

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojírenství  
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Úzkorozchodný tramvajový podvozek s nestandardním vypružením

Autor: **Jiří Vrtáček**  
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.**

Akademický rok 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří VRTÁČEK

Osobní číslo: S13B0294P

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: Dopravní a manipulační technika

Název tématu: Úzkorozchodný tramvajový podvozek s nestandardním vypružením

Zadávací katedra: Katedra konstruování strojů

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

Základní požadavky:

Navrhnete úzkorozchodný tramvajový podvozek s nestandardním vypružením.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše úzkorozchodných podvozků
2. Návrh vlastních variant
3. Výpočet pružiny
4. Sestavný výkres podvozku
5. Výkres vybraného dílu

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah kvalifikační práce: **30-40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**HELLER, P., DOSTÁL, J. Kolejová vozidla 3. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011**

*Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.**  
Regionální technologický institut  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Kořínek**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **19. září 2016**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Doc. Ing. Václava Laňová, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

**podpis autora**



## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Vrtáček	<b>Jméno</b> Jiří	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 “Dopravní a manipulační technika“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Heller,CSc.	<b>Jméno</b> Petr	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	54	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	44	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	10
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce obsahuje návrh úzkorozchodného tramvajového podvozku s nestandardním vypružením pomocí torzních tyčí ve dvou návrzích s výpočtem pomocí vzorců a grafickým řešením výpočtu pomocí programu NX 11 od firmy Siemens.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Tramvaj, Tram-train, podvozek, úzkorozchodný podvozek, torzní tyče

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Vrtáček	<b>Name</b> Jiří	
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 “Transport and handling machinery“		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Doc. Ing. Heller,CSc.	<b>Name</b> Petr	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLÓMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Narrow gauge bogie of tram with nonstandard springs		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	54	<b>TEXT PART</b>	44	<b>GRAPHICAL PART</b>	10
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This bachelor thesis contains two different designs of narrow gauge bogie for trams with nonstandard suspension, calculation of stress in torsion bars and graphic solution in software Siemens NX 11.
<b>KEY WORDS</b>	Tram, tram-train, bogie, narrow gauge bogie, torsion bars

## **Poděkování**

*Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Doc. Ing. Petru Hellerovi, CSc. za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat svojí rodině a blízkým přátelům za podporu při studiu.*

## Obsah

1. Úvod .....	10
2. Přehled nízkopodlažních tramvají a podvozků.....	11
2.1. Škoda .....	11
2.1.1. Škoda forcity alfa [7] .....	11
2.1.2. Škoda forcity classic [8] .....	11
2.1.3. Škoda forcity plus [9].....	12
2.1.4. Škoda forcity smart [10].....	13
2.2. Podvozky Bombardier .....	14
2.2.1. Neotočný podvozek S 1000 [2] .....	14
2.2.2. Podvozek FLEXX Urban 1000 [4].....	14
2.2.3. Podvozek FLEXX Urban 2000 [4].....	15
2.2.4. Podvozek FLEXX Urban 2500 [4].....	15
2.2.5. Podvozek FLEXX Urban 3000 [1].....	16
2.3. Podvozky Siemens .....	17
2.3.1. Neotočný Podvozek Combino SF 30C TFW [2][3] .....	17
2.3.2. Neotočný Podvozek Combino SF 30C LFW [2][3] .....	18
2.4. Podvozky Končar, Sames.....	19
2.4.1. Neotočný podvozek DG 1000 / DG 1235 [2] .....	19
2.5. Tramvaje Solaris .....	20
2.5.1. Tramvaj Solaris Tramino Jena [5].....	20
2.6. Podvozky Alstom [6] .....	21
2.6.1. Neotočný podvozek Arpège.....	21
2.6.2. Neotočný podvozek Corège.....	22
2.6.3. Podvozek Ipomos .....	23
2.6.4. Podvozek Ixège.....	24
2.6.5. Podvozek Iponam.....	25
2.6.6. Podvozek CL 300 .....	26
3. Návrh vlastních variant.....	27
3.1. První varianta .....	27
3.2. Druhá varianta .....	29
4. Výpočet pružiny .....	32
4.1. Početní řešení .....	33
4.1.1. Výpočet prázdné tramvaje.....	33
4.1.2. Výpočet plné tramvaje .....	36
4.1.3. Shrnutí .....	38
4.2. Grafické řešení.....	39
5. Závěr .....	41
Seznam obrázků .....	42
Zdroje.....	43
Přílohy .....	44

## Použité zkratky a symboly

ADA- (The Americans with disabilities act) je zákon zakazující diskriminaci a zajišťující stejné příležitosti pro osoby s postižením.

$m_{r1,2}$	[kg]	-	Hmotnost tramvaje působící na rameno
$m_{t1,2}$	[kg]	-	Hmotnost tramvaje
$F_{r1,2}$	[N]	-	síla působící na rameno
$R$	[mm]	-	délka ramena
$x_r$	[-]	-	Počet ramen
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	-	Gravitační zrychlení
$\tau_{k1,2}$	[MPa]	-	Napětí v krutu
$M_{k1,2}$	[MPa]	-	Kroutící moment
$W_k$	[mm <sup>3</sup> ]	-	Průřezový modul v krutu
$J_k$	[mm <sup>4</sup> ]	-	Kvadratický moment průřezu
$\rho$	[mm]	-	Vzdálenost krajního vlákna průřezu
$l$	[mm]	-	Délka torzní tyče
$G$	[MPa]	-	Modul pružnosti ve smyku (pro ocel $G = 8,1 \cdot 10^5$ MPa)
$\varphi_{1,2}$	[rad]	-	úhel zkroucení
$c$	[N/m]	-	tuhost torzní tyče



## 1. Úvod

Cílem této práce je konstrukční návrh nízkopodlažního tramvajového úzkorozchodného podvozku s vypružením pomocí torzních tyčí. Návrh má obsahovat dva hrubé konstrukční návrhy podvozků s vypružením pomocí torzních tyčí. Tato bakalářská práce obsahuje teoretickou a praktickou část. Teoretickou částí je řešení nízkopodlažních tramvají a podvozků. Praktická část obsahuje dva vlastní návrhy variant podvozků a výpočet torzních tyčí jak pomocí vzorců pro výpočet namáhání, tak výpočet pomocí MKP a zhodnocení výsledků těchto výpočtů. Další částí praktické části je výkres sestavy vybrané varianty podvozku a jeden výrobní výkres vybrané součásti tohoto podvozku.

## 2. Přehled nízkopodlažních tramvají a podvozků

### 2.1. Škoda

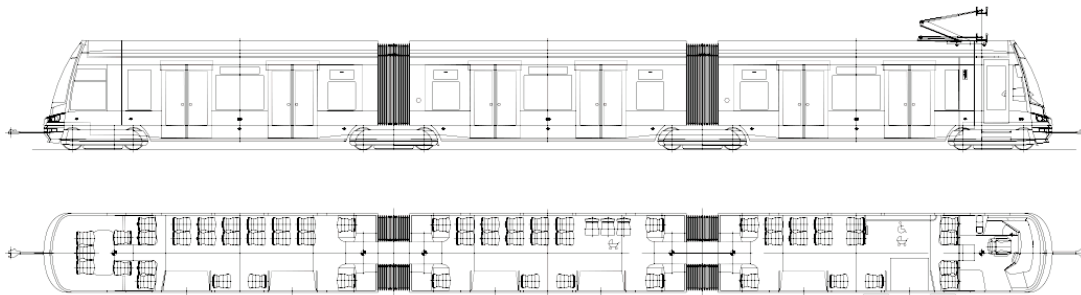
#### 2.1.1. Škoda forcity alfa [7]

Tramvaj značky Škoda forcity alfa je 100 % nízkopodlažní tramvaj s rozchodem dvojkolí pohybující se v rozmezí 950 – 1524 mm. Tramvaj Škoda forcity alfa využívá podvozků, jenž jsou plně otočné.

Šířka vozidla v závislosti na rozchodu dvojkolí se pohybuje v rozmezích 2300-2650 mm. Maximální výkon trakčního podvozku činí 184 kW (2 x 92kW). Tramvaj je konstruovaná jak obousměrná, tak i jednosměrná, rozdílem pak jsou kabiny řidiče v obou směrech jízdy pro obousměrnou tramvaj a nebo, jak je znázorněno na obrázku 1, je použita jen jedna kabina řidiče u jednosměrného typu tramvaje. Celková délka tramvaje činí 31 400 mm, výška s vysunutým sběračem je 3600 mm. Nástupní výška činí 320 mm.

Tramvaj je tvořena s volitelným počtem podvozků (tři až pět podvozků při zachování tří článků tramvaje), kdy lze dle požadavků zákazníka volit různé varianty podvozků hnacích a hnaných (např. tři podvozky a z toho tři hnací, čtyři podvozky a z toho tři hnací apod.).

Celkový výkon pohonu se pohybuje dle volby varianty v rozmezí výkonu 368kW až 920 kW, přičemž tramvaj je schopna uvést celkem 284 cestujících. V tramvaji je taktéž celkem 61 sedadel. Maximální rychlost tramvaje Škoda forcity alfa se pohybuje v rozmezí od 60 do 80 km/h. Podélná pevnost této tramvaje je až 400 kN.



Obr. 1: Typový výkres tramvaje Škoda forcity alfa [7]

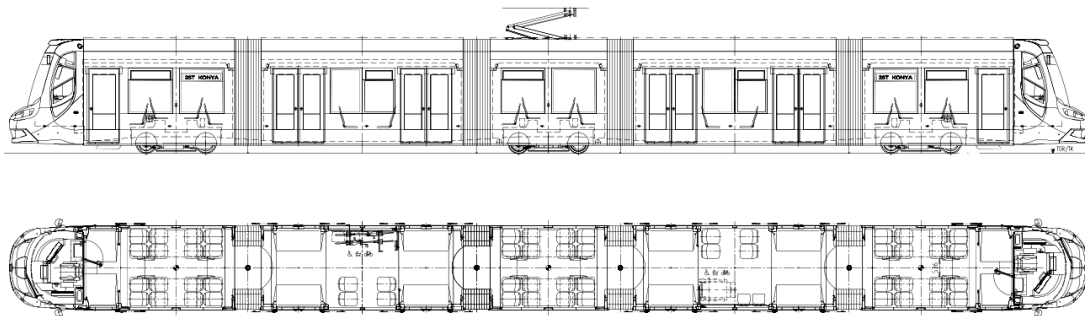
#### 2.1.2. Škoda forcity classic [8]

Tramvaj Škoda forcity classic je 100 % nízkopodlažní tramvaj s rozchodem dvojkolí 950-1524 mm. Maximální rychlost tramvaje činí 70 km/h. Podvozky použité u této tramvaje mají dobré chodové vlastnosti, kdy se jedná o podvozky neotočné. Tramvaj forcity classic je nejvíce univerzálního vozidlo na trhu značky Škoda.

Základní rozměry se odvíjejí od počtu článků a velikosti rozchodu dvojkolí. Šířka vozidla se pohybuje v rozmezích 2300-2650 mm jako tomu je u tramvaje forcity alfa. Celková délka tramvaje forcity classic s maximálně vyráběnými pěti články je 32 520 mm a výška s vysunutým sběračem činí 3560 mm. Nástupní výška činí 330 mm a tramvaj lze vyrobit jak v provedení jednosměrném, tak v provedení obousměrném.

Celkový výkon tramvaje dosahuje dle variant rozmezí 480 až 1 200kW. Dle vybrané varianty je možné použít dva až pět podvozků s různou kombinací hnacích a hnaných podvozků (nejčastější variantou jsou tři podvozky, z toho jsou dva nebo tři hnací a pěti články tramvaje, jako je tomu na obrázku 2).

Maximální počet cestujících je 364 osob, přičemž je v tramvaji celkem 56 míst k sezení.



Obr. 2: Typový výkres tramvaje Škoda forcity classic [8]

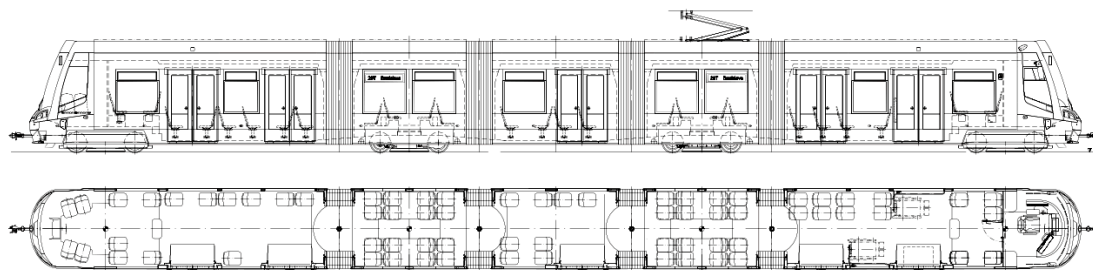
### 2.1.3. Škoda forcity plus [9]

V případě tramvaje Škoda forcity plus lze volit variantu jak s nízkopodlažností 100 %, tak s nízkopodlažností 80 %. Tato tramvaj využívá podvozků jak otočných, tak neotočných, kdy se u těchto tramvají užívá otočných podvozků v krajních člancích, v části za sedadlem řidiče, kdežto u spojovacích článků se užívá neotočných podvozků.

