Tab. 3.5: Data o hrubé stavbě potřebná pro hmotnostní bilanci

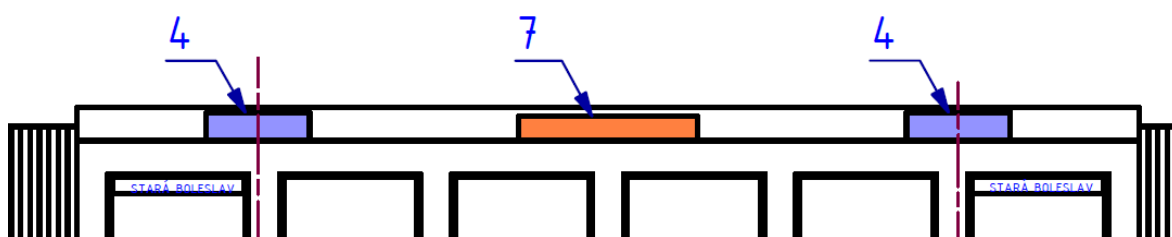
hrubá stavba								
přední + zadní článek					střední článek			
hrubá stavba	m [kg]	x [mm]	M [Nm]		hrubá stavba	m [kg]	x [mm]	M [Nm]
spodek článku	1 300	7 050	89 909		spodek článku	2 000	3 725	73 085
bočnice - levá a pravá	800	4 850	38 063		bočnice - levá a pravá	980	3 725	35 811
střecha	480	7 050	33 197		střecha	470	3 725	17 175
rám čela	72	11 200	7 920		hrubá stavba	760	3 725	27 772
hrubá stavba	400	1 900	7 456		vnější obložení	250	3 725	9 136
vnější obložení	175	7 050	12 103					
konečná montáž								
zástěny	240	0	0		zástěny	200	3 725	7 308
podlaha	470	7 050	32 505		podlaha	380	3 725	13 886

upevnění svítidel	80	7 050	5 533		upevnění svítidel	80	3 725	2 923
obložení stropu	215	7 050	14 882		obložení čelnic a stropu	270	3 725	9 866
dveřní kryty	80	7 050	5 533		pískovače	50	3 725	1 827
stanoviště řidiče	170	11 000	18 345		upevnění topidel	70	3 725	2 558
pískovače	50	7 050	3 458		záchytné tyče	170	3 725	6 212
upevnění topidel	65	7 050	4 495		okna	550	3 725	20 098
záchytné tyče	85	7 050	5 879		sedáky	400	3 725	14 617
zástěny interiéru	130	7 050	8 991		izolace	350	3 725	12 790
okna	450	6 650	29 356		kabelové kanály	200	3 725	7 308
nárazník	220	12 000	25 898					
montáž elektrické výzbroje	140	7 600	10 438					
zástěna řidiče	100	9 915	9 727					
skříň rozvaděče	280	9 900	27 193					
sedáky	350	10 520	36 120					
zabudování dveří	600	3 720	21 896					
uchycení spřáhla	180	9 915	17 508					
měch přechodový	105	0	0					
izolace	340	7 050	23 515					
montáž plošin	150	3 720	5 474					
kabelové kanály	70	0	0					
celkem	7 797		495 393		celkem	7 180		262 373

Elektrická výzbroj je symetricky umístěna na střeše krajních článků. Na střeše středního článku se nachází pouze klimatizace salonu a trakční kontejner pro každý podvozek. Jednotlivé části výzbroje jsou zvýrazněny na Obr. 3.3 a Obr. 3.4, legenda k obrázkům je následující: 1 - klimatizace salonu řidiče, 2 - baterie, 3 - sběrač proudu, 4 - trakční kontejner, 5 - statický měnič, 6 - brzdový odporník, 7 - klimatizace salonu.



Obr. 3.3: Elektrická výzbroj krajních článků



Obr. 3.4: Elektrická výzbroj středního člunku

Tab. 3.6 obsahuje opět pouze nejdůležitější a nejhmotnější součásti el. výzbroje, včetně jejich hmotností, vzdáleností a momentů k danému bodu. Tyto součásti jsem zvolil na základě přednášek PKV a již zmíněného dokumentu k tramvaji LT 38 V.

Tab. 3.6: Data o elektrické výzbroji potřebná pro hmotnostní bilanci

elektrická výzbroj							
přední + zadní článek				střední článek			
hrubá stavba	m [kg]	x [mm]	M [Nm]	hrubá stavba	m [kg]	x [mm]	M [Nm]
klimatizace salonu	200	3 320	6 514	klimatizace salonu	200	3 725	7 308
klimatizace stanoviště řidiče	55	10 660	5 752	soubor kabeláže	550	3 725	20 098
sběrač proudu	150	8 050	11 846	trakční kontejner 1	425	7 450	31 061
soubor kabeláže	440	7 000	30 215	trakční kontejner 2	425	0	0
trakční kontejner	425	6 520	27 184	sada komponent info. syst.	80	3 725	2 923
brzdový odporník	150	4 690	6 901				
statický měnič	150	5 940	8 741				
baterie	200	10 100	19 816				
celkem	1 770		116 968	celkem	1 680		61 391

Následně jsem určil vzdálenosti a momenty k daným bodům jednotlivých podvozků, viz Tab. 3.7.

*Tab. 3.7: Data o podvozcích potřebná pro hmotnostní bilanci*

podvozky	1.	2.	3.	4.
d [mm]	8 050	7 450	0	8 050
m [kg]	5 300			
M [Nm]	418 544	387 348	0	418 544
vzdálenost 3. podvozek - 1. kloub [mm]				9 875
vzdálenost 3. podvozek - 2. kloub [mm]				2 425

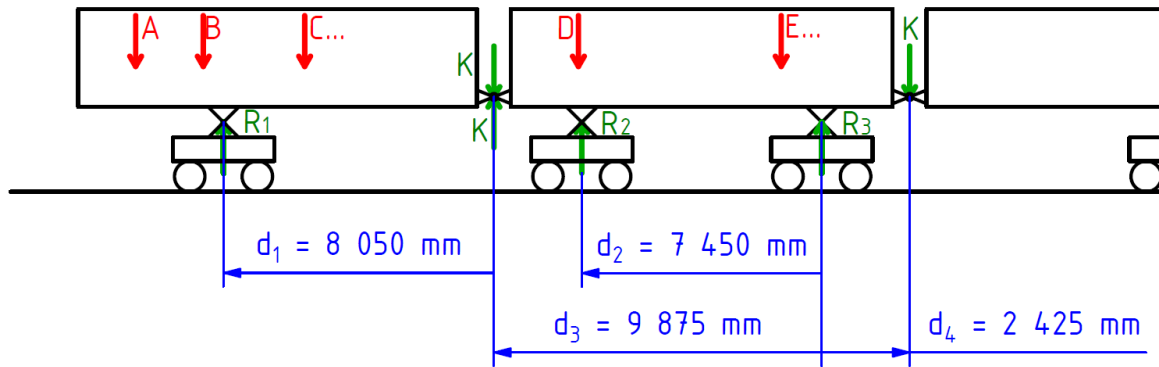
### 3.3 Výsledky hmotnostní bilance

Z tabulek 3.1 - 3.7 jsem si vypsal celkové hmotnosti jednotlivých částí vozidla a momenty působící na daný článek, viz Tab. 3.8. Momenty jsou vztaženy ke kloubu mezivozového přechodu pro krajní článek a ke kolébce 3. podvozku pro střední článek.

*Tab. 3.8: Výsledné dílčí hmotnosti a momenty působící na jednotlivé články*

	moment M [Nm]			hmotnost m [kg]		
	přední	střední	kloub	přední	střední	celkem
podvozky	418 544	387 348	0	5 300	10 600	21 200
hrubá stavba	495 393	262 373	1 524	7 797	7 180	22 775
elektrická výzbroj	116 968	61 391	288	1 770	1 680	5 220
sedící cestující	83 945	99 395	-23	1 040	2 720	4 800
stojící cestující [4 os/m <sup>2</sup> ]	189 320	105 250	2 483	4 880	2 880	12 640
stojící cestující [5 os/m <sup>2</sup> ]	238 361	128 640	3 142	6 160	3 520	15 840
stojící cestující [6 os/m <sup>2</sup> ]	287 369	160 799	3 721	7 360	4 400	19 120
stojící cestující [6,67 os/m <sup>2</sup> ]	314 810	175 418	4 094	8 080	4 800	20 960
stojící cestující [8 os/m <sup>2</sup> ]	379 125	213 425	4 959	9 760	5 840	25 360

K výpočtu hmotností působících na jednotlivé nápravy použiji Obr. 3.5. Ve schématu mám zakreslené síly, ale počítat budu s hmotnostmi (síla = hmotnost x tíhové zrychlení). Hmotnosti A-E symbolizují hmotnosti potřebné pro daný konkrétní výpočet, tzn. například hmotnosti jednotlivých částí el. výzbroje při výpočtu hmotností na nápravu el. výzbrojí vyvolanými.



Obr. 3.5: Schéma pro výpočet hmotností na nápravu

Z Obr. 3.5 se vypočítají hmotnosti působící na podvozky  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  a hmotnosti působící na kloub mezivozového přechodu  $K$  následovně:

$$A \cdot d_A + B \cdot d_B + C \cdot d_C - R_1 \cdot d_1 = 0 \rightarrow R_1 = \frac{A \cdot d_A + B \cdot d_B + C \cdot d_C}{d_1} \quad (2)$$

$$-R_1 - K + A + B + C = 0 \rightarrow K = -R_1 + A + B + C \quad (3)$$

$$D \cdot d_D + E \cdot d_E - R_2 \cdot d_2 + K \cdot (d_3 - d_4) = 0$$

$$\rightarrow R_2 = \frac{D \cdot d_D + E \cdot d_E + K \cdot (d_3 - d_4)}{d_2} \quad (4)$$

$$-R_2 - R_3 + 2K + D + E = 0 \rightarrow R_3 = -R_2 + 2K + D + E \quad (5)$$

$$R_4 = R_1 \quad (6)$$

Hmotnosti na nápravu se získají pomocí hmotnosti na podvozek vydělené dvěma. Uvádím například výpočet pro el. výzbroj:

$$R_1 = \frac{116\,968}{8,050 \cdot 9,81} \doteq 1\,482 \text{ kg} \rightarrow \frac{R_1}{2} = \frac{1\,481}{2} = 741 \text{ kg} = \mathbf{0,741 \text{ t}} \quad (7)$$

$$K = -1\,482 + 1\,770 = \mathbf{288 \text{ kg}} \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{61\,391 + 288 \cdot 9,81 \cdot (9,875 - 2,425)}{7,45 \cdot 9,81} = 1\,128 \text{ kg}$$

$$\rightarrow \frac{R_2}{2} = \frac{1\,128}{2} = \mathbf{0,564 \text{ t}} \quad (9)$$

$$R_3 = -1\,128 + 2 \cdot 288 + 1\,680 = 1\,128 \text{ kg} \rightarrow \frac{R_3}{2} = \frac{1\,128}{2} = \mathbf{0,564 \text{ t}} \quad (10)$$

$$R_4 = R_1 = \mathbf{0,741 \text{ t}} \quad (11)$$



Kompletní výsledky jsou vypsány v Tab. 3.9. Výpočet byl proveden pomocí excelu a lze vidět, že se shoduje s ručním výpočtem uvedeným výše.

Dále jsem vypočítal nápravové zatížení jednotlivých podvozků v kN. Výpočet je jednoduchý, pro prázdný vůz se sečtou hmotnosti na nápravu od podvozků, hrubé stavby a elektrické výzbroje a výsledek se nakonec vynásobí tíhovým zrychlením. Při výpočtu pro sedící cestující se před násobením přičte ještě hmotnost na nápravu sedících cestujících. Při výpočtu pro daný stupeň obsaditelnosti se navíc přičte hmotnost na nápravu stojících cestujících při daném stupni. Příklad uvádím pro 1. nápravu a stupeň obsaditelnosti 5 os/m<sup>2</sup>:

$$F_1 = (m_{1podv.} + m_{1hr.stav.} + m_{1el.výzb.} + m_{1sed.} + m_{1stoj.}) \cdot g \quad (12)$$

$$F_1 = (2,65 + 3,137 + 0,741 + 0,531 + 1,509) \cdot 9,81 = \mathbf{84,05 \text{ kN}} \quad (13)$$

Průměrná hodnota nápravového zatížení vznikne zprůměrováním zatížení všech náprav pro daný stupeň obsaditelnosti. Celková hmotnost vozidla vznikne součtem hmotnosti dvou krajních a středního článku pro daný stupeň (pomocí Tab. 3.8). Např. pro vozidlo obsazené pouze sedícími cestujícími:

$$m_{celk} = m_{podv.} + m_{hr.stav.} + m_{el.výzb.} + m_{sed.} \quad (14)$$

$$m_{celk} = 21\,200 + 22\,775 + 5\,220 + 4\,800 = \mathbf{53\,995 \text{ kg}} \quad (15)$$

Celkové nápravové zatížení kolébky se získá součtem nápravových zatížení daného podvozku a následným odečtením zatížení vyvolaným přímo podvozkem. Např. pro 2. podvozek při stupni obsaditelnosti 4 os/m<sup>2</sup>:

$$T_2 = F_3 + F_4 - 2g \cdot m_{podv.} = 82,42 + 82,42 - 2 \cdot 9,81 \cdot 2,65 = \mathbf{112,84 \text{ kN}} \quad (16)$$

Celkové zatížení spojovacího kloubu v kN se vypočítá součtem hmotností od hrubé stavby, el. výzbroje a případně sedících a stojících cestujících působících na kloub a následným součinem s tíhovým zrychlením (data z Tab. 3.8). Obdobně je také možné vypočítat celkové nápravové zatížení kolébky (součtem hmotností na obě nápravy daného podvozku). Např. výpočet pro 3. podvozek pro stupeň obsaditelnosti 8 os/m<sup>2</sup>:

$$T_K = (m_{Khr.stav.} + m_{Kel.výzb.} + m_{Ksed.} + m_{Kstoj.}) \cdot g \quad (17)$$

$$T_K = (1\,524 + 288 - 23 + 4\,959) \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \doteq \mathbf{66,21 \text{ kN}} \quad (18)$$

$$T_3 = 2(m_{5hr.stav.} + m_{5el.výzb.} + m_{5sed.} + m_{5stoj.}) \cdot g \quad (19)$$

$$T_3 = 2(2,557 + 0,564 + 0,669 + 3,939) \cdot 9,81 = \mathbf{151,65 \text{ kN}} \quad (20)$$

Všechny uvedené výsledky odpovídají údajům v Tab. 3.9 vypočítaným pomocí excelu. Maximální nápravové zatížení 101,82 kN vzniká při obsazení 8 os/m<sup>2</sup> na 3. až 6. nápravě díky symetričnosti vozidla. Této hodnotě odpovídá 10,38 t po vydělení tíhovým zrychlením. Mnou navržené vozidlo tedy za žádných okolností nepřesáhne maximální povolenou nápravovou hmotnost 11 t.