Podvozky této tramvaje mají rozchod v rozmezí 950-1524 mm. Šířka tramvaje se pohybuje v rozmezí od 2300-2650 mm. Tato tramvaj se vyrábí jak ve verzi jednosměrné, tak obousměrné. Celková délka tramvaje je 32 495 mm a výška je 3 560 mm s vytaženým sběračem.

Maximální rychlost tramvaje Škoda forcity plus je 80 km/h při výkonu pohybující se v rozmezí 480 až 1 200kW dle užití varianty (nejčastější varianty jsou čtyři podvozky, z nichž jsou čtyři hnací a tři podvozky, z nichž jsou tři hnací). Nejčastější variantou tramvaje je taková, která má 4 podvozky hnací a skříň tramvaje je z pěti článků tramvaje (obrázek 3).

Tramvaj je schopna pojmout až 356 cestujících při obsazenosti 8 osob na metr čtvereční, přičemž je zde 69 sedadel v případě jednosměrné a 52 sedadel v případě obousměrné tramvaje.



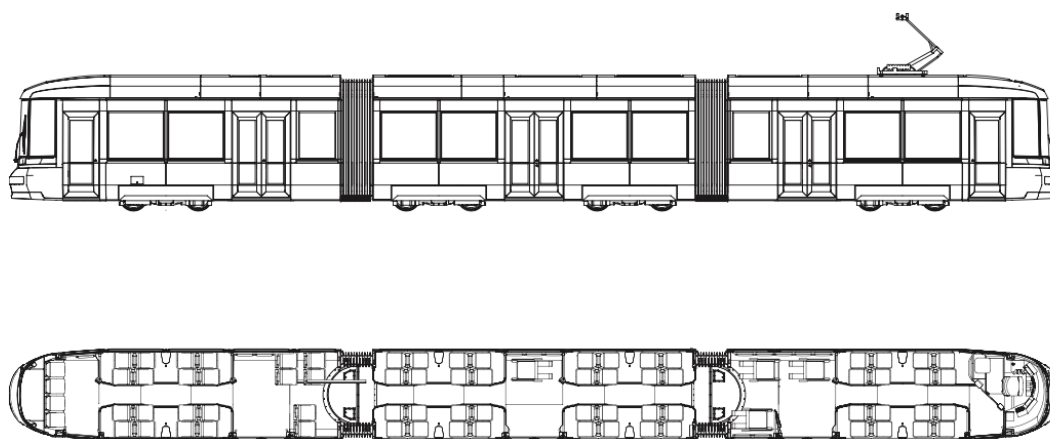
Obr. 3: Typový výkres tramvaje Škoda forcity plus [9]

#### 2.1.4. Škoda forcity smart [10]

Jedná se o tramvaj se 100 % nízkopodlažností, kdy je využito všech podvozků otočných. Tento podvozek má rozchod dvojkolí v rozmezí 950-1524 mm. Šířka Tramvaje se pohybuje od 2300 do 2650 mm. Tramvaj má maximální délku 27 600 mm a poskytuje prostor pro 213 cestujících s možností 88 míst k sezení, nástupní výška pro cestující je 360 mm.

Maximální rychlost tramvaje Škoda forcity smart je 80 km/h s výkonem pohybující se v rozmezí 240 až 1 200kW, dle variant (nejčastější variantami jsou čtyři podvozky, z nichž jsou čtyři hnací).

Tramvaj Škoda forcity smart je k vidění v severském hlavním městě Finska Helsinky. Konstrukce tramvaje určená pro Helsinky je přizpůsobena severskému klimatickému pásu, kdy je využito tříčlankové tramvaje se čtyřmi podvozky (obrázek 4), kde se dbalo na co největší komfort pro cestující. Pro tramvaje dodávané do Helsinek bylo důležité navrhnout výkonné topení a dokonce bylo využito teplo z brzd pro vytápění vnitřku tramvaje, která má 74 pevných sedadel a dalších 14 sklopných.



Obr. 4: Typový výkres tramvaj Škoda forcity smart [10]

## 2.2. Podvozky Bombardier

### 2.2.1. Neotočný podvozek S 1000 [2]

Jedná se o podvozek s nízkopodlažností 100 %. Rozchod dvojkolí tohoto podvozku je 1000 mm nebo standardních 1435 mm. K pohonu jsou použity 2 trakční motory s výkonem 2x 100kW. Podvozek používá dvojkolí s průměrem 560 mm, minimální možný průměr opotřebovaných kol činí 500 mm. Primární vypružení, zároveň i hlavní vedení zajišťují čtyři pryžové pružicí prvky na každé nápravě.

### 2.2.2. Podvozek FLEXX Urban 1000 [4]

Jde o podvozek s možností umístění rámu se 100 % nízkou podlahou. Tento podvozek se vyrábí s rozchodem 900 mm, 1000 mm nebo standardních 1435 mm. Je zde využito dvojkolí s průměrem kol 570 mm a rozvorem náprav 1850 mm. Nástupní výška pro cestující je 310 mm.

Maximální rychlost dosažitelná s tímto podvozkem se pohybuje okolo 70 km/h s předpokladem, že je využito trakčních motorů s výkonem 100kW, kdy je na každém podvozku využito dvou takovýchto motorů.

Hmotnost podvozku se pohybuje v rozmezí 3,3 až 4,7 tun dle použití rozchodu s možností přenést až 10 tun na nápravu.

Pro primární vypružení je použito pryžokovových silentbloků, jako sekundárního vypružení je využito čtyř vinutých pružin, kdy je použito jako dosedací plochy kluznic, a s dvěma pneumatickými tlumiči.



Obr. 5: Podvozek FLEXX Urban 1000 [4]



### 2.2.3. Podvozek FLEXX Urban 2000 [4]

Podvozek FLEXX Urban 2000 je koncipován jako podvozek s nízkopodlažností dosahující 70 % nízké podlahy. Podvozek se vyrábí s rozchodem mezi koly 1000 mm nebo standardních 1435 mm, kdy je využito nezávislé uložených kol bez nápravové hřídele. Podvozek využívá kol s průměrem 600 mm. Nástupní výška pro cestující je 350 mm a rozvorem 1850 mm.

Maximální rychlost se pohybuje taktéž okolo 70 km/h jako tomu bylo u podvozku FLEXX urban 1000 s tím rozdílem, že zde je použito trakčních motorů s výkonem v rozmezí 95 až 125 kW.

Hmotnost podvozku závisící na volbě rozchodu se pohybuje okolo 3 tun v případě úzkorozchodné varianty (rozchod 1000 mm) a 4,5 tun v případě standardního rozchodu kol, s tím, že je schopen pojmout zatížení až 9,25 tun na nápravu.

Pro primární vypružení je u tohoto podvozku použito taktéž silentbloků jako v případě podvozku FLEXX Urban 1000 a pro sekundární vypružení je použito dvou vinutých pružin s pneumatickými tlumiči.



Obr. 6: Podvozek FLEXX Urban 2000 [4]

### 2.2.4. Podvozek FLEXX Urban 2500 [4]

Podvozek FLEXX urban 2500 je podvozek vyráběný pouze se standardním rozchodem 1435 mm. Jedná se o částečně nízkopodlažní podvozek se 70 % nízkopodlažností. Kola pro tento podvozek mohou mít průměr v rozmezí 630 až 700 mm. Nástupní výška pro cestující je 580 mm a podvozek má rozvor 1800 mm.

Maximální dosažitelná rychlost činí 100 km/h s využitím motorů s výkonem v rozmezí 120 až 140 kW.

Hmotnost podvozku je 4,8 tun s možností zatížení až 11 tun na nápravu. Tento podvozek využívá tlumených kol, kdy je jízdní plocha věnce kola potažena pryží.



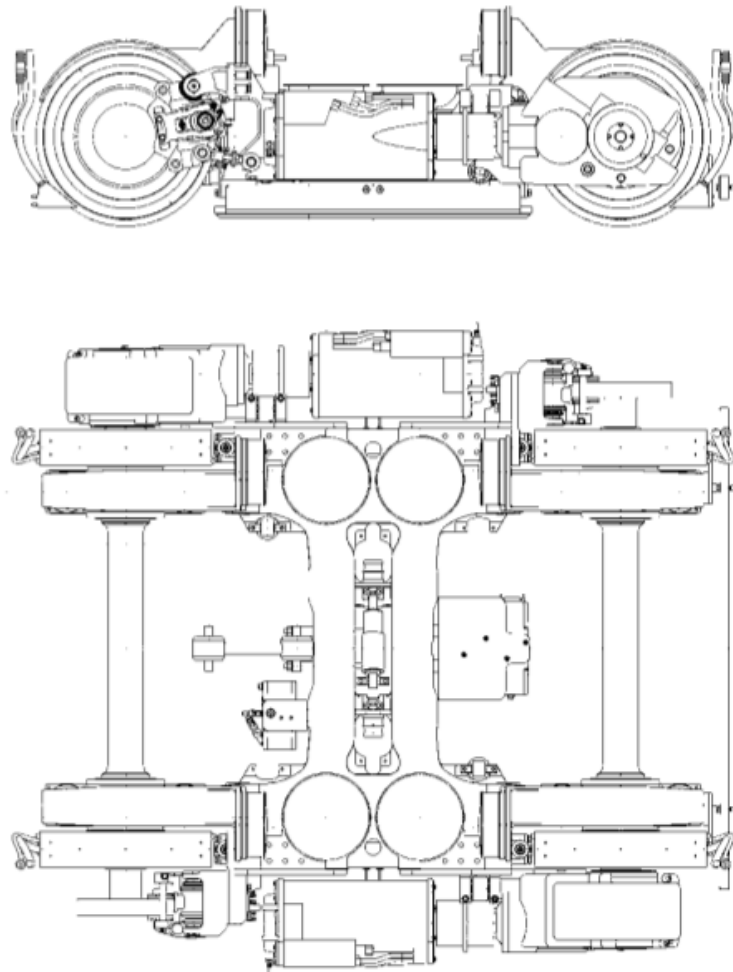
Obr. 7: Tram-train FLEXITY Swift využívající podvozek FLEXX Urban 2500 [14]

### 2.2.5. Podvozek FLEXX Urban 3000 [1]

Jedná se o podvozek, který je konstruován s 100 % nízkopodlažností. Vyrábí se jak s rozchodem dvojkolí 1000 mm tak i se standardním rozchodem 1435 mm. Vyrábí se s průměrem kol v rozmezí 560 až 640 mm. Rozvor tohoto podvozku je 1850 mm.

Maximální rychlost tohoto podvozku je 80 km/h s použitím trakčních motorů o výkonu 125 kW.

Celková hmotnost podvozku se pohybuje okolo 4,8 tun s možností zatížení až 12 tun na nápravu. Jako primární vypružení je využito pryžokovových válcových silentbloků, pro sekundární vypružení je použito taktěž pryžokovových silentbloků.



Obr. 8: Typový výkres podvozku FLEXX Urban 3000 [1]

## 2.3. Podvozky Siemens

### 2.3.1. Neotočný Podvozek Combino SF 30C TFW [2][3]

Tento podvozek je koncipován jako neotočný podvozek s 100% nízkou podlahou. Trakční motor je umístěn vně podvozku. Hnací agregát je pružně upevněn k rámu podvozku nízko nad temenem kolejnice. Toto řešení nese výhodu nízkého těžiště podvozku, dále také malé nízké těžiště neodpružené hmoty. Nejsou zde užívané standardně používané dvojkolí, ale volně otočná kola na nápravnici, kvůli čemuž je každé kolo hnané pomocí dvou trakčních motorů, přičemž je z trakčního motoru vyvedena hřídel do obou směrů.

Podvozek Combino SF 30C TFW se vyrábí jak se standardním rozchodem kol 1435 mm, tak i s rozchodem 1000 mm. Kola použita na tomto podvozku mají průměr 600 mm s nástupní výškou pro cestující 350 mm.

Tento podvozek dosahuje maximální rychlosti 70 km/h při užití motorů s výkonem v rozmezí 80 až 100 kW.