Tab. 3.9: Celkové výsledky hmotnostní bilance

Zatížení náprav									Průměrná hodnota nápravového zatížení [kN]	Celková hmotnost vozidla [kg]
hmotnosti na nápravu [t]	1	2	3	4	5	6	7	8		
podvozky	2,650	2,650	2,650	2,650	2,650	2,650	2,650	2,650		
hrubá stavba	3,137	3,137	2,557	2,557	2,557	2,557	3,137	3,137		
elektrická výzbroj	0,741	0,741	0,564	0,564	0,564	0,564	0,741	0,741		
sedící cestující	0,531	0,531	0,669	0,669	0,669	0,669	0,531	0,531		
stojící cestující [4 os/m <sup>2</sup> ]	1,199	1,199	1,961	1,961	1,961	1,961	1,199	1,199		
stojící cestující [5 os/m <sup>2</sup> ]	1,509	1,509	2,451	2,451	2,451	2,451	1,509	1,509		
stojící cestující [6 os/m <sup>2</sup> ]	1,819	1,819	2,960	2,960	2,960	2,960	1,819	1,819		
stojící cestující [6,67 os/m <sup>2</sup> ]	1,993	1,993	3,247	3,247	3,247	3,247	1,993	1,993		
stojící cestující [8 os/m <sup>2</sup> ]	2,400	2,400	3,939	3,939	3,939	3,939	2,400	2,400		
Nápravové zatížení jednotlivých podvozků [kN]	1	2	3	4	5	6	7	8		
prázdný vůz	64,03	64,03	56,62	56,62	56,62	56,62	64,03	64,03	60,32	49 195
sedící cestující	69,25	69,25	63,18	63,18	63,18	63,18	69,25	69,25	66,21	53 995
stojící cestující [4 os/m <sup>2</sup> ]	81,00	81,00	82,42	82,42	82,42	82,42	81,00	81,00	81,71	66 635
stojící cestující [5 os/m <sup>2</sup> ]	84,05	84,05	87,22	87,22	87,22	87,22	84,05	84,05	85,63	69 835
stojící cestující [6 os/m <sup>2</sup> ]	87,09	87,09	92,22	92,22	92,22	92,22	87,09	87,09	89,66	73 115
stojící cestující [6,67 os/m <sup>2</sup> ]	88,80	88,80	95,03	95,03	95,03	95,03	88,80	88,80	91,91	74 955
stojící cestující [8 os/m <sup>2</sup> ]	92,79	92,79	101,82	101,82	101,82	101,82	92,79	92,79	97,31	79 355

<b>Celkové nápravové zatížení kolébky a spojovacího kloubu [kN]</b>	1. podv.	kloub	2. podv.	3. podv.	kloub	4. podv.
prázdný vůz	76,07	17,79	61,24	61,24	17,79	76,07
sedící cestující	86,50	17,56	74,36	74,36	17,56	86,50
stojící cestující [4 os/m <sup>2</sup> ]	110,02	41,91	112,84	112,84	41,91	110,02
stojící cestující [5 os/m <sup>2</sup> ]	116,11	48,38	122,45	122,44	48,38	116,11
stojící cestující [6 os/m <sup>2</sup> ]	122,20	54,06	132,45	132,44	54,06	122,20
stojící cestující [6,67 os/m <sup>2</sup> ]	125,60	57,72	138,06	138,06	57,72	125,60
stojící cestující [8 os/m <sup>2</sup> ]	133,59	66,21	151,66	151,65	66,21	133,59

## 4 Návrh základních parametrů vypružení vozidla a výpočet vlastních frekvencí houpání a kývání vozidla

Po hmotnostní bilanci následuje výpočet vlastních frekvencí houpání a kývání vozidla. Tento výpočet se provádí z toho důvodu, aby bylo vidět, jak by se vozidlo mohlo chovat při jízdě na trati. K tomuto výpočtu je nejprve nutné navrhnout základní parametry vypružení vozidla. Po stanovení vlastních frekvencí by následoval výpočet vynucených kmitů od nerovností koleje.

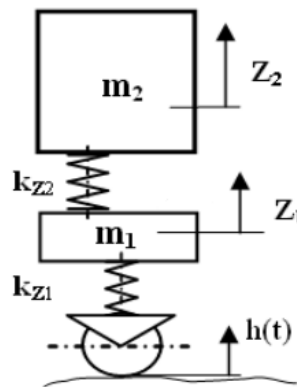
### 4.1 Návrh základních parametrů vypružení

Návrh vychází z přednášek Teorie vozidel. Minimální tuhost svislého vypružení vozidla  $k_{Zmin}$  se stanoví pomocí následujícího vztahu, platného pro osobní a nákladní vozy, elektrické a motorové vozy a jednotky, vozidla metra a tramvaje. [28]

$$k_{Zmin} = \frac{G_{už}}{z_u} = \frac{30\,160,981}{70} = 4\,227 \text{ N/mm}, \quad (21)$$

kde  $G_{už}$  je tíha cestujících a  $z_u$  je užitečné sednutí pružin (hodnota 70 mm byla navržena vedoucím práce).

Poměr tuhosti primárního a sekundárního vypružení, vycházející z dvoumotové soustavy se 2° volnosti, viz Obr. 4.1:



Obr. 4.1: Schéma dvoumotové soustavy se 2 stupni hmotnosti [28]

$$\gamma_{2opt.} = \left( \frac{k_{Z1}}{k_{Z2}} \right)_{opt.} = 2 + \frac{2,4 \cdot m_1}{m_{2PV} + m_{2Lož.}} = 2 + \frac{2,4 \cdot (m_{podv} - 2m_{dvoj})}{m_{2PV} + m_{2Lož.}} \quad (22)$$

$$\gamma_{2opt.} = 2 + \frac{2,4 \cdot (5\,300 - 2,1\,000)}{27\,995 + (27\,995 + 30\,160)} = 2,3,$$

kde  $k_{Z1}$  je celkové primární vypružení,  $k_{Z2}$  je celkové sekundární vypružení,  $m_1$  hmotnost odpružených částí podvozku,  $m_{podv}$  celková hmotnost podvozku,  $m_{dvoj}$  hmotnost dvojkolí,  $m_{2PV}$  hmotnost prázdného vozu bez podvozků a  $m_{2Lož.}$  hmotnost loženého vozu bez podvozků. Všechny hodnoty hmotností jsou převzaty z hmotnostní bilance.

Výsledná celková tuhost primárního a sekundárního vypružení se vypočítá dle následujících vztahů:

$$k_{Z1} \geq (1 + \gamma_{2opt.})k_{Zmin} = (1 + 2,3) \cdot 4\,227 = 13\,949 \text{ N/mm} \quad (23)$$

$$k_{Z2} \geq \frac{(1 + \gamma_{2opt.})k_{Zmin}}{\gamma_{2opt.}} = \frac{(1 + 2,3) \cdot 4\,227}{2,3} = 6\,065 \text{ N/mm} \quad (24)$$

Jelikož má vozidlo celkem 8 náprav a 4 podvozky, budou mít tuhosti primárního a sekundárního vypružení velikost:

$$k_1 = \frac{k_{Z1}}{8} = \frac{13\,949}{8} = 1\,744 \text{ N/mm} \quad (25)$$

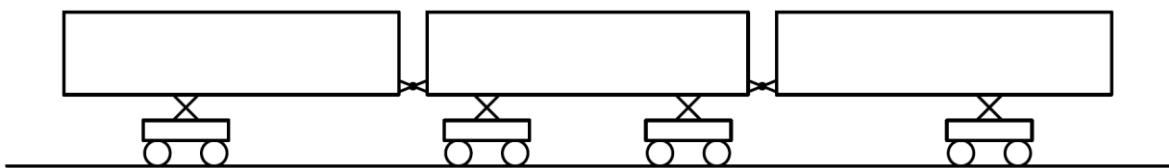
$$k_2 = \frac{k_{Z2}}{4} = \frac{6\,065}{4} = 1\,516 \text{ N/mm} \quad (26)$$

Tuhost kloubu mezivozového přechodu se zjednodušeně stanoví jako maximální síla působící na kloub  $F_k$  (při stupni obsaditelnosti 8 os/m<sup>2</sup>) dělená užitečným sednutím kloubu  $z_k$ . Toto sednutí navrhl vedoucí práce na 10 mm.

$$k_k = \frac{F_k}{z_k} = \frac{66\,210}{10} = 6\,621 \text{ N/mm} \quad (27)$$

## 4.2 Výpočet vlastních frekvencí houpání a kývání vozidla

Pro výpočet frekvencí je nejprve vhodné si nakreslit model v rovině, ve které bude výpočet probíhat, viz Obr. 4.2. Vlastní frekvence budu počítat pro prázdný vůz a pro stupeň obsaditelnosti 4 os/m<sup>2</sup>.

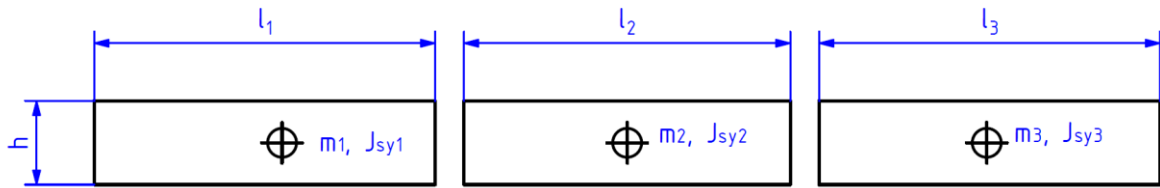


Obr. 4.2: Zjednodušený 2D model vozidla Tram - Train

K výpočtu je nutné stanovit hmotnosti a momenty setrvačnosti jednotlivých skříní. Hmotnosti jsem určil z Tab. 3.8 součtem hrubé stavby a el. výbroje pro prázdný vůz a také sedících a stojících cestujících pro ložený vůz. Moment setrvačnosti skříně ve tvaru obdélníku se počítá dle následujícího vzorce:

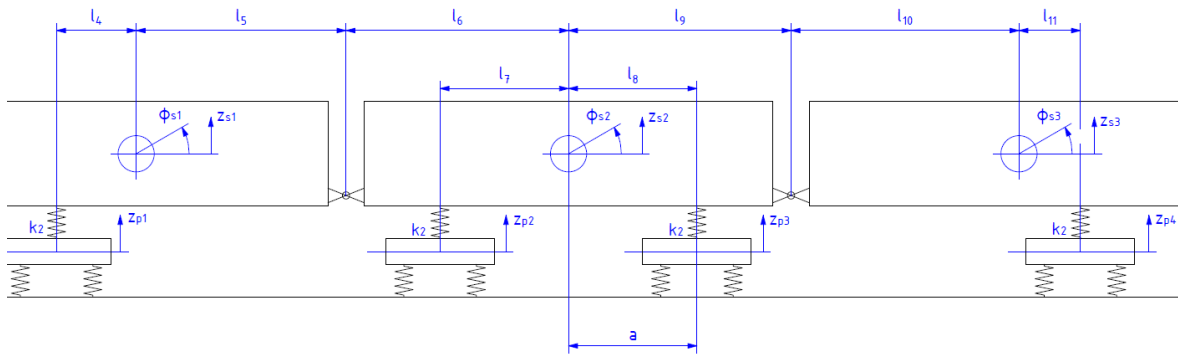
$$J_{s yi} = \frac{1}{12} m_i (h^2 + l_i^2), \quad (28)$$

kde  $m_i$  je hmotnost dané skříně,  $h$  její výška a  $l_i$  její délka, viz Obr. 4.3 (určeno z typového výkresu).



Obr. 4.3: Rozměry pro výpočet momentů setrvačnosti jednotlivých skříní

Dále jsem vytvořil model s vyznačenými stupni volnosti, tuhostmi sekundárního vypružení a rozměry potřebnými pro výpočet kmitání, viz Obr. 4.4. Z obrázku je patrné, že mnou navržený model obsahuje 10 stupňů volnosti.



Obr. 4.4: Model vozidla pro výpočet kmitání

Pro určení rozměrů z Obr. 4.4 je nutné nejprve určit polohu těžiště každé skříně. Poloha těžiště se určí dle následujícího vztahu:

$$d_T(m_1 + m_2 + m_3 + \dots) = d_1m_1 + d_2m_2 + d_3m_3 + \dots \quad (29)$$

Poloha těžiště se jednoduše vypočítá pomocí dat z Tab. 3.8 upravením předchozího vztahu:

$$d_T = \frac{d_1m_1 + d_2m_2 + d_3m_3 + \dots}{(m_1 + m_2 + m_3 + \dots)} = \frac{\text{celkový moment}}{g \cdot \text{celková hmotnost}} \quad (30)$$

Například pro stupeň obsaditelnosti 4 os/m<sup>2</sup> pro přední článek:

$$d_T = \frac{495\,393 + 116\,968 + 83\,945 + 189\,320}{9,81 \cdot (7\,797 + 1\,770 + 1\,040 + 4\,880)} = 5,829 \text{ m} \quad (31)$$

Poloha těžišť všech článků pro všechny případy byla pomocí excelu vypočítána v Tab. 4.1. Díky symetrii středního článku bude jeho těžiště vždy uprostřed tohoto článku.

Tab. 4.1: Poloha těžiště pro jednotlivé skříně

[mm]	poloha těžiště	
	přední $d_T$	střední $a$
prázdný vůz	6 525	3 725
sedící cestující	6 692	3 725
stojící cestující [4 os/m <sup>2</sup> ]	5 829	3 725
stojící cestující [5 os/m <sup>2</sup> ]	5 682	3 725
stojící cestující [6 os/m <sup>2</sup> ]	5 581	3 725
stojící cestující [6,67 os/m <sup>2</sup> ]	5 516	3 725
stojící cestující [8 os/m <sup>2</sup> ]	5 382	3 725

Následně tedy bylo možné určit rozměry z Obr. 4.4 pomocí následujících rovnic vycházejících z typového výkresu:

$$l_4 = l_{11} = 8\,050 - l_5 \quad (32)$$

$$l_5 = l_{10} = d_T \quad (33)$$

$$l_6 = l_9 = 9\,875 - a \quad (34)$$

$$l_7 = l_8 = a \quad (35)$$

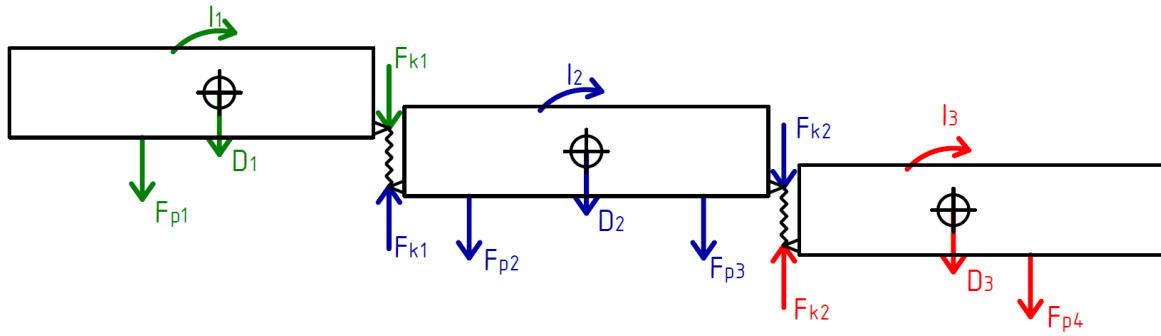
Všechny výsledné rozměry, hmotnosti a momenty setrvačnosti potřebné k výpočtu vlastních frekvencí jsou uvedeny v Tab. 4.2.



Tab. 4.2: Rozměry, hmotnosti a momenty setrvačnosti vozidla

[mm] [kg] [kgm <sup>2</sup> ]	prázdný vůz	sedící cestující	stojící cestující [4 os/m <sup>2</sup> ]	stojící cestující [5 os/m <sup>2</sup> ]	stojící cestující [6 os/m <sup>2</sup> ]	stojící cestující [6,67 os/m <sup>2</sup> ]	stojící cestující [8 os/m <sup>2</sup> ]
h	2 770						
l <sub>1</sub>	11 756						
l <sub>2</sub>	11 300						
l <sub>3</sub>	11 756						
m <sub>1</sub>	9 567	10 607	15 487	16 767	17 967	18 687	20 367
m <sub>2</sub>	8 860	11 580	14 460	15 100	15 980	16 380	17 420
m <sub>3</sub>	9 567	10 607	15 487	16 767	17 967	18 687	20 367
J <sub>sy1</sub>	116 303	128 946	188 269	203 829	218 417	227 169	247 592
J <sub>sy2</sub>	99 943	130 625	163 112	170 332	180 258	184 770	196 502
J <sub>sy3</sub>	116 303	128 946	188 269	203 829	218 417	227 169	247 592
l <sub>4</sub>	1 525	1 358	2 221	2 368	2 469	2 534	2 668
l <sub>5</sub>	6 525	6 692	5 829	5 682	5 581	5 516	5 382
a	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725
l <sub>6</sub>	6 150	6 150	6 150	6 150	6 150	6 150	6 150
l <sub>7</sub>	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725
l <sub>8</sub>	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725	3 725
l <sub>9</sub>	6 150	6 150	6 150	6 150	6 150	6 150	6 150
l <sub>10</sub>	6 525	6 692	5 829	5 682	5 581	5 516	5 382
l <sub>11</sub>	1 525	1 358	2 221	2 368	2 469	2 534	2 668
t	950						
m <sub>p</sub>	3 300						

Dále jsem si vytvořil schéma s rozbořem všech sil a momentů působících na jednotlivé skříně, viz Obr. 4.5. Jedná se o síly od podvozků, kloubů a setrvačné síly a momenty podle d'Alembertova principu. Síly lze rozepsat jako součin hmotnosti a zrychlení a momenty jako součin momentu setrvačnosti a úhlového zrychlení:



Obr. 4.5: Rozbor sil a momentů působících na jednotlivé skříň

$$I_1 = J_{sy1} \ddot{\varphi}_{s1} \quad (36)$$

$$I_2 = J_{sy2} \ddot{\varphi}_{s2} \quad (37)$$

$$I_3 = J_{sy3} \ddot{\varphi}_{s3} \quad (38)$$

$$D_1 = m_1 \ddot{z}_{s1} \quad (39)$$

$$D_2 = m_2 \ddot{z}_{s2} \quad (40)$$

$$D_3 = m_3 \ddot{z}_{s3} \quad (41)$$

$$F_{k1} = k_k(z_{s1} + l_5 \varphi_{s1} - z_{s2} + l_6 \varphi_{s2}) \quad (42)$$

$$F_{k2} = k_k(z_{s2} + l_9 \varphi_{s2} - z_{s3} + l_{10} \varphi_{s3}) \quad (43)$$

$$F_{p1} = k_2 \Delta_1 = k_2(z_{s1} - l_4 \varphi_{s1} - z_{p1}) \quad (44)$$

$$F_{p2} = k_2 \Delta_2 = k_2(z_{s2} - l_7 \varphi_{s2} - z_{p2}) \quad (45)$$

$$F_{p3} = k_2 \Delta_3 = k_2(z_{s2} + l_8 \varphi_{s2} - z_{p3}) \quad (46)$$

$$F_{p4} = k_2 \Delta_4 = k_2(z_{s3} + l_{11} \varphi_{s3} - z_{p4}) \quad (47)$$

Pro každou skříň se následně vypíše rovnice silové a momentové rovnováhy:

$$\begin{aligned} z_{s1}: D_1 + F_{p1} + F_{k1} &= 0 \rightarrow \\ \rightarrow m_1 \ddot{z}_{s1} + k_2(z_{s1} - l_4 \varphi_{s1} - z_{p1}) + k_k(z_{s1} + l_5 \varphi_{s1} - z_{s2} + l_6 \varphi_{s2}) &= 0 \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{s1}: I_1 - F_{p1} l_4 + F_{k1} l_5 &= 0 \rightarrow \\ \rightarrow J_{sy1} \ddot{\varphi}_{s1} - k_2(z_{s1} - l_4 \varphi_{s1} - z_{p1}) l_4 + k_k(z_{s1} + l_5 \varphi_{s1} - z_{s2} + l_6 \varphi_{s2}) l_5 &= 0 \end{aligned} \quad (49)$$

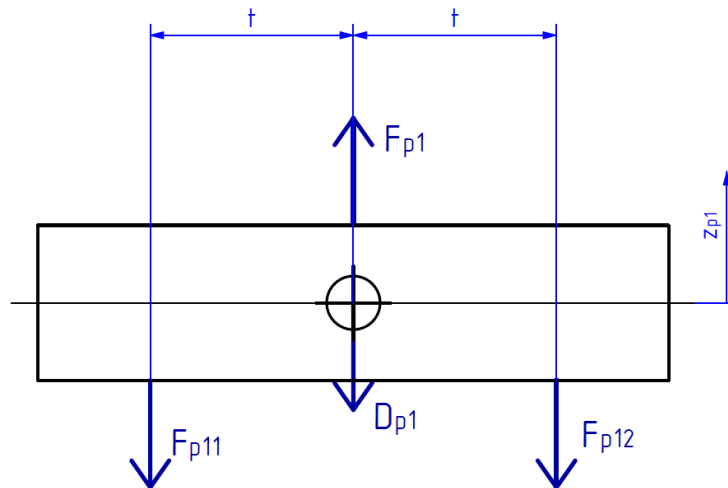
$$\begin{aligned} z_{s2}: D_2 + F_{p2} + F_{p3} - F_{k1} + F_{k2} &= 0 \rightarrow \\ \rightarrow m_2 \ddot{z}_{s2} + k_2(z_{s2} - l_7 \varphi_{s2} - z_{p2}) + k_2(z_{s2} + l_8 \varphi_{s2} - z_{p3}) & \\ - k_k(z_{s1} + l_5 \varphi_{s1} - z_{s2} + l_6 \varphi_{s2}) & \\ + k_k(z_{s2} + l_9 \varphi_{s2} - z_{s3} + l_{10} \varphi_{s3}) &= 0 \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_{s2}: I_2 + F_{k1}l_6 - F_{p2}l_7 + F_{p3}l_8 + F_{k2}l_9 = 0 \rightarrow \\
 \rightarrow J_{sy2}\ddot{\varphi}_{s2} + k_k(z_{s1} + l_5\varphi_{s1} - z_{s2} + l_6\varphi_{s2})l_6 - k_2(z_{s2} - l_7\varphi_{s2} - z_{p2})l_7 \\
 + k_2(z_{s2} + l_8\varphi_{s2} - z_{p3})l_8 + k_k(z_{s2} + l_9\varphi_{s2} - z_{s3} + l_{10}\varphi_{s3})l_9 \\
 = 0
 \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned}
 z_{s3}: D_3 + F_{p4} - F_{k2} = 0 \rightarrow \\
 \rightarrow m_3\ddot{z}_{s3} + k_2(z_{s3} + l_{11}\varphi_{s3} - z_{p4}) - k_k(z_{s2} + l_9\varphi_{s2} - z_{s3} + l_{10}\varphi_{s3}) = 0
 \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_{s3}: I_3 + F_{k2}l_{10} + F_{p4}l_{11} = 0 \rightarrow \\
 \rightarrow J_{sy3}\ddot{\varphi}_{s3} + k_k(z_{s2} + l_9\varphi_{s2} - z_{s3} + l_{10}\varphi_{s3})l_{10} + k_2(z_{s3} + l_{11}\varphi_{s3} - z_{p4})l_{11} = 0
 \end{aligned} \quad (53)$$

Následně je třeba sestavit rovnice silové rovnováhy pro jednotlivé podvozky. Rovnice pro první podvozek vychází z Obr. 4.6, kde  $t = 950$  mm je polovina rozvoru a  $m_p = 3\,300$  kg je hmotnost podvozku bez neodpružených částí, tedy samotných dvojkolí. Rovnice pro ostatní podvozky jsou obdobné, dojde akorát ke změně indexů.



Obr. 4.6: Rozbor sil působících na 1. podvozek

$$D_{pi} = m_p\ddot{z}_{pi} \quad (54)$$

$$F_{pi1} = k_1\Delta_{i1} = k_1(z_{pi} - h_{i1}) \quad (55)$$

$$F_{pi2} = k_1\Delta_{i2} = k_1(z_{pi} - h_{i2}) \quad (56)$$

$$\begin{aligned}
 z_{p1}: D_{p1} + F_{p11} + F_{p12} - F_{p1} = 0 \rightarrow \\
 \rightarrow m_p\ddot{z}_{p1} + k_1(z_{p1} - h_{11}) + k_1(z_{p1} - h_{12}) - k_2(z_{s1} - l_4\varphi_{s1} - z_{p1}) = 0
 \end{aligned} \quad (57)$$

$$\begin{aligned}
 z_{p2}: D_{p2} + F_{p21} + F_{p22} - F_{p2} = 0 \rightarrow \\
 \rightarrow m_p\ddot{z}_{p2} + k_1(z_{p2} - h_{21}) + k_1(z_{p2} - h_{22}) - k_2(z_{s2} - l_7\varphi_{s2} - z_{p2}) = 0
 \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned}
 z_{p3}: D_{p3} + F_{p31} + F_{p32} - F_{p3} &= 0 \rightarrow \\
 \rightarrow m_p \ddot{z}_{p3} + k_1(z_{p3} - h_{31}) + k_1(z_{p3} - h_{32}) - k_2(z_{s2} + l_8 \varphi_{s2} - z_{p3}) &= 0
 \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned}
 z_{p4}: D_{p4} + F_{p41} + F_{p42} - F_{p4} &= 0 \rightarrow \\
 \rightarrow m_p \ddot{z}_{p4} + k_1(z_{p4} - h_{41}) + k_1(z_{p4} - h_{42}) - k_2(z_{s3} + l_{11} \varphi_{s3} - z_{p4}) &= 0
 \end{aligned} \quad (60)$$

Takto získaných 10 rovnic rovnováhy nyní přepíšeme do maticového tvaru  $M\ddot{Y} + KY = 0$ , kde  $Y$  je vektor neznámých příčných posuvů a natočení,  $\ddot{Y}$  je jeho druhá derivace,  $M$  je diagonální matice hmotnosti a  $K$  je symetrická matice tuhosti.

$$Y = \begin{bmatrix} z_{s1} \\ \varphi_{s1} \\ z_{s2} \\ \varphi_{s2} \\ z_{s3} \\ \varphi_{s3} \\ z_{p1} \\ z_{p2} \\ z_{p3} \\ z_{p4} \end{bmatrix}; \ddot{Y} = \begin{bmatrix} \ddot{z}_{s1} \\ \ddot{\varphi}_{s1} \\ \ddot{z}_{s2} \\ \ddot{\varphi}_{s2} \\ \ddot{z}_{s3} \\ \ddot{\varphi}_{s3} \\ \ddot{z}_{p1} \\ \ddot{z}_{p2} \\ \ddot{z}_{p3} \\ \ddot{z}_{p4} \end{bmatrix}; M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{sy1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{sy2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{sy3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_p \end{bmatrix}$$