Hmotnost podvozku se pohybuje okolo 4,4 tun s maximální zátěží na nápravu o velikosti 10 tun. Primární pružení a vedení zajišťují pryžové silentbloky. Jako sekundární vypružení mezi rámem podvozku a skříní je využito šroubových pružin s paralelními tlumiči.



Obr. 9: Podvozek Combino SF 30C TFW [3]

### 2.3.2. Neotočný Podvozek Combino SF 30C LFW [2][3]

Tento podvozek je dalším vývojovým stupněm podvozků combino. Tyto podvozky jsou instalované v ose skříně tramvajového podvozku a jsou vertikálně pohyblivé o cca 4,5°. Další změnou je použití jiného primárního pružení a to pomocí čtyř silentbloků s paralelními tlumiči. Podvozky označené TFW jsou trakční, kdežto podvozky s označením LFW jsou běžné. Rozdílem na první pohled je uložení kotoučové brzdy, kdy trakční podvozky mají kotoučovou brzdou uloženou v hnacím agregátu hned vedle motoru, běžné mají brzdový kotouč vedle kola vně podvozku a brzdová jednotka je orientovaná dovnitř podvozku.

Podvozek Combino SF 30C LFW se vyrábí, jako je tomu u podvozku SF 30C TFW, se standardním rozchodem kol 1435 mm nebo s rozchodem kol 1000 mm. Rozvor kol činí 1800 mm s průměrem dodávaných kol 600 mm a nástupní výškou pro cestující 350 mm.

Celková hmotnost podvozku je okolo 3,1 tun s možností zátěže 10 tun na nápravu. Podvozek dosahuje maximální rychlosti 70 km/h s použitím motorů s výkonem v rozmezí 85 až 100 kW.



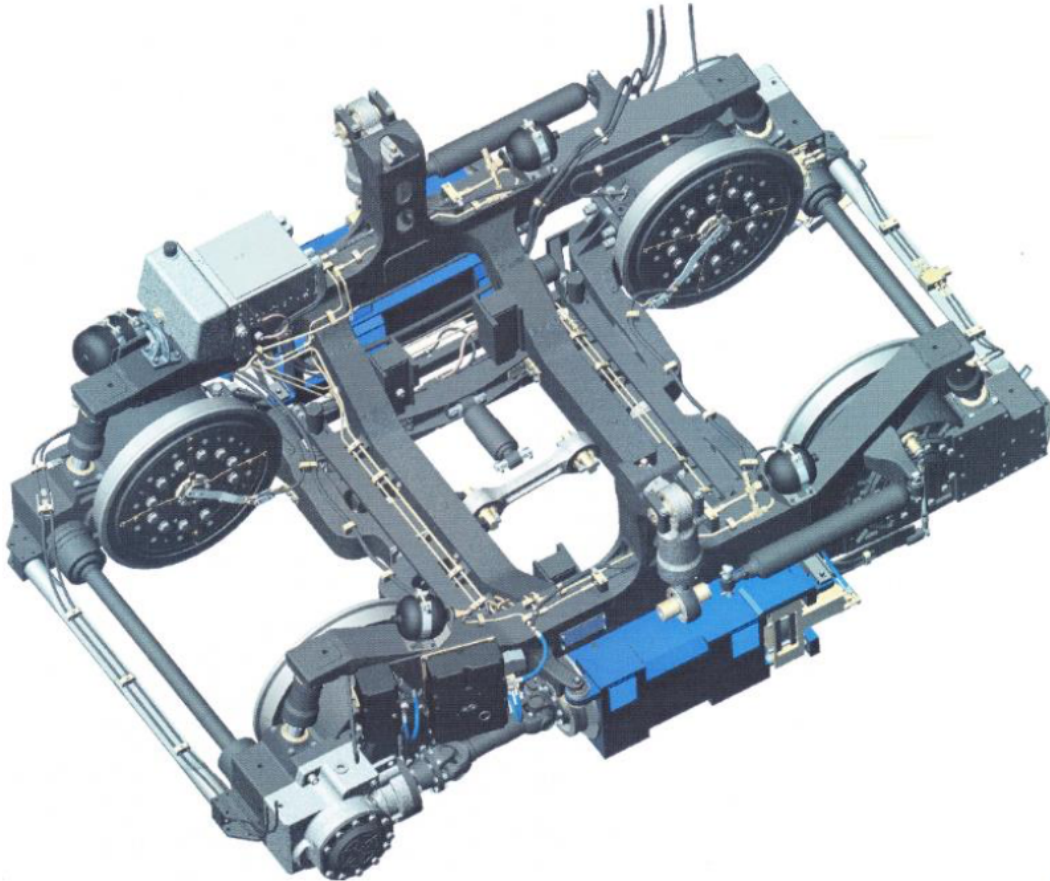
Obr. 10: Podvozek Combino SF30C TFW/LFW [3]

## 2.4. Podvozky Končar, Sames

### 2.4.1. Neotočný podvozek DG 1000 / DG 1235 [2]

Podvozek typu DG 1000 firmy SAMES má neobvykle řešený prostor mezi koly, při kterém není užito jak standardního dvojkolí, tak nápravnic. Kola průměru 660 mm jsou jednostranně uložena v ložiskových skříních, která tvoří rám a současně kývačku s hydropneumatickým primárním vypružením. Kola jsou spojena pomocí kuželové převodovky hřídelí, která nahrazuje nápravu. Takto uložená kola mají stejné vlastnosti jako standardní dvojkolí s pevnou nápravou, ale mají výhodu radiální stavitelnosti při jízdě v oblouku. Sekundární vypružení je také řešeno pomocí hydropneumatických pružin, díky čemuž reguluje výšku podlahy při jízdě na nerovné koleji. Tento podvozek pohání dva asynchronní trakční motory o výkonu 2 x 65 kW uložené podélně vně rámu podvozku.





Obr. 11: Neotočný podvozek DG 1000 [11]

## 2.5. Tramvaje Solaris

### 2.5.1. Tramvaj Solaris Tramino Jena [5]

Jde o tramvaj se 100 % nízkou podlahou s rozchodem 1000 mm nebo s rozchodem 1435 mm. Tramvaj Solaris Tramino Jena je dlouhá 32026 mm s celkovou šířkou 2400 mm. Výška tramvaje s vytaženým pantografem činí 3760 mm, přičemž nástupní výška pro cestující je 350 mm a vyrábí se jak jednosměrná, tak obousměrná.

Celá tramvaj je dělena na 5 částí skříně na které jsou namontovány celkem tři podvozky, kdy jsou dva podvozky hnací pomocí asynchronních motorů, při použití celkem čtyřech motorů s výkonem 4x90 kW se schopností vyvinout maximální rychlosti až 80 km/h.

Otočné podvozky jsou umístěné v krajních částech skříně za řidičem, kdežto zbývající neotočný podvozek je umístěn uprostřed vozidla, ve třetí části skříně, přičemž neotočný podvozek je hnaný.

Nápravnice je osazena koly o průměru 662 mm v novém stavu, minimální průměr použitého kola je 580 mm. Tramvaj Solaris Tramino Jena je schopna pojmout celkem 229 cestujících, z toho 181 stojících a dalších 48 sedících.



Obr. 12: Tramvaj Solaris Tramino Jena [13]

## 2.6. Podvozky Alstom [6]

### 2.6.1. Neotočný podvozek Arpège

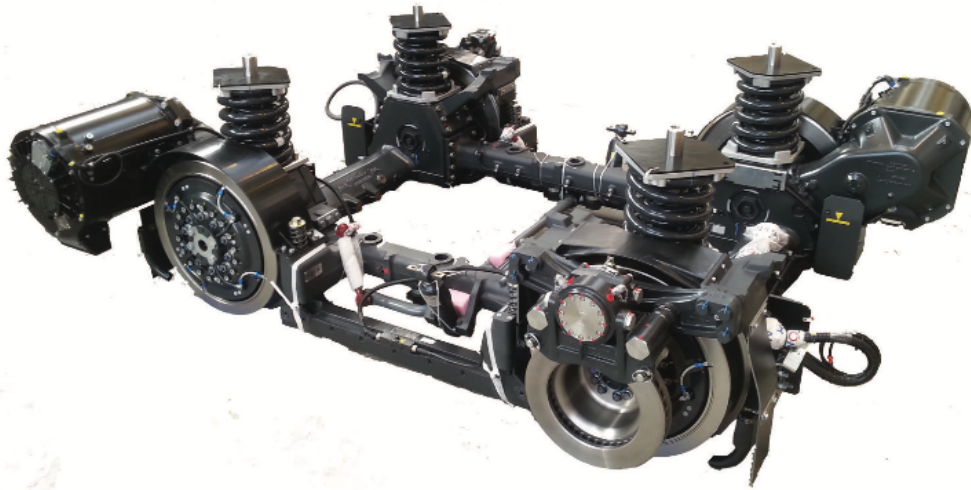
Podvozek Arpège od výrobce Alstom je podvozek se 100 % nízkou podlahou. Vyrábí se s rozchodem 1435 mm a rozvorem 1600 mm. Průměr nových kol činí 610 mm a minimálního možného průměru opotřebovaného kola ve velikosti 530 mm.

Maximální operativní rychlost tohoto podvozku je 70 km/h s použitím dvou motorů o výkonu 80 kW.

Celková hmotnost podvozku je 3,5 tun pro hnací podvozek a 2,5 tun pro hnaný podvozek, jedná se tedy o jeden z nejlehčích podvozků k dostání na trhu, přičemž poskytuje maximální zatížení na jednu osu ve velikosti 12,5 tun.

Tento podvozek nemá primární vypružení a o celkové vypružení se stará sekundární vypružení pomocí vinutých pružin s pneumatickými tlumiči. Podvozek je připevněn k rámu tramvaje pomocí 4 čepů.

Pro brždění jsou zde užity dvě hydraulické brzdy s magnetickými brzdami v případě hnacího podvozku, v případě hnaného je využito čtyřech hydraulických brzd s magnetickými brzdami.



Obr. 13: Neotočný podvozek Arpège [6]

### 2.6.2. Neotočný podvozek Corège

Podvozek Corège je podvozek se 100 % nízkou podlahou. Jeho rozchod činí 1435 mm a rozvor 1900 mm. Průměr kol činí 610 mm v novém stavu a minimálního průměru opotřebovaného kola ve velikosti 530 mm.

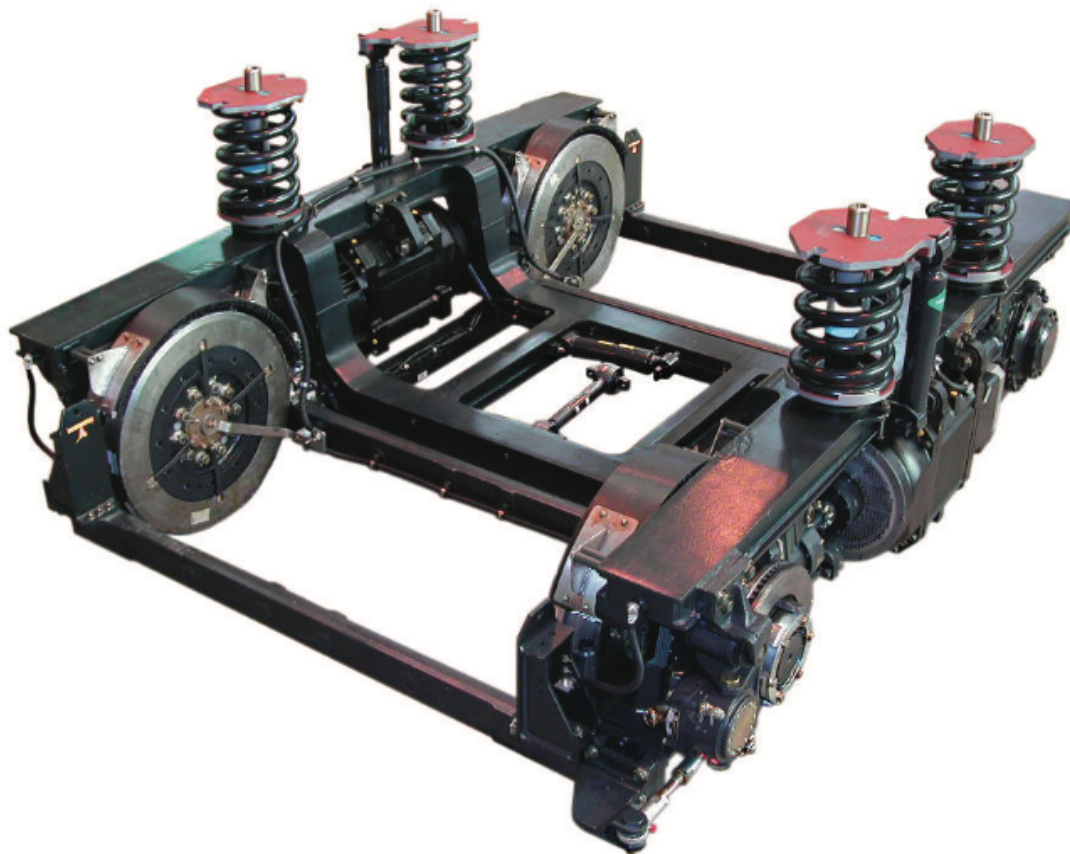
Podvozek je schopen operativní rychlosti v maximální výši 70 km/h s použitím dvou motorů o výkonu 80 kW.

Celková hmotnost podvozku je 4,2 tun v případě hnacího podvozku, v případě hnaného podvozku je hmotnost 3,1 tun s maximální zátěží na osu v hodnotě 11 tun.

Tento podvozek je konstruován pro nerovné tratě s využitím gumových ševronů jako primárního vypružení a v případě sekundárního vypružení je použito vinutých pružin jako v případě podvozku Arpège. K rámu tramvaje je taktéž, jako to je v případě podvozku Arpège, využito čtyř čepů.

Podvozek je konstrukčně navržen tak, že lze kola vyměnit bez nutnosti odmontování celého podvozku. Pro brždění je využito dvou hydraulických brzd v případě hnacího podvozku a v případě hnaného je využito dvou nebo čtyř hydraulických brzd.





Obr. 14: Neotočný podvozek Corègè [6]

### 2.6.3. Podvozek Ipomos

Jedná se o podvozek se 100 % nízkou podlahou s rozchodem 1520 mm a rozvorem 1850 mm. Průměr kol činí 630 mm a minimálního možného průměru opotřebovaných kol ve velikosti 560 mm.

Podvozek Ipomos je dělen na otočný a neotočný v závislosti na tom, zda-li je hnací nebo hnaný. V případě hnacího podvozku se jedná o otočný podvozek, spojený s rámem tramvaje pomocí podhlavníku s kroužkem. V případě hnaného podvozku se jedná o podvozek neotočný.

Podvozek umožňuje maximálního možného zatížení na osu o velikosti 11 tun s váhou podvozku 4,6 tun v případě hnacího podvozku a 2,9 tun v případě hnaného podvozku.

Jako primárního i sekundárního vypružení je zde užito vinutých pružin a díky kloubového rámu je schopen jezdit pohodlně po nerovné trati.

Tento podvozek je také konstruován pro použití při velmi nízkých teplotách pohybujících se okolo  $-40^{\circ}\text{C}$ , nejčastěji je využíván v Moskvě a Petrohradě.



Obr. 15: Otočný podvozek Ipomos [6]

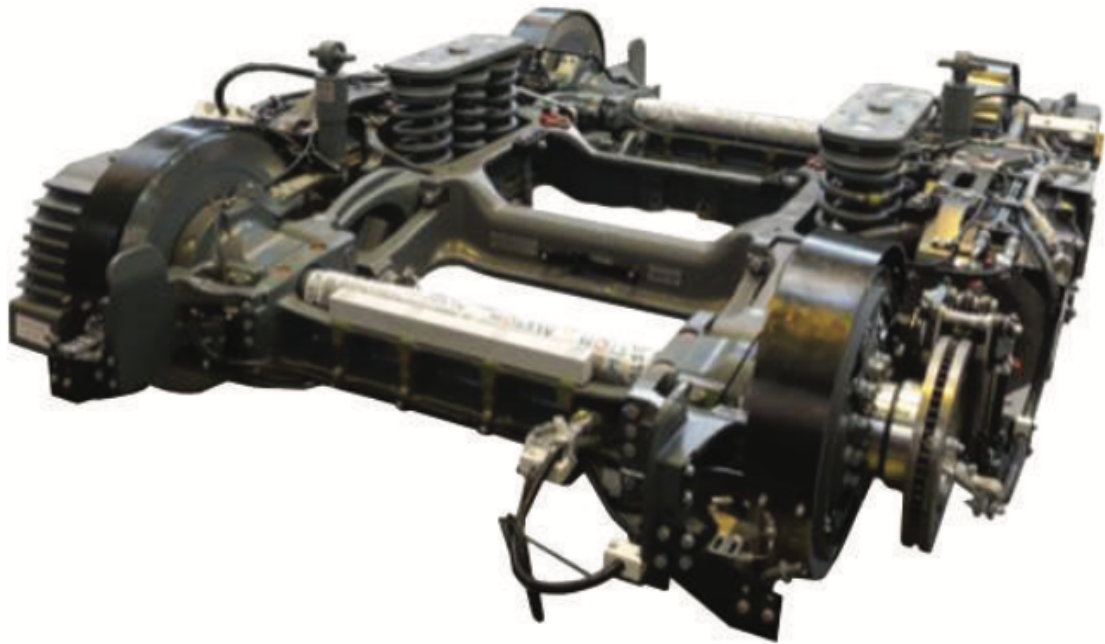
#### 2.6.4. Podvozek Ixège

Podvozek Ixège je podvozek s 100 % nízkou podlahou s rozchodem kol 1435 mm a rozvorem náprav 1850 mm. Pro tramvaje je využito kol s průměrem 590 mm v novém stavu a minimálního průměru 510 mm u opotřebovaných kol. V případě tram-train varianty je průměr kol 640 mm v novém stavu a minimální možný průměr činí 580 mm.

Podvozek může být otočný či neotočný u hnacího podvozku, u hnaného pouze neotočný.

Tento podvozek je schopen maximálního zatížení na osu o velikosti 13 tun s hmotností podvozku 4,2 tun v případě poháněného podvozku nebo 3,1 tun v případě nepoháněného.

Zároveň je tento podvozek schopen operativní rychlosti až do 100 km/h s využitím dvou hydraulických brzd u hnacího motoru a dvou nebo čtyř u hnaného podvozku. Tento podvozek se využívá v případě jak tramvajů, tak ve vozidlech tram-train. K rámu tramvaje nebo vozidla tram-train je připojen pomocí čepů u neotočného podvozku, u otočného je využito podhlavníku s kroužkem. Pro primární vypružení je zde užito gumových silentbloků, jako sekundárního vypružení je užito buď silentbloků nebo vinutých pružin.



Obr. 16: Podvozek Ixège [6]

### 2.6.5. Podvozek Iponam

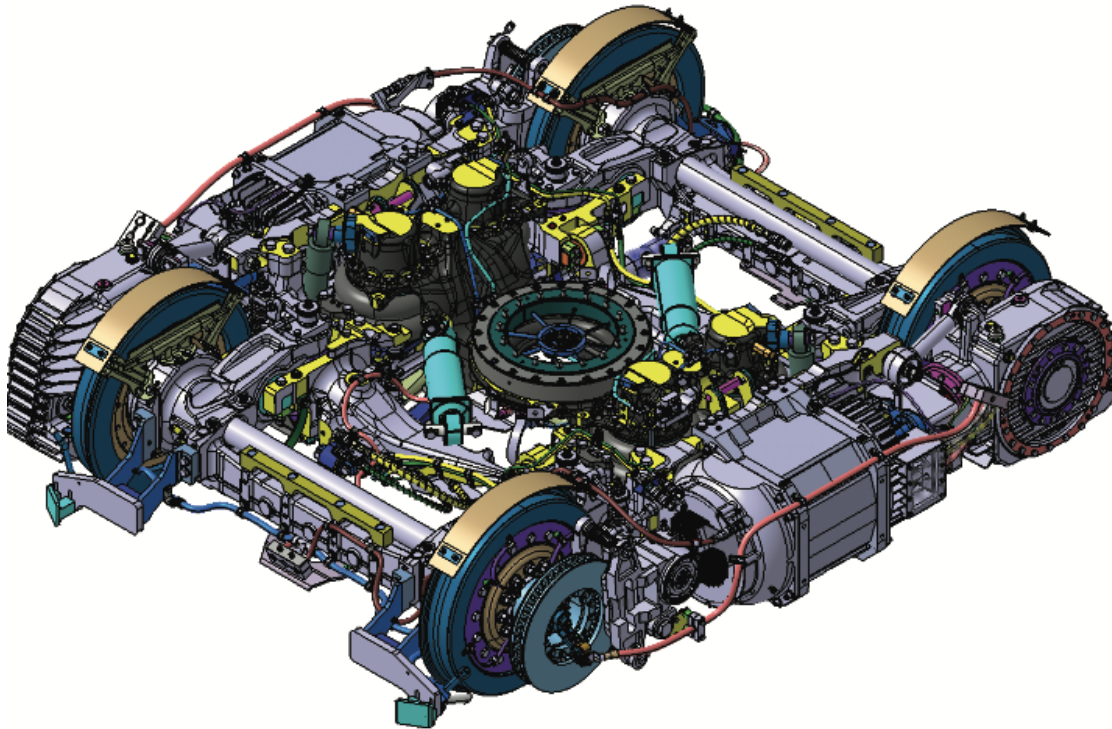
Jedná se o podvozek se 100 % nízkou podlahou s rozchodem kol 1435 mm a rozvorem 1900 mm. Pro tento podvozek je užito kol s průměrem 640 mm a minimálním možným průměru opotřebovaných kol s průměrem 570 mm.

Hnací podvozek je otočný, u hnaného podvozku se zákazník může rozhodnout mezi otočným a neotočným podvozkem.

Maximální možné zatížení na nápravu činí 13 tun s hmotností podvozku 5,3 tun u hnacího nebo 3,8 u hnaného podvozku. Maximální operativní rychlost se pohybuje okolo 100 km/h a podvozek je uzpůsoben jízdě po nerovném povrchu díky kloubovému rámu a jako v případě podvozku Ipomos.

Tento podvozek splňuje americké nařízení ADA (The Americans with disabilities act), proto je jako sekundárního vypružení užito pneumatických měchů umožňující proměnnou výšku tramvaje. Pro primární vypružení slouží vinuté pružiny.

U hnacího podvozku je užito dvou hydraulických kotoučových brzd, v případě hnaného podvozku čtyř hydraulických kotoučových brzd. Podvozek je schopen pracovat při velmi nízkých teplotách dosahujících až  $-40^{\circ}\text{C}$ . Tento podvozek bude v provozu od roku 2018 ve městě Ottawa v Kanadě.



Obr. 17: 3D model podvozku Iponam [6]

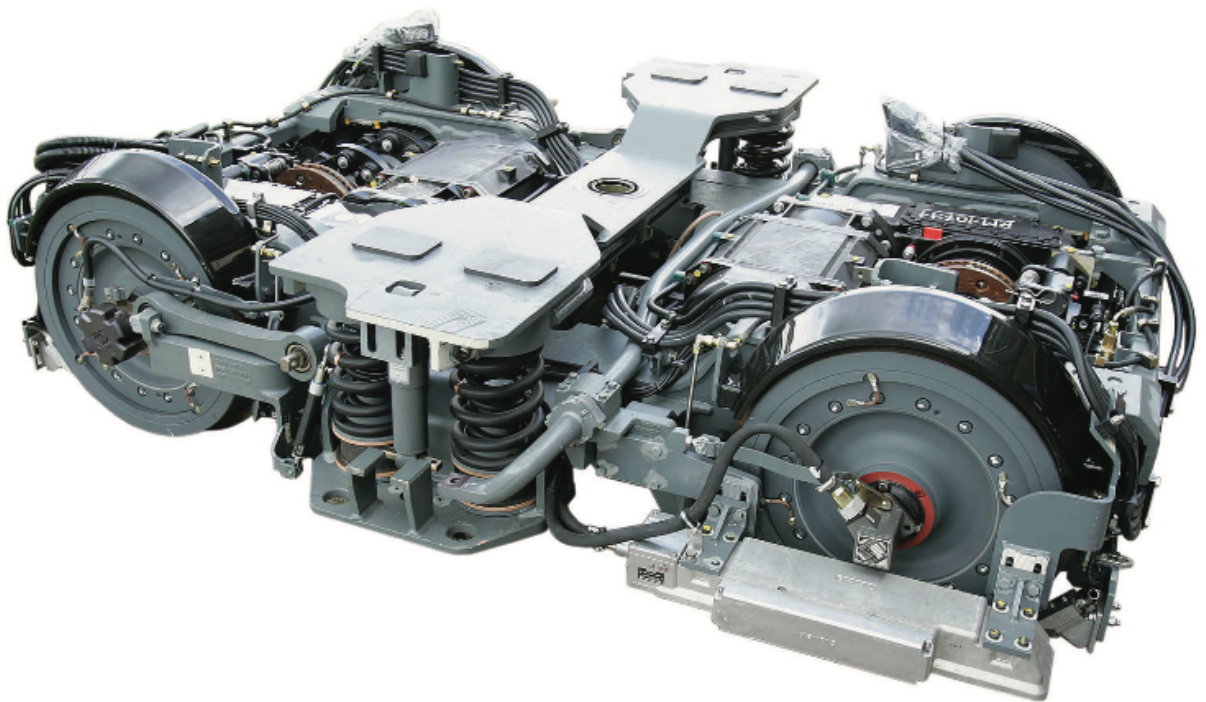
#### 2.6.6. Podvozek CL 300

Podvozek CL 300 je podvozek pro variantu tram-train. Rozchod kol tohoto podvozku je 1435 mm a rozvor náprav 1800 mm s průměrem kol 660 mm a minimálním možným průměru 580 mm.