Matice  $K$  je vypsána na následující straně. Nepočítá se s nerovnostmi koleje, protože se jedná o vlastní frekvence a vlastní tvary kmitu. Řešení maticové rovnice se hledá ve tvaru:

$$Y = a \sin \Omega t, \quad (61)$$

druhá derivace řešení má tvar:

$$\ddot{Y} = -a\Omega^2 \sin \Omega t \quad (62)$$

Dosadím do rovnice:

$$-Ma \Omega^2 \sin \Omega t + Ka \sin \Omega t = (K - \Omega^2 M)a \sin \Omega t = 0, \quad (63)$$

a za vlastní úhlovou frekvenci  $\Omega$  substituujeme vlastní číslo  $\lambda$  pomocí vztahu:

$$\lambda = \Omega^2 \quad (64)$$

Netriviální řešení rovnice tedy získáme řešením následující rovnice:

$$\det(K - \lambda M) = 0 \quad (65)$$

$K =$

$k_2 + k_k$	$-k_2 l_4 + k_k l_5$	$-k_k$	$k_k l_6$	0	0	$-k_2$	0	0	0
$-k_2 l_4 + k_k l_5$	$k_2 l_4^2 + k_k l_5^2$	$-k_k l_5$	$k_k l_5 l_6$	0	0	$k_2 l_4$	0	0	0
$-k_k$	$-k_k l_5$	$2k_2 + 2k_k$	$k_k(-l_6 + l_9) + k_2(-l_7 + l_8)$	$-k_k$	$k_k l_{10}$	0	$-k_2$	$-k_2$	0
$k_k l_6$	$k_k l_5 l_6$	$k_k(-l_6 + l_9) + k_2(-l_7 + l_8)$	$k_k(l_6^2 + l_9^2) + k_2(l_7^2 + l_8^2)$	$-k_k l_9$	$k_k l_9 l_{10}$	0	$k_2 l_7$	$-k_2 l_8$	0
0	0	$-k_k$	$-k_k l_9$	$k_2 + k_k$	$-k_k l_{10} + k_2 l_{11}$	0	0	0	$-k_2$
0	0	$k_k l_{10}$	$k_k l_9 l_{10}$	$-k_k l_{10} + k_2 l_{11}$	$k_k l_{10}^2 + k_2 l_{11}^2$	0	0	0	$-k_2 l_{11}$
$-k_2$	$k_2 l_4$	0	0	0	0	$2k_1 + k_2$	0	0	0
0	0	$-k_2$	$k_2 l_7$	0	0	0	$2k_1 + k_2$	0	0
0	0	$-k_2$	$-k_2 l_8$	0	0	0	0	$2k_1 + k_2$	0
0	0	0	0	$-k_2$	$-k_2 l_{11}$	0	0	0	$2k_1 + k_2$

Vypočítat 10 vlastních čísel, respektive úhlových frekvencí není v lidských silách, proto jsem k výpočtu vytvořil script v Matlabu. Nejprve je třeba zapsat velikost všech rozměrů, hmotností a momentů setrvačnosti. Scripty budou 2, lišit se budou pouze vstupními hodnotami (pro prázdný a pro ložený vůz se stupněm obsaditelnosti 4 os/m<sup>2</sup>). Poté se do scriptu nechá zapsat matice tuhosti K a matice hmotnosti M.

Hlavní část scriptu se nachází na Obr. 4.7. Nejprve se vypočítají vlastní čísla a vlastní tvary kmitu. Poté se tvary kmitu znormují tak, aby měla vždy první složka vektoru hodnotu 1. Následně se zaokrouhlí čísla menší než 1 deseti tisícina na nulu.

```
[u,v]=eig(K,M);

for j = 1:10
    u(:,j)=u(:,j)/u(1,j);
end

for i = 1:10
    for j = 1:10
        if abs(u(i,j)) <= 10e-4
            u(i,j) = 0;
        end
    end
end

% výpočet vlastních frekvencí v Hz

fprintf('\nVlastní frekvence [Hz]: \n \n');
om = transpose(sqrt(diag(v)));
f = om/(2*pi)

fprintf('\nTvary kmitů: \n \n');
u
```

*Obr. 4.7: Script v programu Matlab pro výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu*

Diagonální matice vlastních čísel se nejprve převede na sloupcový vektor, poté se každé číslo odmocní, tím vzniknou vlastní úhlové frekvence a následně se vektor transponuje na řádkový. Tento vektor se vydělí  $2\pi$ , získá se řádkový vektor vlastních frekvencí a nechá se vypsat. Nakonec se pod každou vlastní frekvencí nechá vypsat sloupcový vektor vlastního tvaru kmitu. Matici  $u$  tedy můžeme nazvat maticí modální. Výstup Matlabu pro ložený vůz se nachází na Obr. 4.8, pro prázdné vozidlo se hodnoty liší, viz Obr. 4.9.

Vlastní frekvence [Hz]:

 $f =$ 

1.2274 1.4973 1.5369 1.5403 6.2025 6.2097 6.2877 6.2878 8.1851 11.1113

Tvary kmitů:

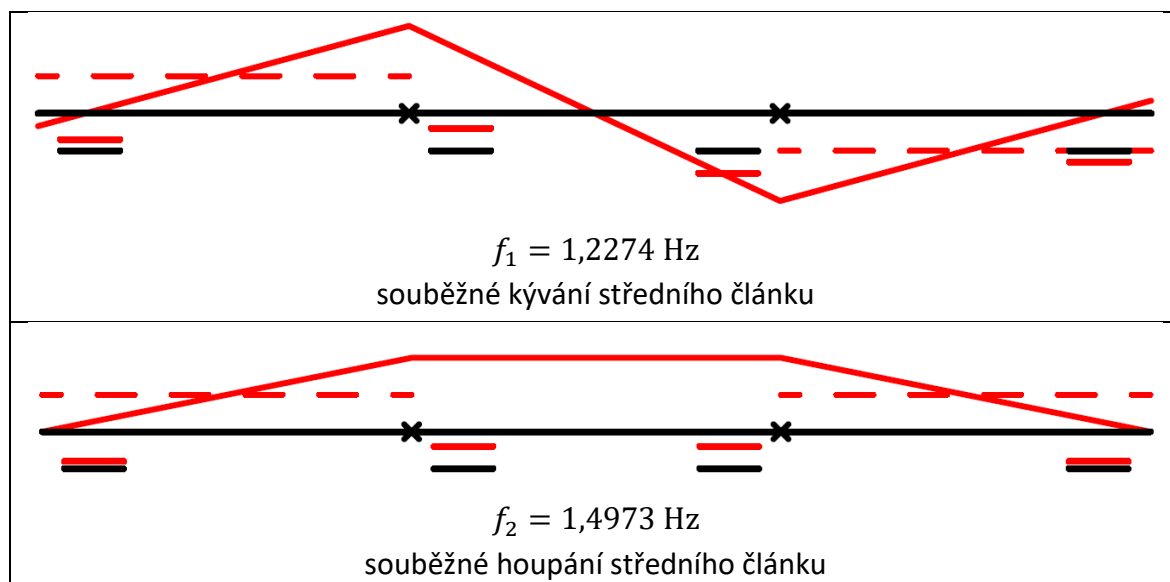
 $u =$ 

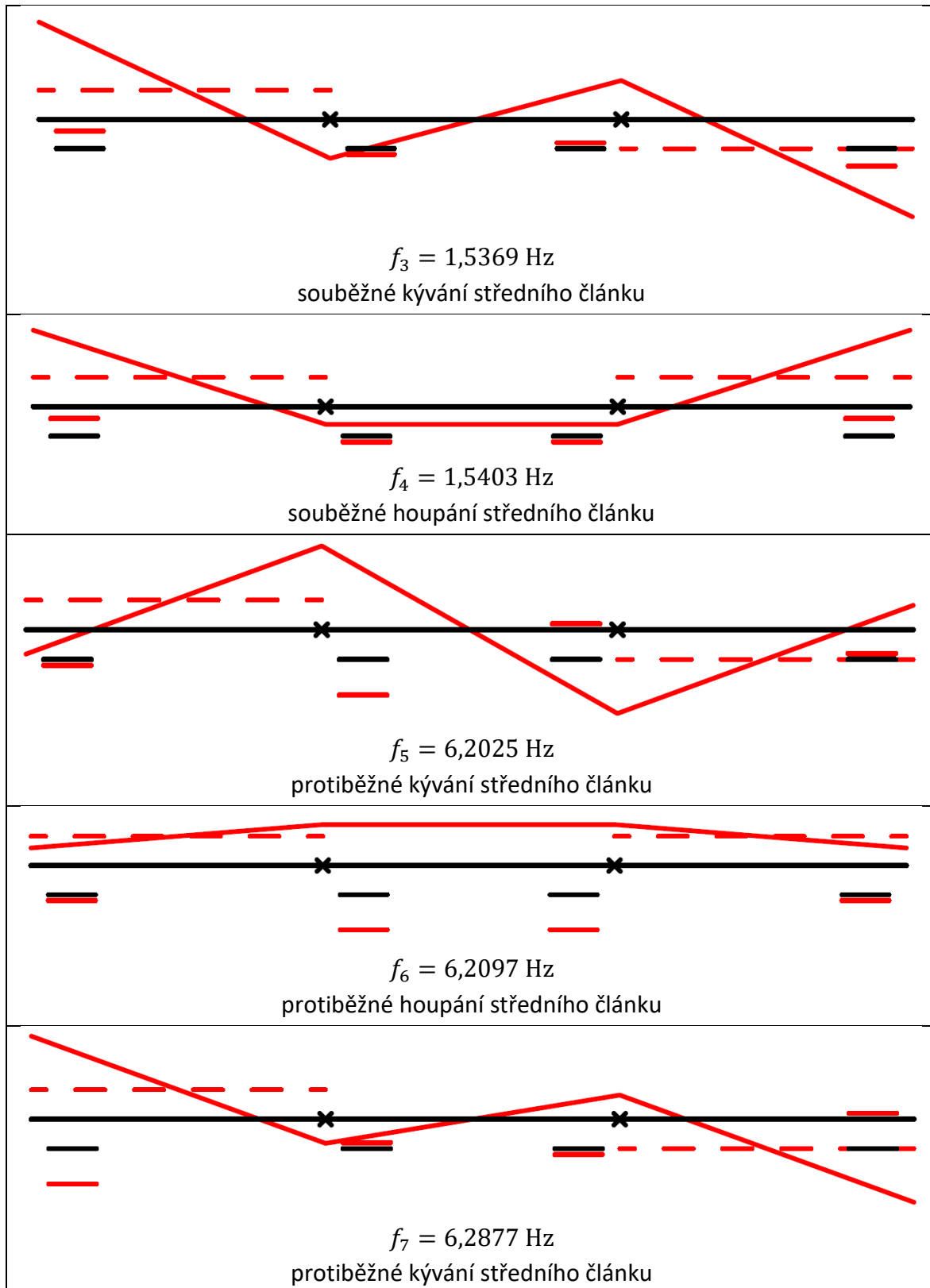
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.4058	0.1672	-0.1921	-0.2667	0.4485	0.4457	-0.1881	-0.1937	0.4819	0.4805
0	1.8648	0	-0.5266	0	0.2081	0	-0.0682	-2.4198	0
-0.5270	0	0.0189	0	-0.0353	0	0.0108	0	0	1.2445
-1.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	1.0000	-1.0000
0.4058	-0.1672	-0.1921	0.2667	0.4485	-0.4457	-0.1881	0.1937	-0.4819	0.4805
0.0312	0.2023	0.4605	0.5142	-0.7214	-0.7841	-14.6561	-14.7801	0.0286	0.0092
0.6190	0.6000	-0.0228	-0.1700	-25.0620	-16.0602	0.4167	0.7052	0.9851	0.6343
-0.6190	0.6000	0.0228	-0.1700	25.0620	-16.0602	-0.4167	0.7052	0.9851	-0.6343
-0.0312	0.2023	-0.4605	0.5142	0.7214	-0.7841	14.6561	-14.7801	0.0286	-0.0092

Obr. 4.8: Výstup z Matlabu pro ložené vozidlo

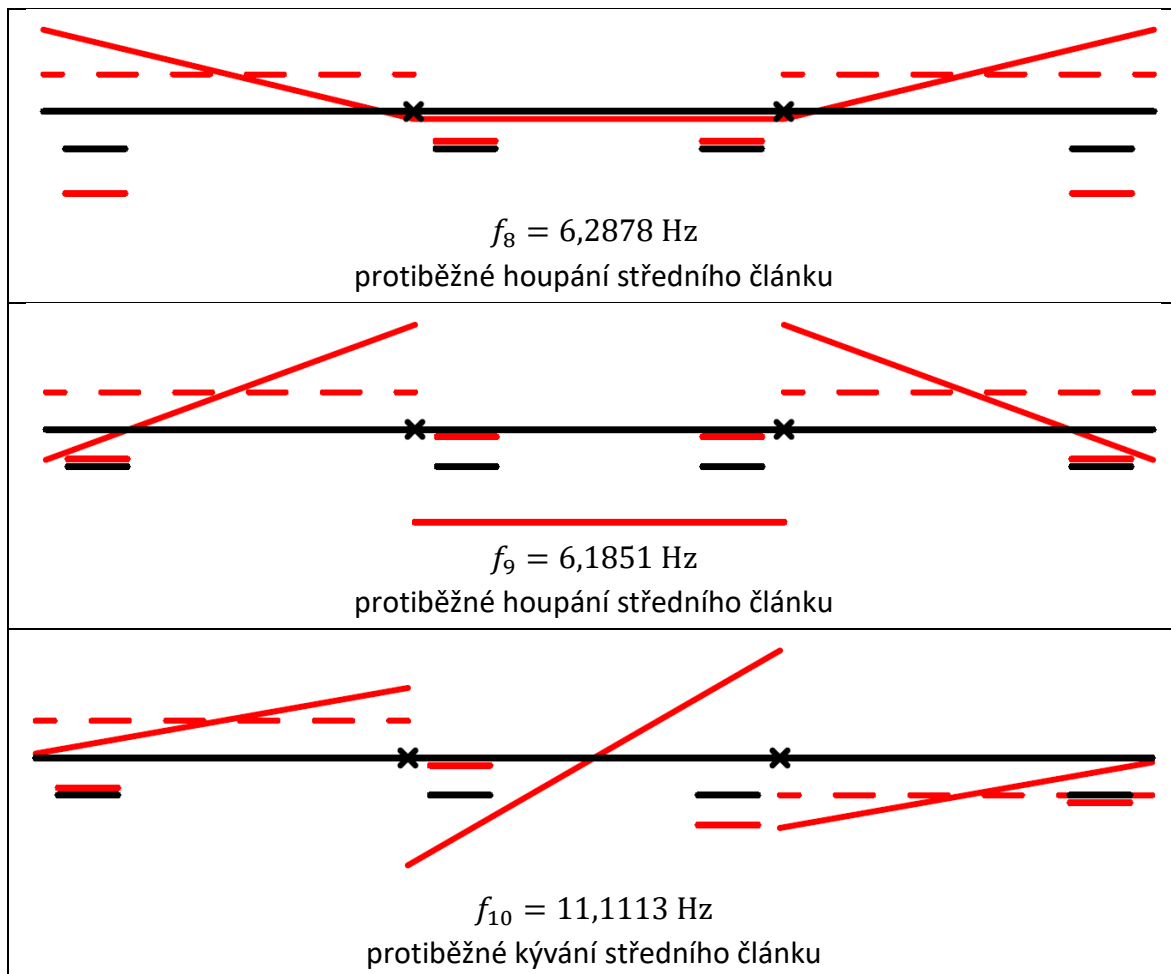
Nakonec jsem vlastní tvary kmitu vykreslil a popsal, jak se chová střední článek při dané vlastní frekvenci. Výsledky výpočtu vlastních frekvencí houpání a kývání vozidla lze prohlédnout v Tab. 4.3 pro vozidlo ložené a v Tab. 4.4 pro vozidlo prázdné. Obdobně lze spočítat vlastní frekvence a vlastní tvary kmitu pro jakýkoliv jiný stupeň obsaditelnosti.

Tab. 4.3: Zobrazení vlastních tvarů kmitu pro vypočítané vlastní frekvence loženého vozidla









Vlastní frekvence [Hz]:

f =

1.6249 1.7757 1.8028 1.9644 6.2608 6.3067 6.3248 6.3292 10.9470 14.5734

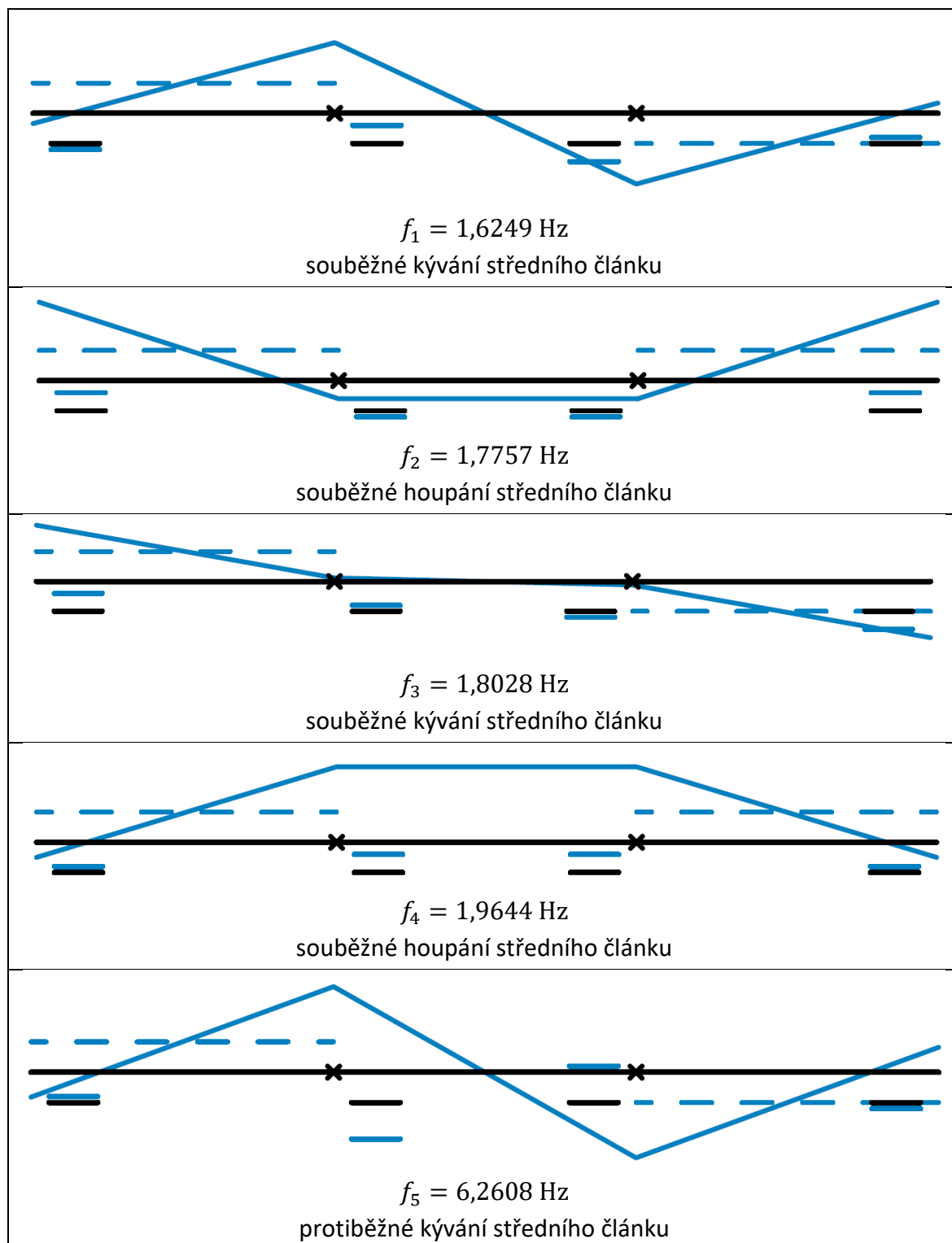
Tvary kmitů:

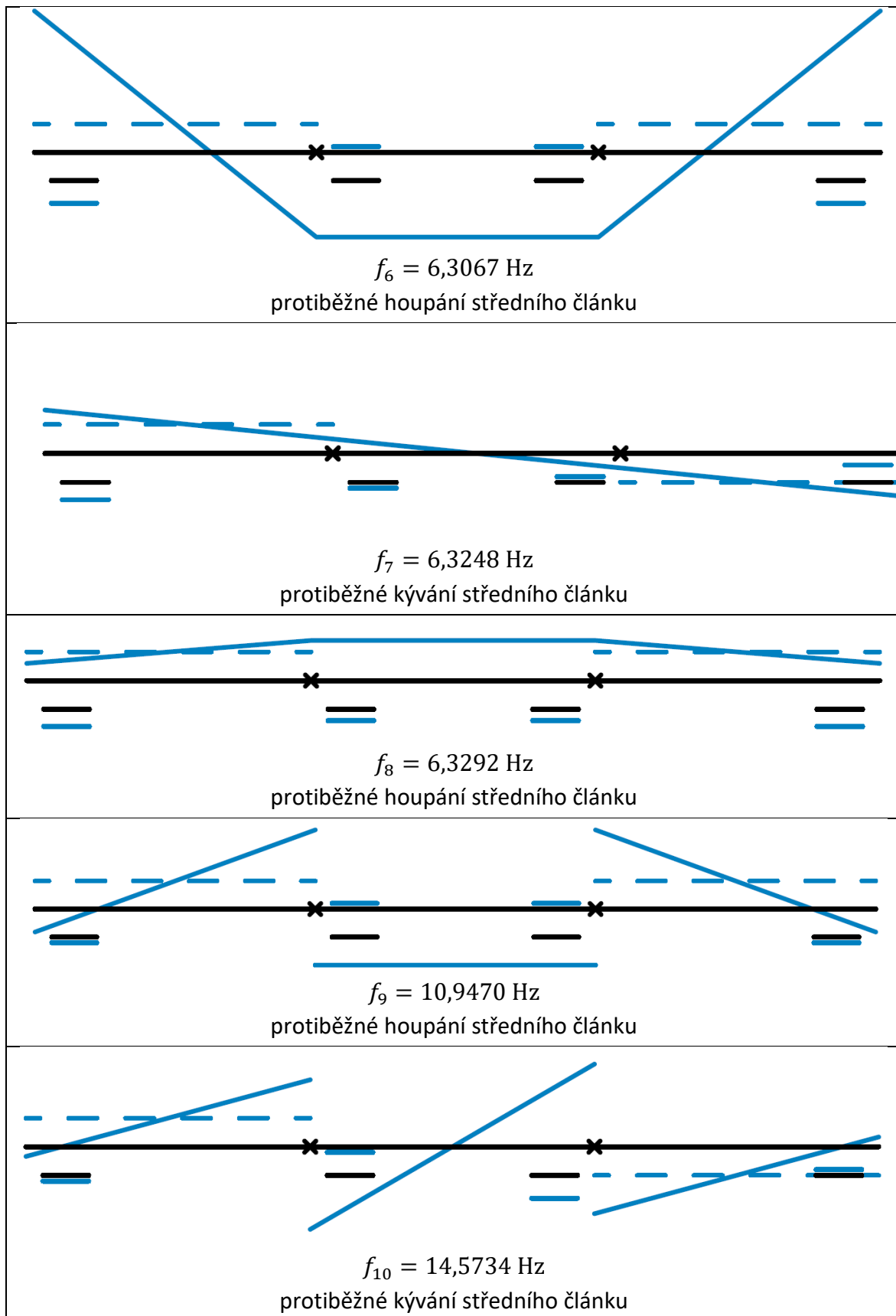
u =

1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3.9885	-0.2017	-0.0630	0.2635	0.8445	-3.3873	-0.0949	0.0117	0.5320	0.5343
0	-0.2956	0	2.5894	0	-9.8900	0	0.6014	-2.3372	0
-4.2417	0	-0.0929	0	-0.5243	0	-0.0447	0	0	1.2394
-1.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	1.0000	-1.0000
3.9885	0.2017	-0.0630	-0.2635	0.8445	3.3873	-0.0949	-0.0117	-0.5320	0.5343
-1.6534	0.4316	0.3628	0.2015	4.2505	-52.5562	-8.3619	-6.9315	-0.0270	-0.0124
5.1402	-0.0976	0.1145	0.8721	-28.8429	84.3032	-1.2174	-4.2444	0.3340	0.3088
-5.1402	-0.0976	-0.1145	0.8721	28.8429	84.3032	1.2174	-4.2444	0.3340	-0.3088
1.6534	0.4316	-0.3628	0.2015	-4.2505	-52.5562	8.3619	-6.9315	-0.0270	0.0124

Obr. 4.9: Výstup z Matlabu pro prázdné vozidlo

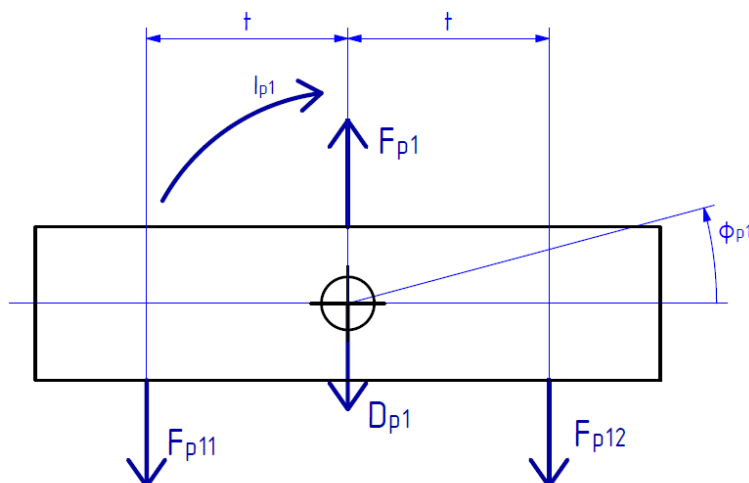
Tab. 4.4: Zobrazení vlastních tvarů kmitu pro vypočítané vlastní frekvence prázdného vozidla





### 4.3 Výpočet vlastní frekvence kývání podvozků

Kývání podvozků v rámci mého modelu nijak neovlivňuje svislý posuv skříní a podvozků ani kývání skříní. Proto zde uvedu ruční výpočet vlastní frekvence kývání podvozků, která je pro všechny 4 podvozky stejná, jelikož jsou podvozky identické. Do rozboru sil působících na podvozek se přidá setrvačný moment vyvolaný natočením podvozku, viz Obr. 4.10.