Jak hnací tak hnaný podvozek je otočný s použitím podhlavníku s kroužkem. Maximální možné zatížení na nápravu je 11 tun s hmotností 5,6 tun v případě hnacího podvozku, případě hnaného podvozku váží 4,2 tun a dosahuje maximální operativní rychlosti 100 km/h.

Jak pro primární vypružení, tak i pro sekundární vypružení je využito vinutých pružin. U podvozku hnacího jsou použity dvě hydraulické kotoučové brzdy a magnetické brzdy, v případě hnaného podvozku je použito čtyř hydraulický kotoučových brzd a magnetické brzdy.





Obr. 18: Podvozek CL 300 [6]

### 3. Návrh vlastních variant

Tato práce se zabývá vypružením pomocí nestandardních pružících členů, v tomto případě se jedná o vypružení pomocí torzních tyčí. Vlastní návrhy variant jsou celkem dva, kdy první varianta používá torzní tyče jako primární vypružení. Jako druhá varianta je využito torzních tyčí u sekundárního vypružení. Oba konstrukční návrhy jsou neotočné úzkorozchodné podvozky.

#### 3.1. První varianta

První varianta se zabývá využitím torzních tyčí jako primárního vypružení. Torzní tyč této varianty je dutá, ocelová tyč s vnějším průměrem  $D = 90$  mm, vnitřním průměrem  $d = 75$  mm a účinnou délkou  $l = 592$  mm. Uchycení torzní tyče primárního vypružení je vyobrazeno na obrázku 19. Pro uchycení je důležité zachycení ohybových momentů, proto je torzní tyč uchycena těsně za kývačkou k rámu podvozku, kde je využito kluzného ložiska. Jako sekundární vypružení a zároveň přenosu podélných sil z podvozku na rám tramvaje je využito silentbloků.

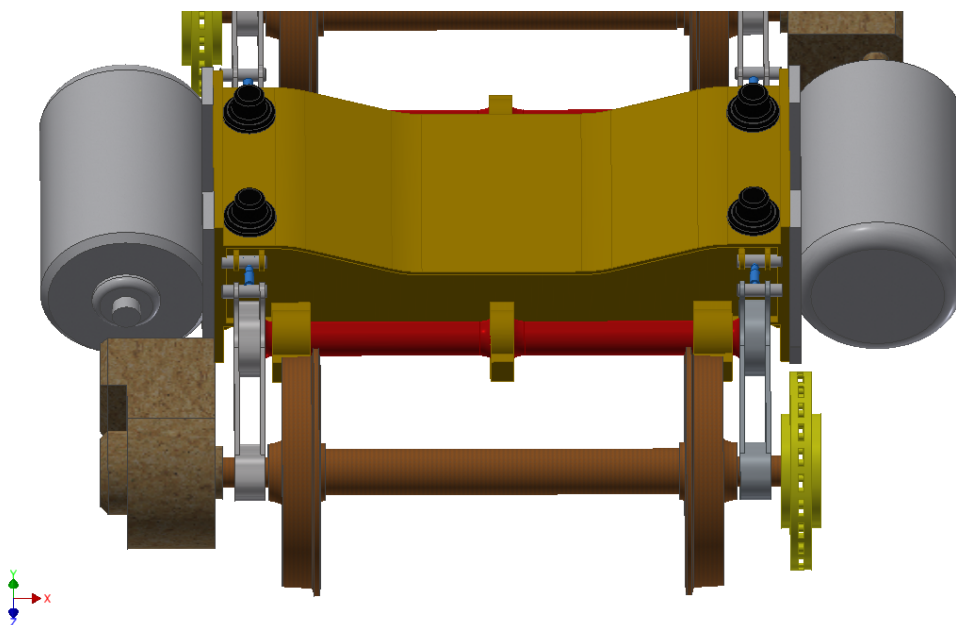


Upevnění dvojkolí k rámu je vyřešeno kývačkama, ke kterým jsou upevněny tlumiče kvůli tlumení kmitů (lze vidět na obrázku 19). Dvojkolí splňuje podmínku úzkorozchodného podvozku, tj. rozchod dvojkolí je 1000 mm .

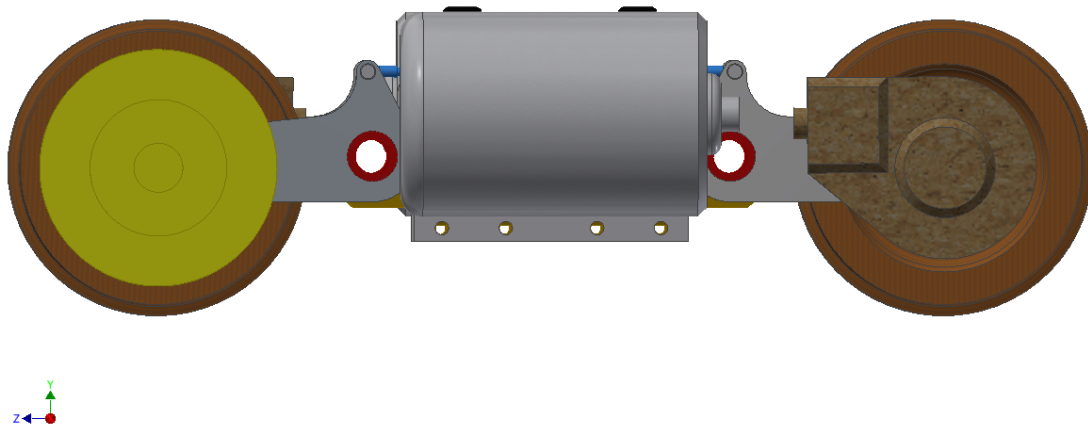
Motor je upevněn k rámu pomocí šroubů a je zde využito podložek pod motorem k redukci působení sil na upevňovací šrouby motoru, kdy jsou podložky připevněny čtyřmi šrouby k rámu (otvory pro šrouby lze vidět na obrázku 20). Motor použitý pro tuto variantu je hrubým návrhem motoru firmy Siemens s celkovým výkonem 90 kW.

Převodovka je hrubý konstrukční návrh konzultovaný s vedoucím bakalářské práce. Tento návrh je bohužel těžce proveditelný až nereálný, neboť je zde velmi obtížné uchytit převodovou skříň k rámu podvozku. Dále je velmi obtížné uchytit třmeny kotoučových brzd ke kývačce.

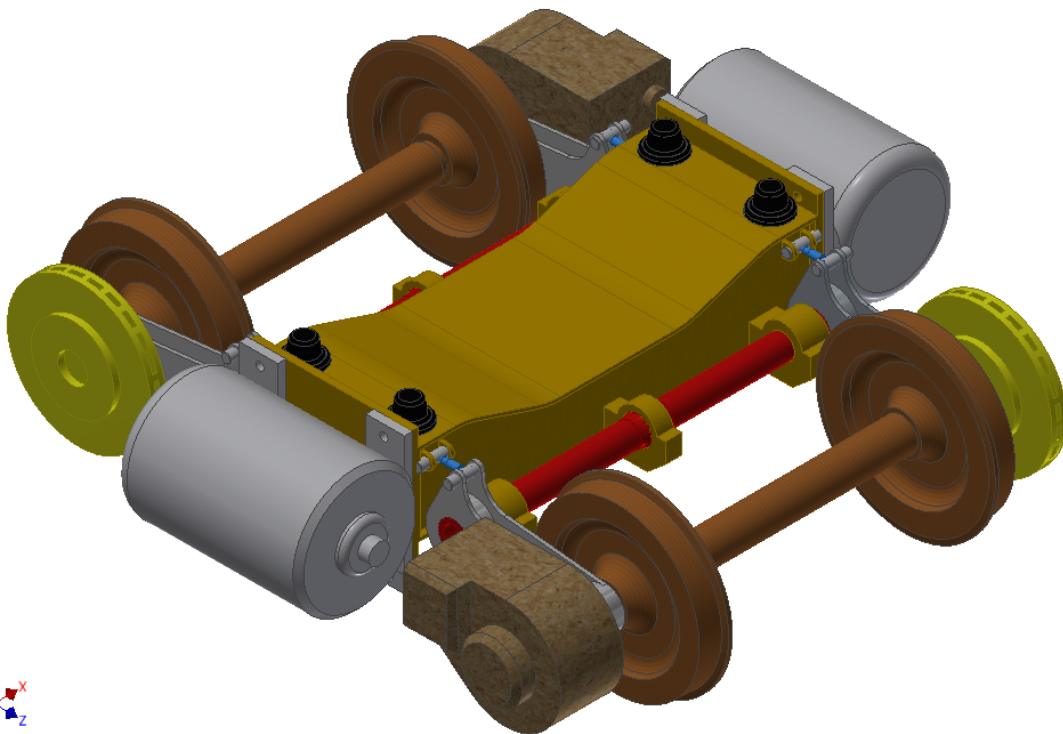
Tento podvozek je koncipován jako neotočný, i když by bylo možné na rám uchytit tornu a tím by se dalo pracovat s konceptem otočného podvozku.



Obr. 19: Uchycení primárního vypružení první varianty



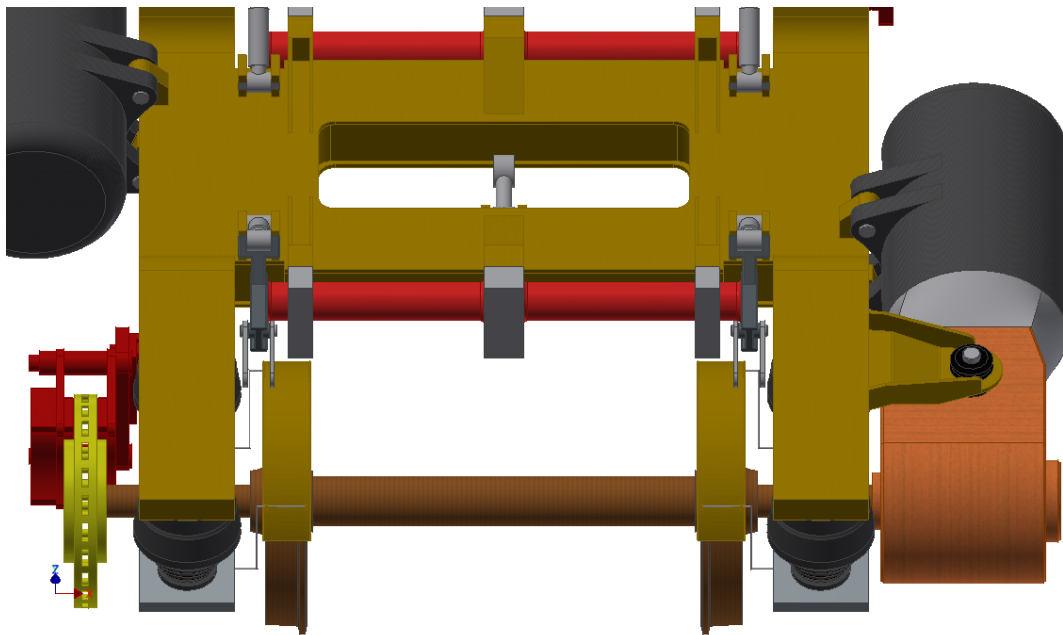
Obr. 20: Pohled z boku první varianty



Obr. 21: Celkový pohled na první variantu

### 3.2. Druhá varianta

Druhá varianta využívá vypružení pomocí torzních tyčí jako sekundárního vypružení. Torzní tyče jsou, jako tomu je u první varianty, taktéž duté tyče s vnějším průměrem  $D = 95$  mm, vnitřním průměrem  $d = 85$  mm a účinnou délkou  $l = 526$  mm. Uchycení torzních tyčí k rámu lze vidět na obrázku 22. Jako primárního vypružení je využito pryžokovových kuželových silentbloků (obrázek 23).