Obr. 4.10: Rozbor sil a momentů působících na 1. podvozek

Rovnice momentové rovnováhy bude mít následující tvar:

$$I_{p1} - F_{p11}t + F_{p12}t = 0 \rightarrow \quad (66)$$

$$\rightarrow J_{py}\ddot{\varphi}_{p1} - k_1(z_{p1} - t\varphi_{p1})t + k_1(z_{p1} + t\varphi_{p1})t = 0 \rightarrow \quad (67)$$

$$\rightarrow J_{py}\ddot{\varphi}_{p1} + 2k_1t^2\varphi_{p1} = 0 \quad (68)$$

Nepočítá se s nerovnostmi koleje, protože se jedná o vlastní frekvence. Řešení rovnice se hledá ve tvaru:

$$\varphi_{p1} = a \sin \Omega t, \quad (69)$$

druhá derivace řešení má tvar:

$$\ddot{\varphi}_{p1} = -a\Omega^2 \sin \Omega t \quad (70)$$

Dosazením do rovnice:

$$-J_{py}a\Omega^2 \sin \Omega t + 2k_1t^2a \sin \Omega t = (2k_1t^2 - J_{py}\Omega^2)a \sin \Omega t = 0, \quad (71)$$

Netriviální řešení rovnice tedy získám vztahem:

$$2k_1t^2 - J_{py}\Omega^2 = 0 \quad (72)$$

Vlastní úhlová frekvence má velikost:

$$\Omega = \sqrt{\frac{2k_1 t^2}{J_{py}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1\,744 \cdot 0,95^2 \cdot 10^3}{1\,788}} = 41,96 \text{ s}^{-1} \quad (73)$$

Vlastní frekvence pro všechny podvozky má velikost:

$$f = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{41,96}{2\pi} = 6,6780 \text{ Hz} \quad (74)$$

## Závěr

Cílem rešeršní části bakalářské práce bylo zdokumentovat v současnosti používaná vozidla Tram-Train. Součástí rešerše bylo nalezení co nejvíce technických parametrů o těchto vozidlech. Vzniklý přehled poskytuje základní ucelený náhled na všechna dosud používaná tříčlánková Tram-Train vozidla v Evropě včetně jejich specifikací a z rešerše je tedy možné získat představu o dosavadních konstrukčních možnostech v této oblasti.

Dále byla sestavena tabulka porovnávající provozovaná vozidla mezi sebou a na jejím základě měla být zvolena vozidla vhodná pro provoz v České republice. Ukázalo se, že toho by žádné vozidlo nebylo schopné. Hlavním nevyhovujícím aspektem je šířka těchto vozidel (kromě modelů používaných na úzkém metrovém rozchodu). Ideální by bylo vozidlo o  $150 \div 200$  mm užší, viz např. Škoda 15T či Tatra T3.

Následovala tvorba typového výkresu vozidla, které by provozu v ČR schopné bylo. Kompletní typový výkres se nachází v příloze E. Vozidlo je navrženo tak, aby zvládlo projet oblouky o poloměrech  $18 \div 10\,000$  m. Využívá motorových otočných podvozků Alstom Iponam. Díky těmto podvozkům a schopností projet takto úzkými oblouky by mělo být schopné provozu eventuelně i v historickém centru Prahy.

Vozidlo je 100% nízkopodlažní a bezbariérové na tramvajové i železniční části. Aby tohoto bylo možno dosáhnout, jsou použity naklápací rampy s výsuvnými částmi umístěné u všech dveří vozidla.

Hmotnostní bilance poskytla kromě celkové hmotnosti vozidla údaje o zatížení jednotlivých náprav, podvozků a kloubů mezivozových přechodů. Součástí výpočtů bylo stanovení počtu sedících a stojících cestujících. Jedním z hlavních důvodů hmotností bilance bylo určení maximálního nápravového zatížení, které vyšlo nižší, než je maximální přípustná hodnota pro tramvaje.

Poslední částí práce byl výpočet vlastních frekvencí kývání a houpání vozidla. Byl vytvořen model s 10 stupni volnosti (svislý posuv a natočení jednotlivých skříní a svislý posuv podvozků). Výpočet provedený programem Matlab tedy určil 10 vlastních frekvencí spolu s odpovídajícími vlastními tvary kmitu. Vlastní tvary kmitu byly vykresleny pro prázdné a ložené vozidlo při obsaditelnosti  $4 \text{ os/m}^2$ . Nakonec byla určena vlastní frekvence natáčení podvozků, která je pro všechny podvozky totožná.

V návrhu vozidla by bylo možné pokračovat na vyšší úrovni v rámci magisterského studia. Dosavadní stav by také mohl poskytnout základní představu pro první provozuschopná Tram-Train vozidla v České republice.

## Seznam použitých obrázků

Obr. 1.1: Stadler Citylink Tram - Train maďarské dopravní společnosti MÁV-START Zrt [2]	11
Obr. 1.2: Stadler Citylink Tram - Train britské dopravní společnosti SYPTE [4]	12
Obr. 1.3: Stadler Citylink Tram - Train společnosti Transport for Wales [8]	13
Obr. 1.4: Podvozek vozidla Stadler Citylink [3]	18
Obr. 1.5: Výška podvozku vozidla Stadler Citylink [3]	18
Obr. 1.6: Vozidla Alstom Citadis Dualis v Nantes [9]	19
Obr. 1.7: Alstom Regio Citadis při zkušební jízdě z července roku 2004 [10]	20
Obr. 1.8: Typový výkres vozidla Alstom Regio Citadis [11]	21
Obr. 1.9: Podvozek CL 300 vozidel Regio Citadis a jeho výkres [12]	23
Obr. 1.10: Siemens Avanto Tram - Train [13]	24
Obr. 1.11: Typový výkres vozu Siemens Avanto Tram - Train [13]	25
Obr. 1.12: Motorový podvozek SF 70 vozidla Siemens Avanto Tram - Train [14]	26
Obr. 1.13: Standardní podvozek SF 40 vozidla Siemens Avanto Tram - Train [14]	27
Obr. 1.14: Bombardier Flexity Swift v německém Karlsruhe [17]	29
Obr. 1.15: Typový výkres vozidla Bombardier Flexity Swift [17]	29
Obr. 1.16: Podvozek FLEXX Urban 2500 vozidla Bombardier Flexity Swift [18]	31
Obr. 1.17: Siemens Combino Duo na lince 10 v německém Nordhausenu [19]	33
Obr. 1.18: Typový výkres vozidla Siemens Combino Duo [20]	34
Obr. 1.19: Podvozek SF 30 C TFW vozidla Siemens Combino Duo [14]	36
Obr. 1.20: Stadler Tango-type Tram - Train [23]	38
Obr. 1.21: Typový výkres vozidla Stadler Tango-type Tram - Train [23]	39
Obr. 1.22: Škoda ForCity Smart 36T [26]	40
Obr. 1.23: Typový výkres vozidla Škoda ForCity Smart 36T [25]	41
Obr. 1.24: Porovnání kinematického obrysu vlaku a tramvaje [33]	50
Obr. 2.1: 3D model podvozku Alstom Iponam [12]	53
Obr. 2.2: Výkres podvozku Alstom Iponam [12]	53
Obr. 2.3: Asynchronní motor Alstom 4 LMA 1648 [29]	55
Obr. 2.4: Momentová charakteristika motoru 4 LMA 1648 [29]	55
Obr. 2.5: Porovnání výšky nástupiště a výšky podlahy kolejových vozidel [30]	56
Obr. 2.6: Výška podlahy nízkopodlažního vozidla, porovnání nízkopodlažního a vysokopodlažního vozidla [31]	57
Obr. 2.7: Naklápěcí rampy s výsuvnými částmi pode dveřmi vozidla	57
Obr. 2.8: Šířka uličky mezi sedadly [33]	59
Obr. 2.9: TSI PRM – Sedadla v interiéru vozové skříně [33]	59
Obr. 2.10: TSI PRM – Rozměry prostoru pro dva invalidní vozíky vedle sebe [33]	60

---

Obr. 2.11: Dosažené rozměry pro invalidní vozíky navrženého vozidla .....	60
Obr. 2.12: Rozměry potřebné pro kontrolu průjezdu obloukem.....	60
Obr. 3.1: Rozměry potřebné pro hmotnostní bilanci.....	64
Obr. 3.2: Rozdělení vozidla na jednotlivé zóny .....	64
Obr. 3.3: Elektrická výzbroj krajních článků .....	70
Obr. 3.4: Elektrická výzbroj středního článku .....	70
Obr. 3.5: Schéma pro výpočet hmotností na nápravu .....	72
Obr. 4.1: Schéma dvoumotorové soustavy se 2 stupni hmotnosti [28].....	77
Obr. 4.2: Zjednodušený 2D model vozidla Tram - Train .....	78
Obr. 4.3: Rozměry pro výpočet momentů setrvačnosti jednotlivých skříní .....	79
Obr. 4.4: Model vozidla pro výpočet kmitání.....	79
Obr. 4.5: Rozbor sil a momentů působících na jednotlivé skříně .....	82
Obr. 4.6: Rozbor sil působících na 1. podvozek .....	83
Obr. 4.7: Script v programu Matlab pro výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu .....	86
Obr. 4.8: Výstup z Matlabu pro ložené vozidlo .....	87
Obr. 4.9: Výstup z Matlabu pro prázdné vozidlo .....	89
Obr. 4.10: Rozbor sil a momentů působících na 1. podvozek.....	92



## Seznam tabulek

Tab. 1.1: Typové výkresy vozidla Stadler Citylink Tram - Train [4; 5; 7; 8; 6].....	14
Tab. 1.2: Porovnání provozovaných variant vozidla Stadler Citylink Tram - Train [4; 5; 7; 8; 6].....	16
Tab. 1.3: Technické parametry vozidla Alstom Regio Citadis [10; 11] .....	21
Tab. 1.4: Technické parametry podvozku CL 300 vozidel Alstom Regio Citadis [12].....	23
Tab. 1.5: Technické parametry vozidla Siemens Avanto Tram - Train [13] .....	25
Tab. 1.6: Technické parametry podvozku SF 70 a SF 40 vozidla Siemens Avanto Tram - Train [14] .....	28
Tab. 1.7: Technické parametry vozidla Bombardier Flexity Swift [17] .....	30
Tab. 1.8: Technické parametry podvozku FLEXX Urban 2500 vozidla Bombardier Flexity Swift [18] .....	32
Tab. 1.9: Technické parametry vozidla Siemens Combino Duo [20; 21; 22] .....	34
Tab. 1.10: Technické parametry podvozku SF 30 C TFW vozidla Siemens Combino Duo [14] .....	37
Tab. 1.11: Technické parametry vozidla Stadler Tango-type Tram - Train [23].....	39
Tab. 1.12: Technické parametry tramvají Škoda ForCity Smart [24; 26] .....	42
Tab. 1.13: Odlišnosti tramvajové a železniční infrastruktury [30] .....	45
Tab. 1.14: Porovnání technických parametrů vozidel Tram - Train .....	47
Tab. 2.1: Technické parametry podvozku Alstom Iponam [12] .....	54
Tab. 2.2: Technické parametry motoru 4 LMA 1648 [29] .....	54
Tab. 2.3: Výsledky kontroly průjezdu obloukem.....	62
Tab. 3.1: Data o sedících cestujících potřebná k hmotnostní bilanci.....	65
Tab. 3.2: Data o stojících cestujících v krajních člancích potřebná k hmotnostní bilanci...	66
Tab. 3.3: Data o stojících cestujících ve středním článku potřebná k hmotnostní bilanci..	67
Tab. 3.4: Obsaditelnost navrženého vozidla Tram – Train včetně celkové hmotnosti cestujících .....	68
Tab. 3.5: Data o hrubé stavbě potřebná pro hmotnostní bilanci .....	68
Tab. 3.6: Data o elektrické výzbroji potřebná pro hmotnostní bilanci .....	70
Tab. 3.7: Data o podvozcích potřebná pro hmotnostní bilanci .....	71
Tab. 3.8: Výsledné dílčí hmotnosti a momenty působící na jednotlivé články .....	71
Tab. 3.9: Celkové výsledky hmotnostní bilance .....	75
Tab. 4.1: Poloha těžiště pro jednotlivé skříně.....	80
Tab. 4.2: Rozměry, hmotnosti a momenty setrvačnosti vozidla.....	81
Tab. 4.3: Zobrazení vlastních tvarů kmitu pro vypočítané vlastní frekvence loženého vozidla .....	87

Tab. 4.4: Zobrazení vlastních tvarů kmitu pro vypočítané vlastní frekvence prázdného vozidla..... 90

## Seznam příloh

Příloha A: Trasa Praha – Brandýs nad Labem – Stará Boleslav [1].....	105
Příloha B: Trasa Praha, Kobylisy – Odolena Voda/Neratovice/Mělník [1].....	106
Příloha C: Trasa Praha, Hlubočepy – Rudná a Beroun a trasa Praha, Sídliště Řepy – Hostivice – Chýně – (Rudná) [1].....	107
Příloha D: Sestavný výkres sedadel Opál slezské společnosti MSV interiéry [32] .....	108
Příloha E: Typový výkres navrženého vozidla Tram – Train v měřítku 1:50.....	109

## Zdroje

- [1] VLAKOTRAMVAJE V PRAŽSKÉ INTEGROVANÉ DOPRAVĚ: z regionu pohodlně až do centra města. In: TRAM-BUS.cz [online]. -: -, 2014 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.tram-bus.cz/wp-content/uploads/2014/09/Vlakotramvaj.pdf>
- [2] Stadler Citylink Tram-Train. In: Railway Technology [online]. Velká Británie: Verdict Media Strategies, 2022 [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/projects/stadler-citylink-tram-train/>
- [3] TramLink und CityLink Familien – die neue Generation von Strassenbahnen und Stadtbahnen. In: Stadler [online]. Ernst-Stadler-Strasse 1, 9565 Bussnang, Schweiz: Stadler, 2016 [cit. 2022-11-07]. Dostupné z: [https://www.schienefahrzeugtagung.at/download/PDF2016/DiV02\\_Rivas.pdf](https://www.schienefahrzeugtagung.at/download/PDF2016/DiV02_Rivas.pdf)
- [4] CITYLINK TRAM TRAIN: South Yorkshire Passenger Transport Executive (SYPT), Sheffield, UK. In: Stadler [online]. Ernst-Stadler-Strasse 1, 9565 Bussnang, Schweiz: Stadler, 2017 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/media/pdf/ttsypte0616e.pdf>
- [5] CITYLINK TRAM TRAIN: Verkehrsverbund Mittelsachsen (VMS), Chemnitz, Germany. In: Stadler [online]. Ernst-Stadler-Strasse 1, 9565 Bussnang, Schweiz: Stadler, 2016 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/media/pdf/ttvms0116e.pdf>
- [6] CITYLINK TRAM-TRAIN: MÁV-START Zrt., Hungary. In: Stadler [online]. Ernst-Stadler-Strasse 1, 9565 Bussnang, Schweiz: Stadler, 2017 [cit. 2022-10-26]. Dostupné z: [https://www.stadlerrail.com/media/pdf/cttmav0818e\[1\].pdf](https://www.stadlerrail.com/media/pdf/cttmav0818e[1].pdf)
- [7] CITYLINK TRAM TRAIN: Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana, Alicante L9, Spain. In: Stadler [online]. Ernst-Stadler-Strasse 1, 9565 Bussnang, Schweiz: Stadler, 2019 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/media/pdf/cttfgvl90418e.pdf>
- [8] CITYLINK TRAM TRAIN: Transport for Wales. In: Stadler [online]. Ernst-Stadler-Strasse 1, 9565 Bussnang, Schweiz: Stadler, 2019 [cit. 2022-10-26]. Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/media/pdf/cttwb0922e.pdf>