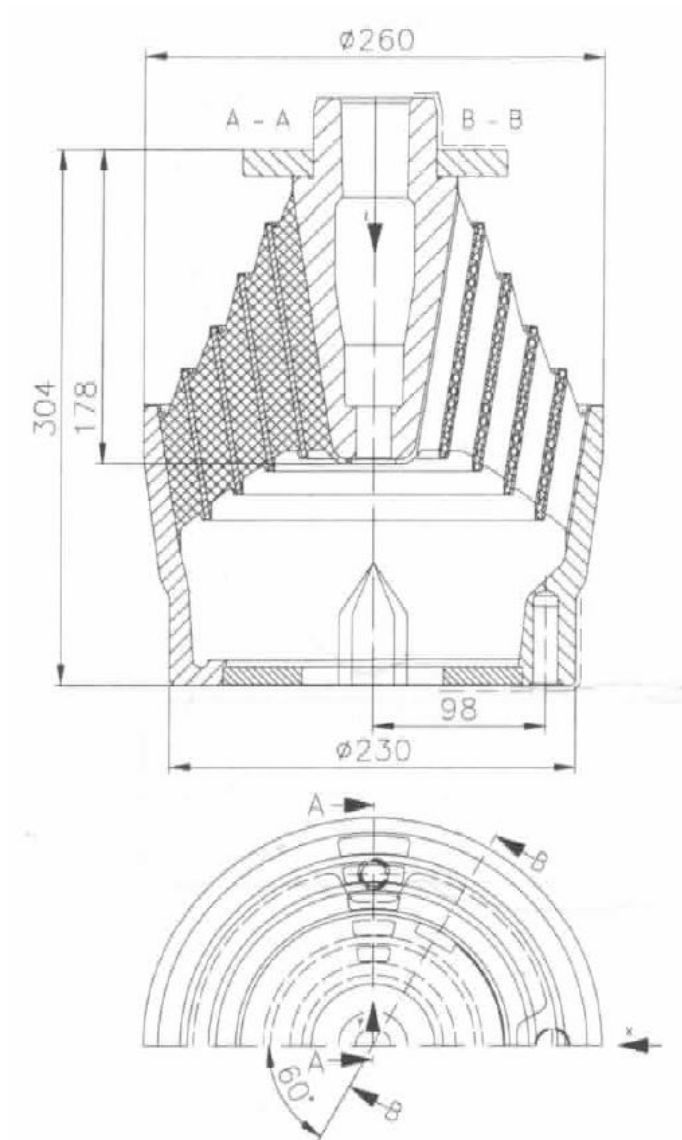
Obr. 22: Uchycení sekundárního vypružení druhé varianty

Torzní tyče jsou uchyceny na dvou místech, jako tomu bylo v první variantě. I zde je využito kluzných ložisek s domečky připevněnými k rámu podvozku zachycující ohybové momenty od rámu tramvaje.

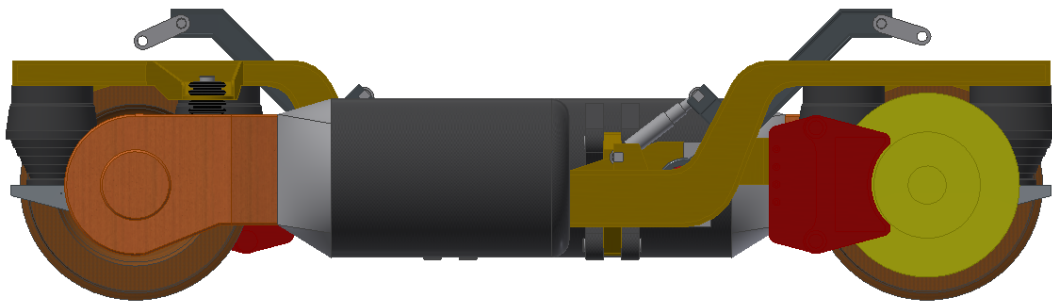
Motor použitý v této variantě je stejný jako u první varianty, kdy je jediným rozdílem uchycení k rámu podvozku. V tomto případě se jedná o uchycení pomocí dvou čepů.

Podélné síly od podvozku jsou přenášeny pomocí táhla, které je umístěno v otvoru uprostřed rámu podvozku. Kotoučová brzda užitá v této variantě je typově stejná jako brzda využitá u tramvaje Škoda T3 vyráběná firmou DAKO-CZ a.s.

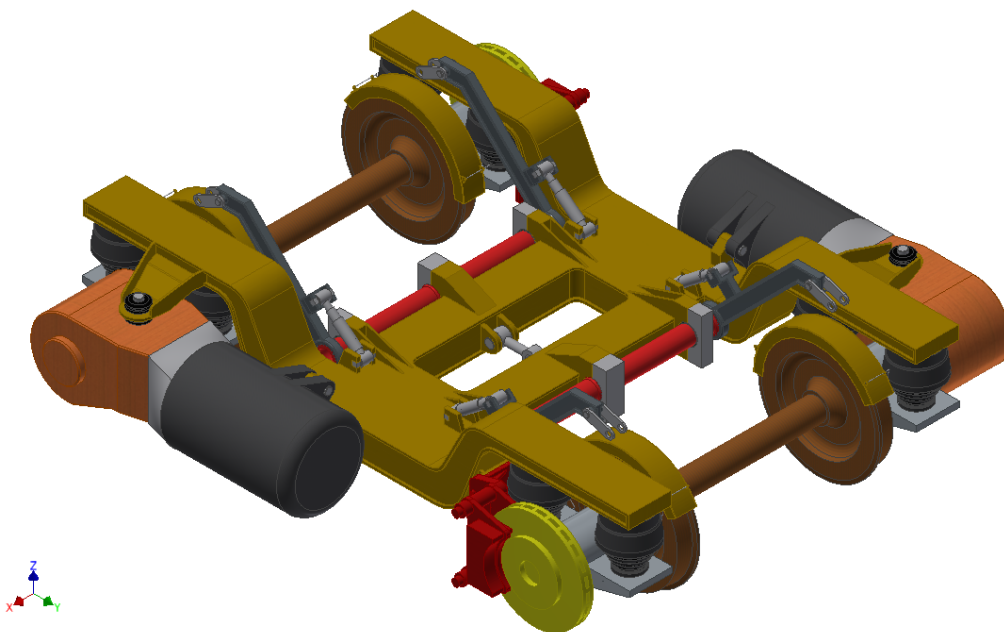
Pro přenos příčných sil jsou použita odlitá ramena se závěskami, které lze vidět na obrázcích 24 a 25. Pro tlumení kmitů jsou zde použity pneumatické tlumiče jako tomu bylo u první varianty.



Obr. 23: Produktový výkres kuželového pryžkovového silentbloku [15]



Obr. 24: Pohled z boku druhé varianty



Obr. 25: Celkový pohled na druhou variantu

## 4. Výpočet pružiny

Pro výpočet namáhání torzních tyčí je zvolena tramvaj Škoda 10T taktéž známá obchodním názvem Elektra. Jedná se o tříčlankovou nízkopodlažní tramvaj s dvěma podvozky vycházející z tramvaje Škoda 03T, známou pod obchodním názvem Astra nebo Anitra. Pro tuto tramvaj jsou použity dva podvozky umístěné v krajních člancích tramvaje. Celková hmotnost prázdného vozidla činí 28 800 kg, plně naloženého činí zhruba 39 060 kg.



Obr. 26: Tramvaj Škoda 10T Elektra [12]

## 4.1. Početní řešení

Jak bylo výše zmíněno, budeme uvažovat, že pro naše početní řešení použijeme dva experimentální podvozky. Výpočty budou provedeny pro dva stavy, a to pro stav kdy je tramvaj plně naložena a stav kdy je tramvaj prázdná. Platí, že torzní tyč má vnější průměr  $D = 95$  mm, vnitřní průměr  $d = 85$  mm a účinnou délku  $l = 526$  mm. Materiál torzní tyče je ocel 14 260.8, která má statické mezní napětí v krutu 830 MPa (dle TNŽ 28 2512).

### 4.1.1. Výpočet prázdné tramvaje

Prvním krokem je výpočet hmotnosti působící na jedno rameno experimentálního podvozku:

$$m_{r1} = \frac{m_{t1}}{x_r} \quad (1)$$

kde je:

- $m_{r1}$  .... Hmotnost prázdné tramvaje působící na rameno
- $m_{t1}$  .... Hmotnost prázdné tramvaje
- $x_r$  .... Počet ramen (při uvažování dvou podvozků je  $x_r = 8$ )

Po dosazení:

$$m_{r1} = \frac{28\,800}{8} = 3\,600 \text{ kg} \quad (2)$$

Z vypočítané hmotnosti určíme sílu působící na rameno pomocí vzorce:

$$F_{r1} = m_{r1} * g \quad (3)$$

kde:

$g$  .... Gravitační zrychlení (přibližně  $9,81 \text{ m/s}^2$ )

Po dosazení (2) do rovnice (3) získáváme:

$$F_{r1} = 3600 * 9,81 = 35\,316 \text{ N} \quad (4)$$

Pro určení napětí v krutu v torzní tyči použijeme vzorec:

$$\tau_{k1} = \frac{M_{k1}}{W_k} \quad (5)$$

kde:

$\tau_{k1}$  .... Napětí v krutu

$M_{k1}$  ... Kroutící moment

$W_k$  ... Průřezový modul v krutu

Dalším krokem je výpočet kroutícího momentu přenášeného na torzní tyč, délka ramena je dána  $R = 0,67 \text{ m}$ .

$$M_{k1} = F_{r1} * R = 35\,316 * 0,67 = 23\,661,7 \text{ Nm} \quad (6)$$

Po výpočtu kroutícího momentu vypočteme průřezový modul v krutu:

$$W_k = \frac{J_k}{\rho} \quad (7)$$

kde:

$J_k$  .... Kvadratický moment průřezu

$\rho$  .... Vzdálenost krajního vlákna průřezu

Protože se jedná o dutý kruhový průřez, tak v tomto případě platí, že:

$$J_k = \frac{\pi * (D^4 - d^4)}{32} \quad (8)$$

a

$$\rho = \frac{D}{2} \quad (9)$$

Po dosazení vztahů (8) a (9) do vzorce (7) a následnou úpravou získáme vzorec:

$$W_k = \frac{\pi*(D^4-d^4)}{16D} \quad (10)$$

Po dosazení daných hodnot  $D = 95$  mm a  $d = 85$  mm získáme:

$$W_k = \frac{\pi*(95^4-85^4)}{16*95} = 60\,455 \text{ mm}^3 \quad (11)$$

Dosazením výsledků ze vztahů (11) a (6) do vztahu (5) a převedením na stejné jednotky získáváme:

$$\tau_{k1} = \frac{23\,661\,700}{60\,455} = 391,4 \text{ MPa} \quad (12)$$

Další potřebnou veličinou je úhel zkroucení, který získáme výpočtem ze vzorce:

$$\varphi_1 = \frac{M_{k1}*l}{G*J_k} \quad (13)$$

kde:

$l$  .... Délka torzní tyče

$G$  .... Modul pružnosti ve smyku (pro ocel platí, že  $G = 8,1 * 10^5$  MPa)

Dosazením hodnot do vztahu (13) získáme:

$$\varphi_{1rad} = \frac{23\,661\,700*526}{8,1*10^5*2\,871\,612} = 5,35 * 10^{-3} \text{ rad} \quad (14)$$

Pro získání úhlu zkroucení ve stupních využijeme vzorec:

$$\varphi_{1deg} = \varphi_{1rad} * \frac{180}{\pi} = 0^\circ 18' 23,7'' \quad (15)$$

Další potřebná hodnota je tuhost torzní tyče, pro získání tuhosti využijeme vzorec:

$$C = \frac{G*\pi*(D^4-d^4)}{32*R^2*l} \quad (16)$$

Po dosazení hodnot získáváme:

$$C = \frac{8,1*10^5*\pi*(95^4-85^4)}{32*670^2*526} = 9850,89 \text{ N/mm} \quad (17)$$



#### 4.1.2. Výpočet plné tramvaje

Jediným rozdílem výpočtu plné tramvaje je ve váze, kdy plně zatížená tramvaj váží 39 060 kg.

$$m_{r2} = \frac{m_{t2}}{x_r} \quad (18)$$

kde je:

- $m_{r2}$  .... Hmotnost plné tramvaje působící na rameno
- $m_{t2}$  .... Hmotnost plné tramvaje
- $x_r$  .... Počet ramen (při uvažování dvou podvozků je  $x_r = 8$ )

Po dosazení:

$$m_{r2} = \frac{39\,060}{8} = 4882,5 \text{ kg} \quad (19)$$

Z vypočítané hmotnosti určíme sílu působící na rameno pomocí vzorce:

$$F_{r2} = m_{r2} * g \quad (20)$$

kde:

- $g$  .... Gravitační zrychlení (přibližně  $9,81 \text{ m/s}^2$ )

Po dosazení (19) do rovnice (20) získáváme:

$$F_{r2} = 4882,5 * 9,81 = 47\,897,3 \text{ N} \quad (21)$$

Pro určení napětí v krutu v torzní tyči použijeme vzorec:

$$\tau_{k2} = \frac{M_{k2}}{W_k} \quad (22)$$

kde:

- $\tau_{k2}$  .... Napětí v krutu
- $M_{k2}$  ... Kroučící moment
- $W_k$  ... Průřezový modul v krutu

Dalším krokem je výpočet kroučícího momentu přenášeného na torzní tyč, délka ramena je dána  $R = 0,67 \text{ m}$ .

$$M_{k2} = F_{r2} * R = 47\,897,3 * 0,67 = 32\,091,2 \text{ Nm} \quad (23)$$

Po výpočtu kroučícího momentu vypočteme průřezový modul v krutu:

$$W_k = \frac{J_k}{\rho} \quad (24)$$

kde:

- $J_k$  .... Kvadratický moment průřezu
- $\rho$  .... Vzdálenost krajního vlákna průřezu

Protože se jedná o dutý kruhový průřez, tak v tomto případě platí, že:

$$J_k = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{32} \quad (25)$$

a

$$\rho = \frac{D}{2} \quad (26)$$

Po dosazení vztahů (25) a (26) do vzorce (24) a následnou úpravou získáme vzorec:

$$W_k = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{16D} \quad (27)$$

Po dosazení daných hodnot  $D = 95$  mm a  $d = 85$  mm získáme:

$$W_k = \frac{\pi \cdot (95^4 - 85^4)}{16 \cdot 95} = 60\,455 \text{ mm}^3 \quad (28)$$

Dosazením výsledků ze vztahů (28) a (23) do vztahu (22) a převedením na stejné jednotky získáváme:

$$\tau_{k2} = \frac{32\,091\,200}{60\,455} = 530,8 \text{ MPa} \quad (29)$$

Další potřebnou veličinou je úhel zkroucení, který získáme výpočtem ze vzorce:

$$\varphi_2 = \frac{M_{k2} \cdot l}{G \cdot J_k} \quad (30)$$

kde:

$l$  .... Délka torzní tyče

$G$  .... Modul pružnosti ve smyku (pro ocel platí, že  $G = 8,1 \cdot 10^5$  MPa)

Dosazením hodnot do vztahu (30) získáme:

$$\varphi_{2rad} = \frac{32\,091\,200 \cdot 526}{8,1 \cdot 10^5 \cdot 2\,871\,612} = 7,26 \cdot 10^{-3} \text{ rad} \quad (31)$$

Pro získání úhlu zkroucení ve stupních využijeme vzorec:

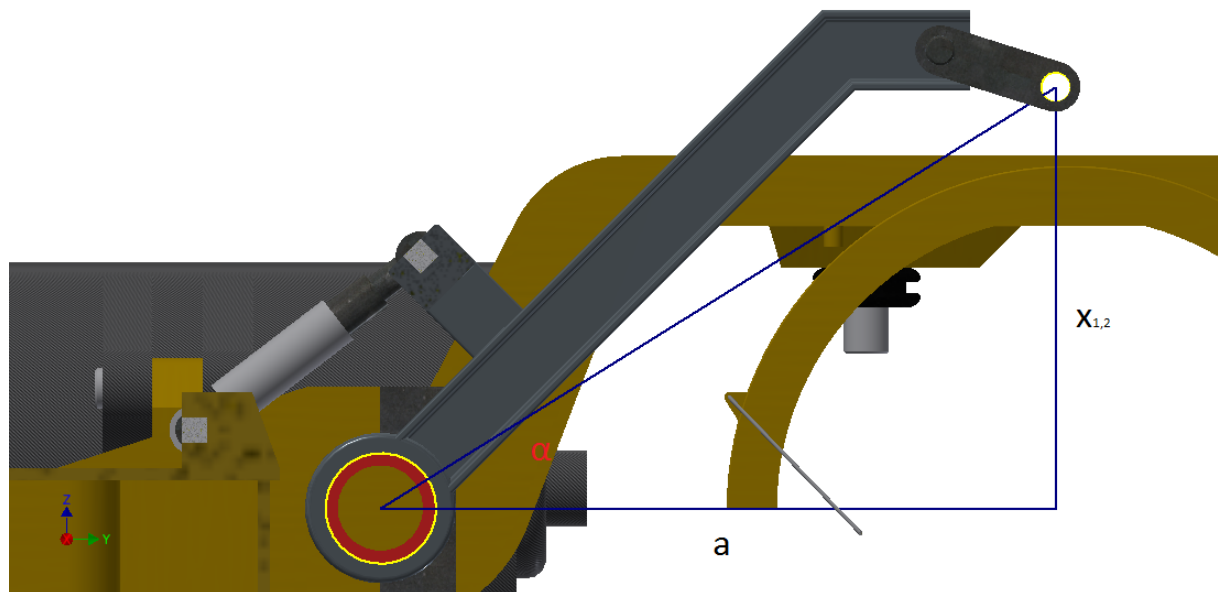
$$\varphi_{2deg} = \varphi_{2rad} \cdot \frac{180}{\pi} = 0^\circ 24' 56,9'' \quad (32)$$

### 4.1.3. Shrnutí

Materiál torzní tyče je ocel 14 260.8. Tento materiál má statické mezní napětí v krutu 830 MPa. Dle vypočtených hodnot pro dva stavy zatížení torzních tyčí lze vyčíst, že je splněna podmínka:

$$\tau_{k1,2} \leq \tau_{Dk} \quad (33)$$

Dalším důležitým výpočtem byl výpočet natočení torzní tyče, ze které získáme pokles skříně tramvaje při plném zatížení. Pro určení rozdílu je potřeba doplnit úhel středů os spoje torzní tyče a ramene a dále osu upevnění rámu k podvozku, který je  $\alpha = 39^\circ 30'$  a vzdálenost odvěsny pomyslného trojúhelníku  $a = 600$  mm. Pomyslný trojúhelník lze vidět na obrázku 27.



Obr. 27: Pomyslný trojúhelník

Díky těmto hodnotám můžeme dopočítat pomocí goniometrických funkcí velikost druhé odvěsny pomyslného trojúhelníku a jejich odečtením získáme rozdíl poklesu skříně  $x$ :

$$\tan \alpha_{1,2} = \frac{x_{1,2}}{a} \quad (34)$$

po úpravě získáme:

$$x_{1,2} = \tan \alpha_{1,2} * a \quad (35)$$

Pro výpočet je důležité určit hodnoty  $\alpha_{1,2}$ , které získáme výpočtem:

$$\alpha_{1,2} = \varphi_{1,2deg} + \alpha \quad (36)$$

Po dosazení do rovnice (36) získáváme výsledky:

$$\alpha_1 = 39^\circ 48' 23,7'' \quad (37)$$

a

$$\alpha_2 = 39^\circ 54' 56,9'' \quad (38)$$

Dosazením výsledků (37) a (38) do rovnice (35) získáváme:

$$x_1 = 500,02 \text{ mm} \quad (39)$$

a

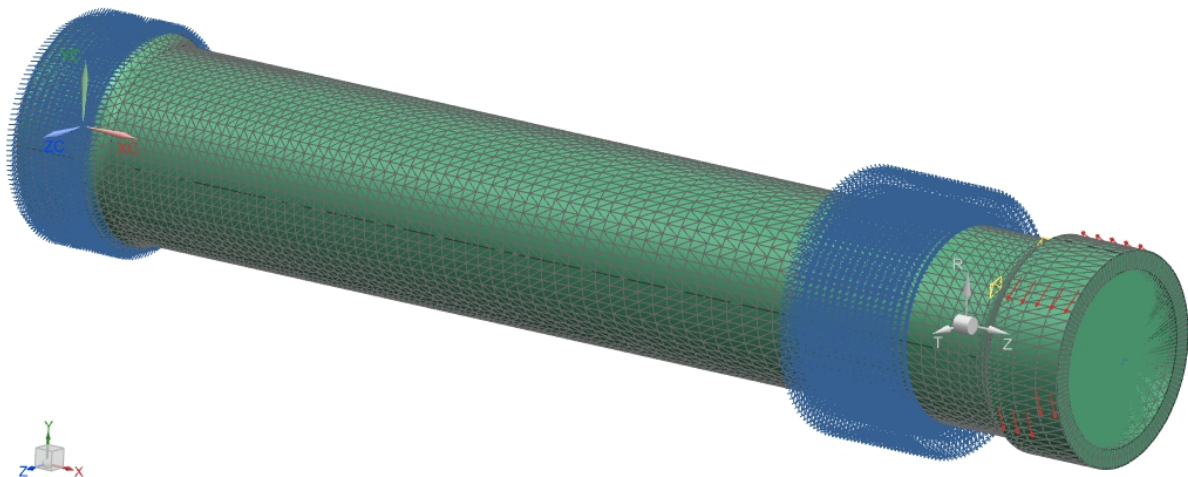
$$x_2 = 501,96 \text{ mm} \quad (40)$$

Rozdílem hodnot (39) a (40) získáme celkový pokles skříně x:

$$x = 1,94 \text{ mm} \quad (41)$$

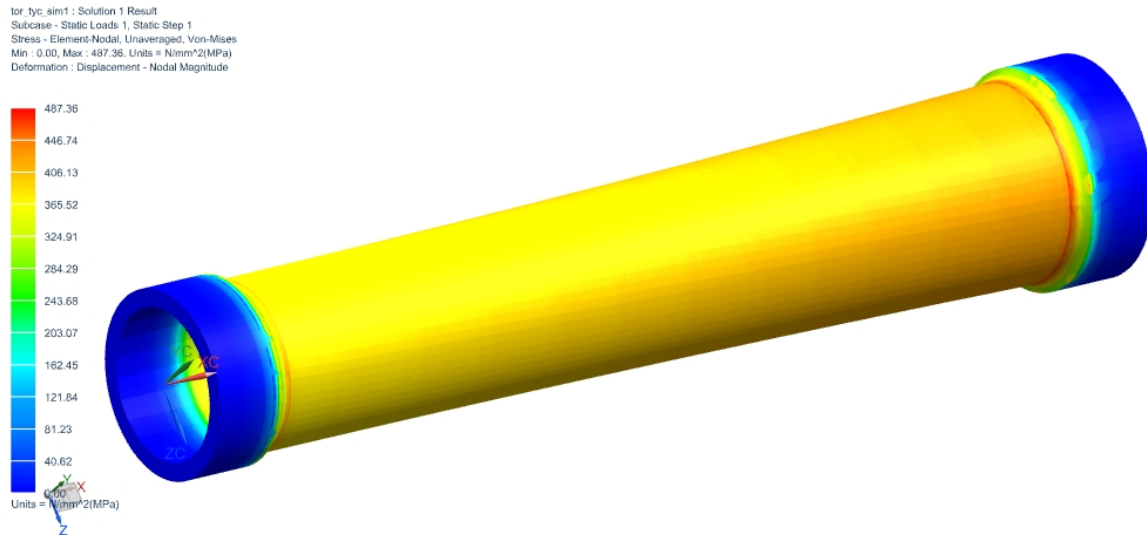
## 4.2. Grafické řešení

Pro grafické řešení bylo využito výpočetního programu Nastran implementovaný do programu NX 11 od firmy Siemens. Pro výpočet bylo užito taktéž dvou stavů zatížení torzní tyče a to při zatížení prázdné a plné tramvaje. Na obrázku 28 lze vidět doplnění počátečních podmínek (přípevnění k rámu podvozku a doplnění působení sil).