- 
- [9] Alstom dodá dalších 13 vlakotramvají Citadis Dualis. In: Československý Dopravák [online]. -: Československý Dopravák, 2002 [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/alstom-doda-dalsich-13-vlakotramvaji-citadis-dualis/>
- [10] Der Regio CITADIS von ALSTOM LHB für die RegioTram Nordhessen. In: Tram Kassel [online]. Kassel: Dr. Heribert Menzel, 2022 [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: [https://web.archive.org/web/20131002075311/http://www.tram-kassel.de/rtn/rtn\\_fz/regiocitadis/regcita\\_f.htm](https://web.archive.org/web/20131002075311/http://www.tram-kassel.de/rtn/rtn_fz/regiocitadis/regcita_f.htm)
- [11] Bogie Catalogue. In: Alstom [online]. Saint-Ouen, Francie: ALSTOM Transport, 2015 [cit. 2022-11-14]. Dostupné z: <https://pdfcoffee.com/alstom-bogies-catalogue-2015-englishpdf-pdf-free.html>
- [12] TRAM-TRAINS FOR SALE. In: <https://www.railjournal.com/> [online]. 1809 Capitol Avenue, Omaha, NE 68102, USA: Simmons-Boardman Publishing Corporation, 2022 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://www.railjournal.com/wp-content/uploads/2022/06/News-sale-of-tram-trains.pdf>
- [13] First Class Bogies: The complete programme for high-quality railway transportation. In: Siemens Transportation *Systems* [online]. Eggenberger Straße 31, 8021 Graz, Austria: Siemens Transportation Systems, 2008 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/view/6479759/motor-and-trailer-bogies-for-heavy-metro-vehicles-siemens>
- [14] Bombardier Receives Order for 30 Dual-system FLEXITY Swift Tram-trains for German City of Karlsruhe. In: Bombardier [online]. 400 Côte-Vertu Road West, Dorval, Québec, H4S 1Y9, Canada: Bombardier, 2009 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://bombardier.com/en/media/news/bombardier-receives-order-30-dual-system-flexity-swift-tram-trains-german-city-karlsruhe>
- [15] Bombardier dodá 12 vozů Flexity Swift pro Karlsruhe. In: Československý Dopravák [online]. *Praha*: Československý Dopravák, 2016 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/2016-5-23-bombardier-dod-12-voz-flexity-swift-pro-karlsruhe/>
- [16] FLEXX Urban Bogies: Easy access in the city. In: Bombardier Transport [online]. Place des Ateliers – BP1 59154 Crespain, France: Bombardier Transport, - [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: [https://moam.info/flexx-urban-bogies-bombardier\\_5a2258aa1723dda4f300fa5f.html](https://moam.info/flexx-urban-bogies-bombardier_5a2258aa1723dda4f300fa5f.html)
-

- [17] Geschichte der Combino Duo. In: IMG Electronic & Power Systems [online]. An der Salza 8a 99734 Nordhausen: IMG Electronic & Power Systems, - [cit. 2022-11-03]. Dostupné z: <https://www.img-nordhausen.de/unternehmen/referenzen/geschichte-der-combino-duo/>
- [18] Tango-type tram-train: for Aarhus Letbane I/S, Denmark. In: Stadler [online]. Ernst-Stadler-Strasse 1, 9565 Bussnang, Schweiz: Stadler, 2017 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://www.stadlerail.com/media/pdf/tttlet0515e.pdf>
- [19] Plzeňská Škoda pracuje na nejdelší tramvaji na světě. Jezdit bude v Německu. In: VTM [online]. Komunardů 1584/42, 170 00, Praha 7, Česká republika: CZECH NEWS CENTER, a. s., 2022 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/plzenska-skoda-pracuje-na-nejdelsi-tramvaji-na-svete-jezdit-bude-v-nemecku/sc-870-a-218719/default.aspx>
- [20] První vlakotramvaj Škody. Nová vozidla pro tři německá města vyjedou příští rok. In: Zdopravy.cz [online]. Bořivojova 1081/40, Žižkov (Praha 3), 130 00 Praha: Avizer Z, s.r.o., 2022 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/prvni-vlakotramvaj-skody-nova-vozidla-pro-tri-nemecka-mesta-vyjedou-pristi-rok-126812/>
- [21] Rhein-Neckar-Verkehr (rnv): ForCity Smart. In: Škoda Group a. s. [online]. Emila Škody 2922/1, Plzeň, 301 00: ŠKODA TRANSPORTATION a.s., 2022 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.skodagroup.com/cs/reference/tramvaj-forcity-smart-rnv>
- [22] InnoTrans 2022: Škoda Unveils Its 36T Tram-Train for RNV. In: Railway-News [online]. Exeter EX2 4AN, Velká Británie: a2b Global Media Ltd, 2022 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://railway-news.com/innotrans-2022-skoda-unveils-its-36t-tram-train-for-rnv/>
- [23] Skoda presents first tram-train for Rhein-Neckar Transport. In: International Railway Journal [online]. 46 Killigrew Street Falmouth, Cornwall TR11 3PP UK: International Railway Journal, 2022 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.railjournal.com/fleet/skoda-presents-first-tram-train-for-rhein-neckar-transport/>
- [24] Středočeský kraj začíná zkoumat možnou proměnu trati do Dobříše pro vlakotramvaje. In: Zdopravy [online]. -: Avizer, s.r.o., 2017 [cit. 2023-03-03].

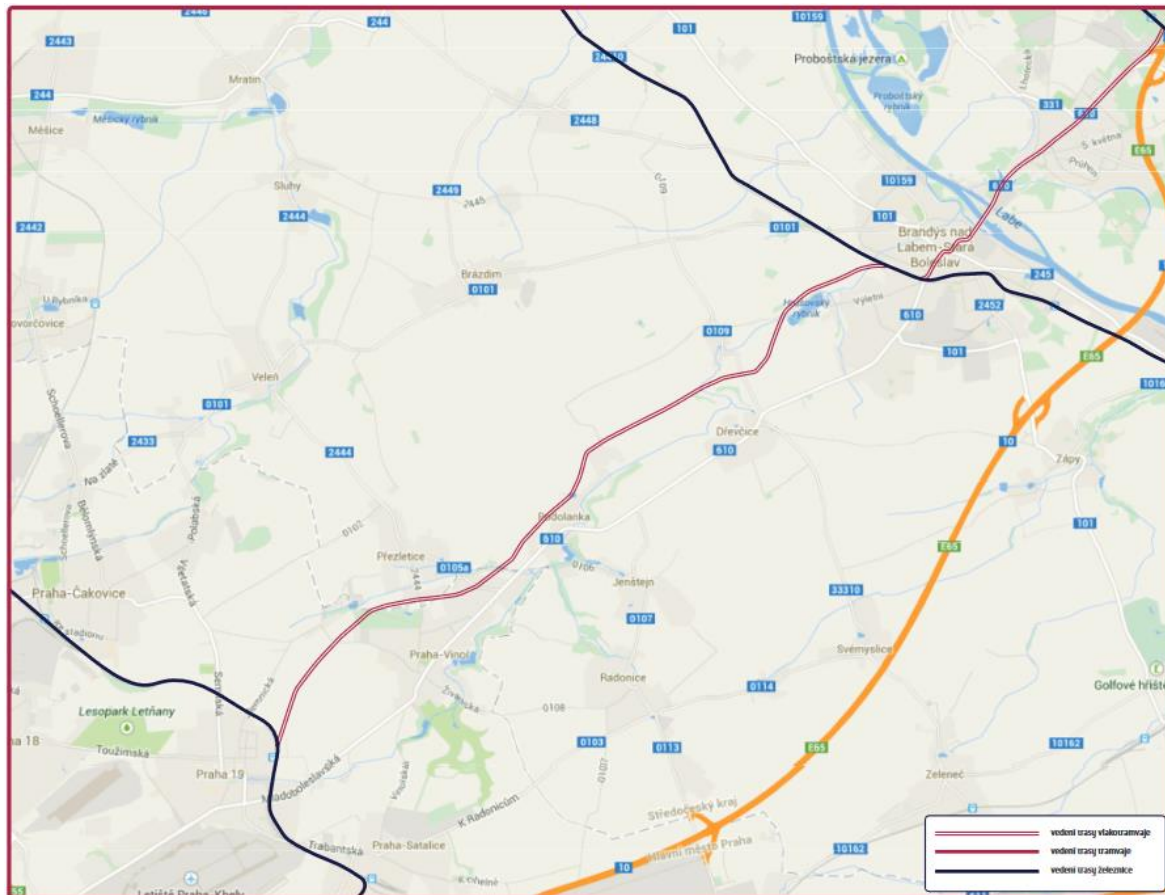
Dostupné z: <https://zdopravy.cz/stredocesky-kraj-zacina-zkoumat-moznou-promenu-trati-do-dobrise-pro-vlakotramvaje-141206/>

- [25] Základy konstrukce kolejových vozidel. In: Studium - podklady pro studium na Fakultě strojní [online]. FS ČVUT, 2022 [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: [https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2213018\\_ZKKV/ZKKV\\_2022.pdf](https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2213018_ZKKV/ZKKV_2022.pdf)
- [26] Poslední dny úzkorozchodné tramvaje. In: Novinky [online]. Liberec: Seznam.cz a.s., 2021 [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/domaci-posledni-dny-uzkorozchodne-tramvaje-40363206>
- [27] Konstrukční uspořádání koleje: Rozchod a rozšíření rozchodu koleje. In: Fakulta stavební VUT v Brně [online]. Brno: VUT v Brně, 2022 [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: [https://www.fce.vutbr.cz/zel/plasek.o/studium/1\\_rozchod\\_a\\_rozsireni\\_rozchodu.pdf](https://www.fce.vutbr.cz/zel/plasek.o/studium/1_rozchod_a_rozsireni_rozchodu.pdf)
- [28] Teorie vozidel: přednášky - část kolejová vozidla. In: Studium - podklady pro studium na Fakultě strojní [online]. FS ČVUT, 2019 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: [https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211054\\_TV/Teorie%20vozidel%20-%20Kalivoda%202019\\_04.pdf](https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2211054_TV/Teorie%20vozidel%20-%20Kalivoda%202019_04.pdf)
- [29] Motor Catalogue. In: Alstom [online]. Saint-Ouen, Francie: ALSTOM Transport, 2015 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20180627005859/http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Alstom%20Motors%20Catalogue%202015%20-%20English.pdf>
- [30] Flexity Swift: Das Zweisystem-Fahrzeug für Stadt und Region. In: AVG [online]. AVG Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, Tullastraße 71, 76131 Karlsruhe: AVG, 2009 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: [https://web.archive.org/web/20150923180718/http://www.avg.info/fileadmin/user\\_upload/avg/Stadtbahn\\_Heilbronn/Bilder/Broschuere\\_ET\\_2010.pdf#page=14#page=14](https://web.archive.org/web/20150923180718/http://www.avg.info/fileadmin/user_upload/avg/Stadtbahn_Heilbronn/Bilder/Broschuere_ET_2010.pdf#page=14#page=14)
- [31] GIRNAU, Günter, Adolf MÜLLER-HELLMANN a Friedhelm BLENEMANN. Stadtbahnen in Deutschland, innovative-flexibel-attraktiv = Light rail in Germany. Düsseldorf: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV-Förderkreie e. V., 2000. ISBN 3-87094-645-8.

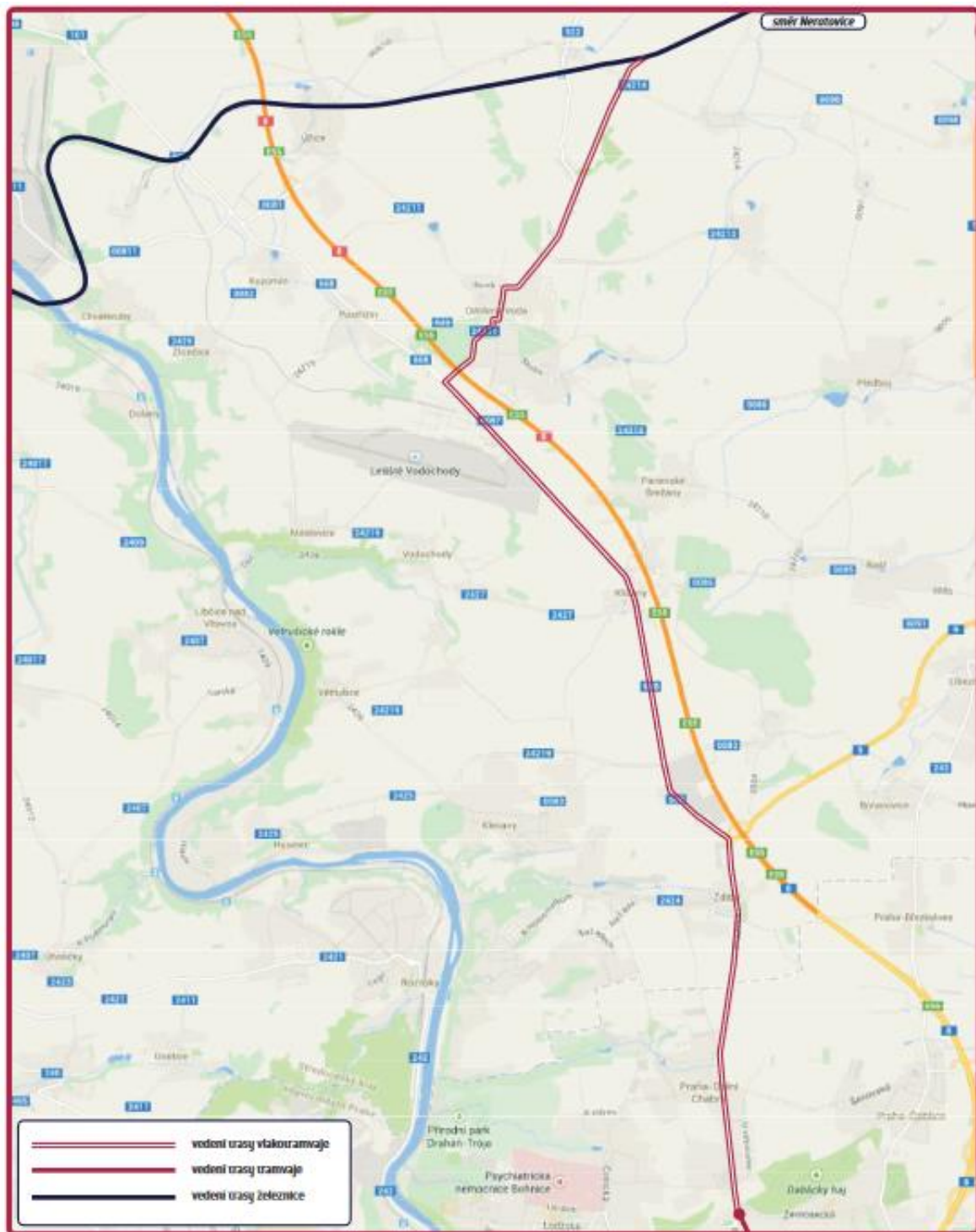
- [32] OPÁL: Sedadla pro regionální přepravu. In: MSV interior s.r.o. [online]. Tovární 894, Studénka [cit. 2023-05-18]. Dostupné z:  
<https://www.msvinterier.cz/produkce/sedadla/opal>
- [33] KOLÁŘ, Josef. Příslušenství kolejových vozidel. FS ČVUT, Praha, 2022. Dostupné také z:  
[https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2212020\\_PRKV/P%c5%99%c3%adslu%c5%a1enstv%c3%ad%20KV\\_2023.pdf](https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12120/2212020_PRKV/P%c5%99%c3%adslu%c5%a1enstv%c3%ad%20KV_2023.pdf)



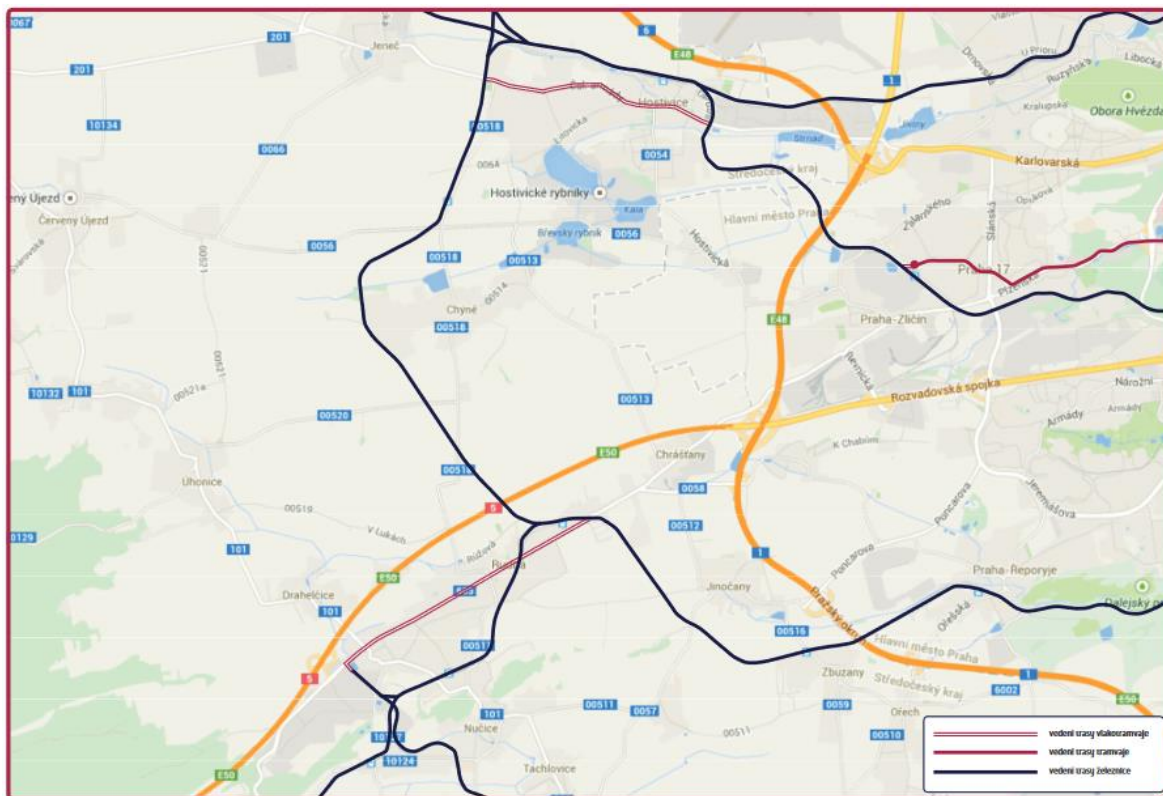
## Přílohy



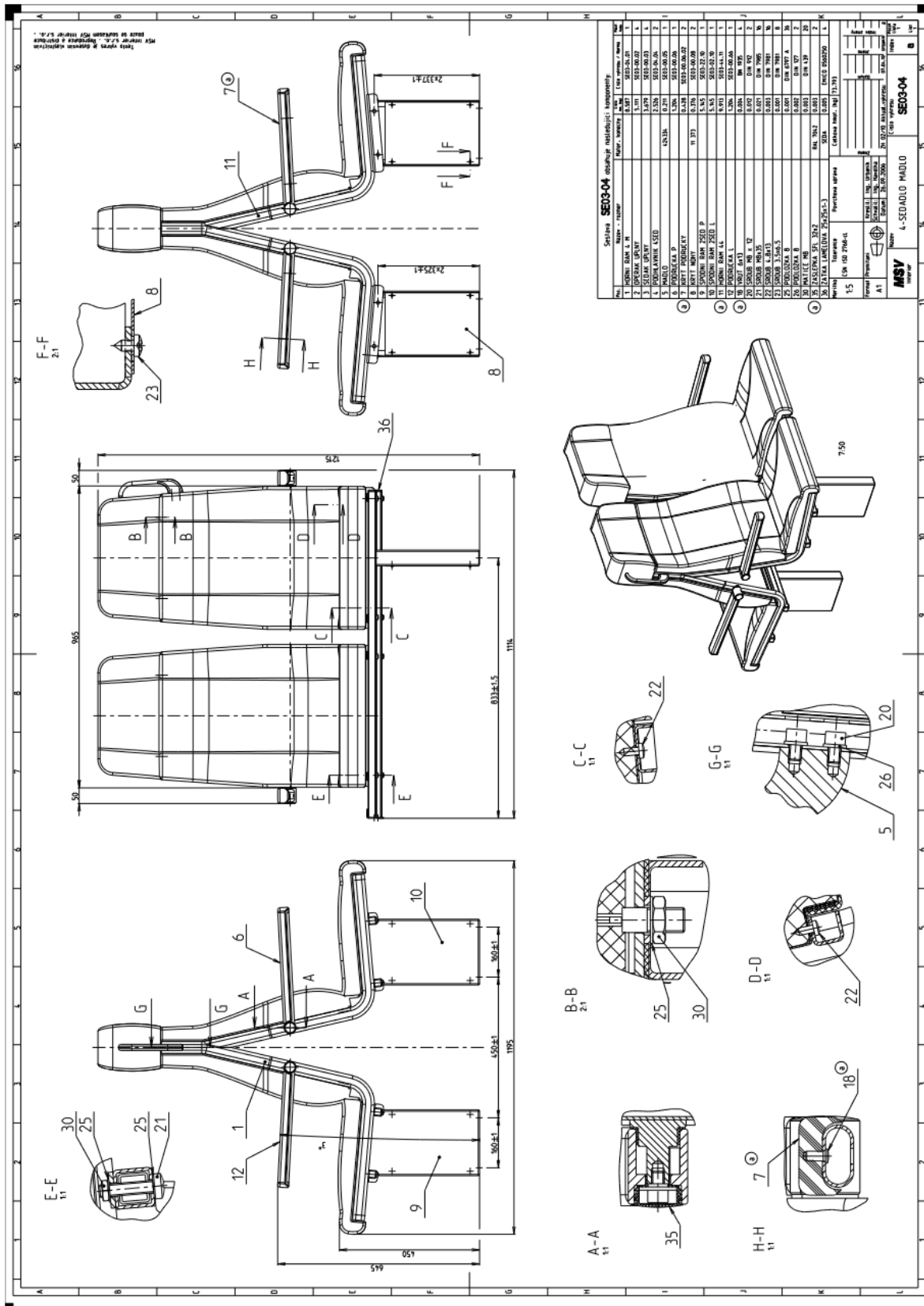
Příloha A: Trasa Praha – Brandýs nad Labem – Stará Boleslav [1]



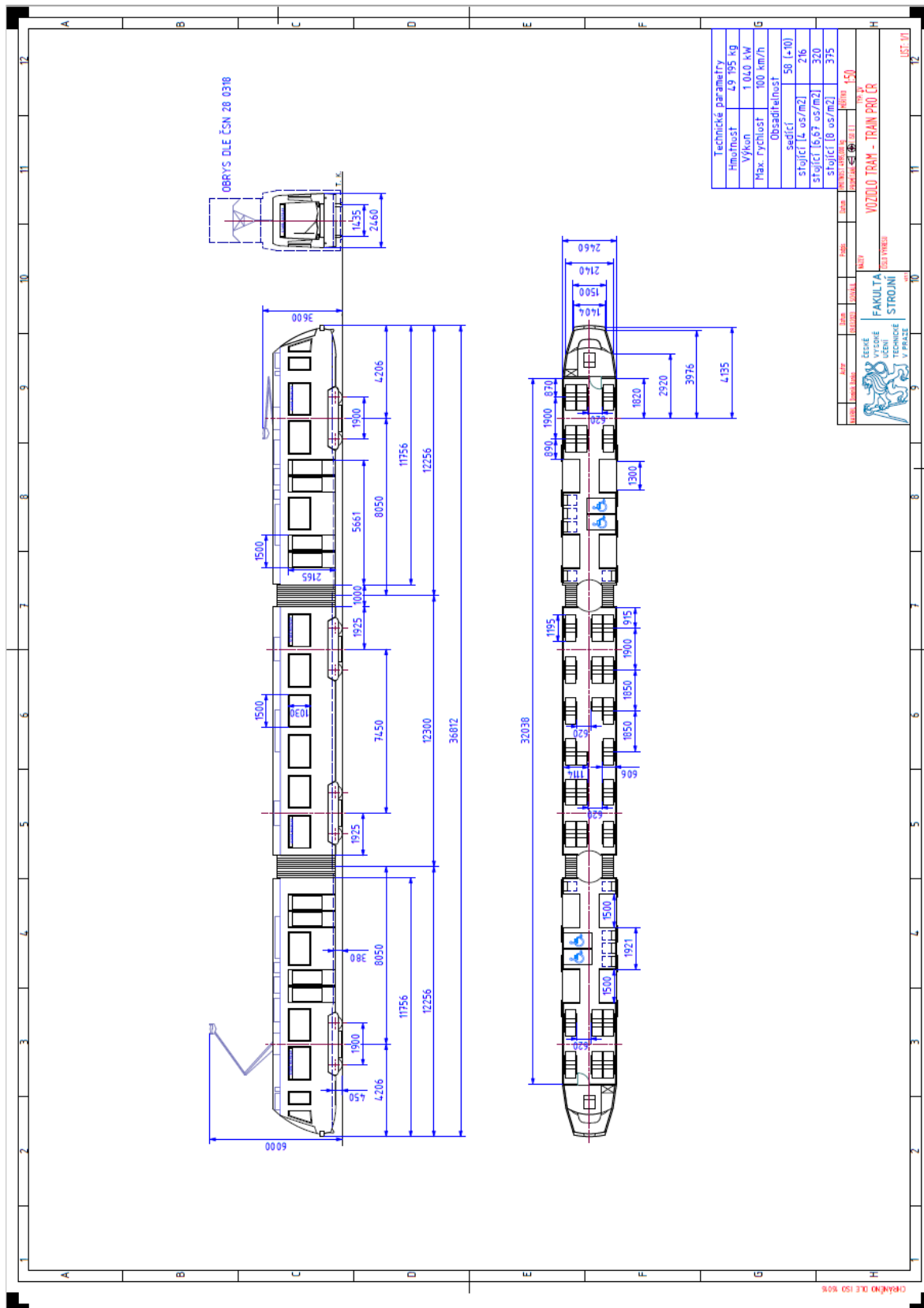
*Příloha B: Trasa Praha, Kobylice – Odolena Voda/Neratovice/Mělník [1]*



*Příloha C: Trasa Praha, Hlubočepy – Rudná a Beroun a trasa Praha, Sídliště Řepy – Hostivice – Chýně – (Rudná) [1]*



Příloha D: Sestavný výkres sedadel Opál slezské společnosti MSV interiéry [32]



Příloha E: Typový výkres navrženého vozidla Tram – Train v měřítku 1:50