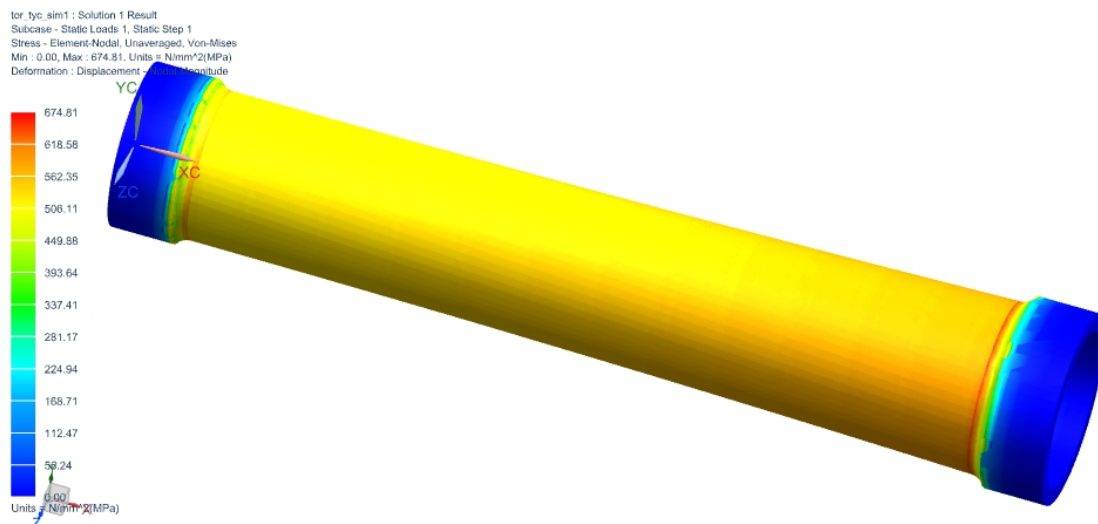


Obr. 28: Počáteční podmínky výpočtu

Na obrázcích 29 a 30 lze vidět průběh napětí v krutu (MPa) působící na torzní tyč. Průběh napětí v krutu odpovídá výpočtům, jediným problémem s grafickým řešením je ten, že dochází k prudkému zvýšení napětí v části rádiusu, kdy přechází účinná část torzní tyče na drážkování. Toto prudké zvýšení je chybou ve výpočtu pomocí metody konečných prvků.

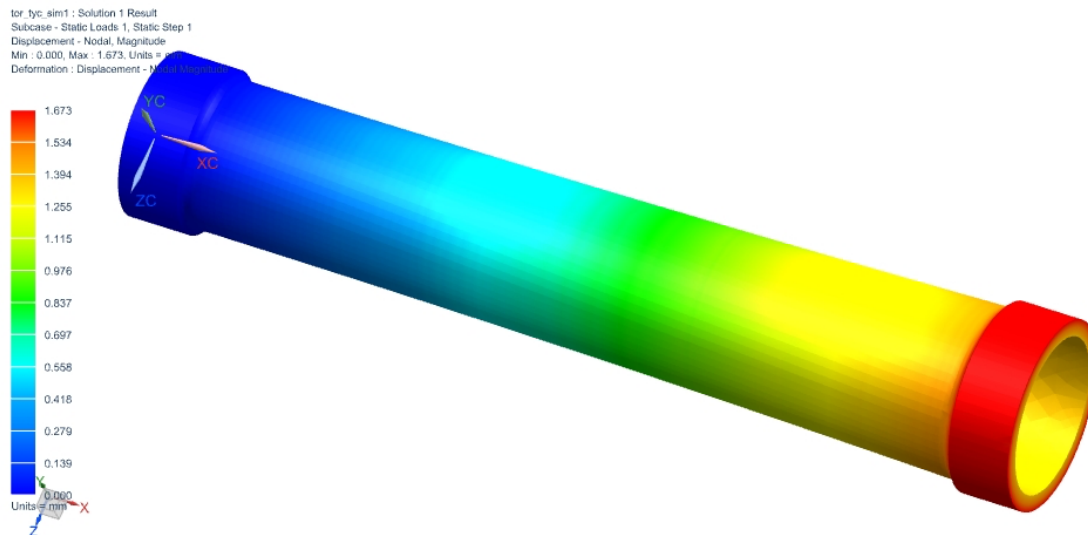


Obr. 29: Průběh napětí výpočtu prázdné tramvaje

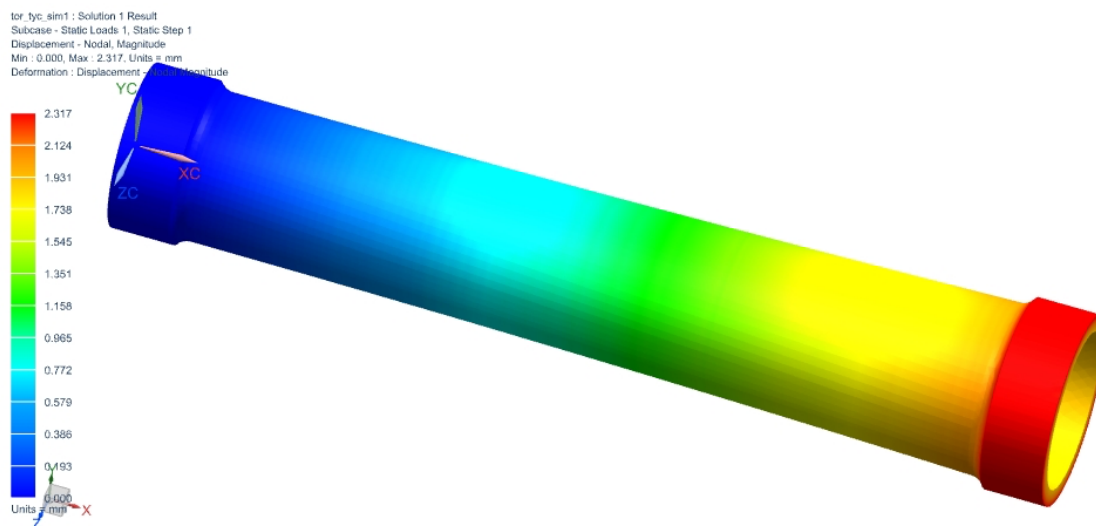


Obr. 30: Průběh napětí výpočtu plné tramvaje

Na obrázcích 31 a 32 lze pozorovat deformaci torzní tyče (mm), tj. natočení při zatížení prázdné a plné tramvaje. Zde dochází taktéž ke zkreslení výsledků, neboť se jeví jako největší deformace místo drážkování, což je způsobeno umístěním krouťícího momentu v místě drážkování.



Obr. 31: Deformace torzní tyče prázdné tramvaje



Obr. 32: Deformace torzní tyče plné tramvaje

## 5. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout úzkorozchodný podvozek s nestandardním vypružením pomocí torzních tyčí. Celkové řešení je teoreticky možné vyrobit a užít u tramvaje, ovšem zástavba je velmi komplikovaná a nešťastné a nepraktické řešení způsobuje, že je třeba využít hodně prostoru nad podvozkem.

Použitý návrh by bylo nutno montovat tak, že by se užilo čtyř dvousedadel, čímž by jsme omezili dnešní koncept hromadné dopravy s velkým prostorem pro průchod a stání cestujících.

Torzní tyče se jako vypružení využívá velmi zřídka, pokud jde o civilní vozidla i o vozidla hromadné dopravy (výjimkou jsou bojová vozidla využívající pásů). V tomto případě šlo o snahu vyrobit podvozek, který těchto torzních tyčí využívá. Vytvořené návrhy jsou na konstrukci velmi komplikované až nereálné.

Nehledě na nereálnost řešení nastává i další problém a to je únava torzní tyče, která by měnila jízdní vlastnosti a celkovou výšku tramvaje.

## Seznam obrázků

- Obrázek 1: Typový výkres tramvaje Škoda forcity alfa
- Obrázek 2: Typový výkres tramvaje Škoda forcity classic
- Obrázek 3: Typový výkres tramvaje Škoda forcity plus
- Obrázek 4: Typový výkres tramvaj Škoda forcity smart
- Obrázek 5: Podvozek FLEXX Urban 1000
- Obrázek 6: Podvozek FLEXX Urban 2000
- Obrázek 7: Tram-train FLEXITY Swift využívající podvozek FLEXX Urban 2500
- Obrázek 8: Typový výkres podvozku FLEXX Urban 3000
- Obrázek 9: Podvozek Combino SF 30C TFW
- Obrázek 10: Podvozek Combino SF30C TFW/LFW
- Obrázek 11: Neotočný podvozek DG 1000
- Obrázek 12: Tramvaj Solaris Tramino Jena
- Obrázek 13: Neotočný podvozek Arpège
- Obrázek 14: Neotočný podvozek Corège
- Obrázek 15: Otočný podvozek Ipomos
- Obrázek 16: Podvozek Ixège
- Obrázek 17: 3D model podvozku Iponam
- Obrázek 18: Podvozek CL 300
- Obrázek 19: Uchycení primárního vypružení první varianty
- Obrázek 20: Pohled z boku první varianty
- Obrázek 21: Celkový pohled na první variantu
- Obrázek 22: Uchycení sekundárního vypružení druhé varianty
- Obrázek 23: Produktový výkres kuželového pryžokovového silentbloku
- Obrázek 24: Pohled z boku druhé varianty
- Obrázek 25: Celkový pohled na druhou variantu
- Obrázek 26: Tramvaj Škoda 10T Elektra
- Obrázek 27: Pomyslný trojúhelník
- Obrázek 28: Počáteční podmínky výpočtu
- Obrázek 29: Průběh napětí výpočtu prázdné tramvaje
- Obrázek 30: Průběh napětí výpočtu plné tramvaje
- Obrázek 31: Deformace torzní tyče prázdné tramvaje
- Obrázek 32: Deformace torzní tyče plné tramvaje



## Zdroje

- [1] *FLEXX Urban 3000 Bogie*, [online] [cit. 13.5.2017] Dostupný na WWW:  
<http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transportation-FLEXX-Urban-3000-Bogie.pdf>
- [2] HELLER, P., DOSTÁL, J., *Kolejová vozidla III*, Západočeská univerzita v Plzni 2011, ISBN 978-80-261-0028-7
- [3] *First Class Bogies*, [online] [cit. 20.10.2016] Dostupný na WWW:  
<http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/sitecollectiondocuments/en/rail-solutions/components-and-systems/bogies-catalog-en.pdf>
- [4] *FLEXX Urban Bogies*, [online] [cit. 23.10.2016] Dostupný na WWW:  
<http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transportation-Bogies-FLEXX-Urban.pdf>
- [5] *Solaris Tramino Catalog*, [online] [cit. 1.11.2016] Dostupný na WWW:  
[https://www.solarisbus.com/vehicles\\_catalog/26/tramino](https://www.solarisbus.com/vehicles_catalog/26/tramino)
- [6] *Alstom Bogie catalogue*, [online] [cit. 1.11.2016] Dostupný na WWW:  
<http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Alstom%20Bogies%20Catalogue%202015%20-%20English.pdf?epslanguage=cs-CZ>
- [7] *Produktový list Škoda forcity alfa Praha*, [online] [cit. 5.11.2016] Dostupný na WWW:  
<http://skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/forcity/tramvaj-forcity-praha/Contents.3/0/19010CFCC0D3D3A3A2679A49BC67D5D8/resource.pdf>
- [8] *Produktový list Škoda forcity classic Konya*, [online] [cit. 5.11.2016] Dostupný na WWW:  
<http://skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/forcity/tramvaj-28-t/Contents.3/0/E42B402092605C6AD29AC02EF7DB6AC8/resource.pdf>
- [9] *Produktový list Škoda forcity plus Bratislava*, [online] [cit. 5.11.2016] Dostupný na WWW:  
<http://skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/forcity/tramvaj-29-t/Contents.3/0/5F5339982696652FD2EB0830BB527CFD/resource.pdf>
- [10] *Produktový list Škoda forcity smart Helsinky*, [online] [cit. 5.11.2016] Dostupný na WWW:  
<http://skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/forcity/tramvaj-forcity-smart-artic-helsinki/Contents.3/0/9BF7715DCEB98A331B6BFA7692A15F9E/resource.pdf>
- [11] Krejčík, S.: *Studie podvozku pro nízkopodlažní tramvajové vozidlo*, [online] [cit. 12.5.2017] Dostupný na WWW:  
[https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20304/1/DP\\_Krejcik\\_Stanislav.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20304/1/DP_Krejcik_Stanislav.pdf)
- [12] *Designmagazín*, [online] [cit. 12.5.2017] Dostupný na WWW:  
<http://www.designmagazin.cz/technika/1332-predstavena-tramvaj-skoda-forcity-urcena-praze.html>

[13] *New railway report*, [online] [cit. 13.5.2017] Dostupný na WWW:  
<https://newrailwayreport.blogspot.cz/2013/11/solaris-tramino-for-jena.html>

[14] *FLEXITY Swift*, [online] [cit. 13.5.2017] Dostupný na WWW:  
<http://de.bombardier.com/de/transportation/praesenz-in-deutschland/projekte/projektdetails.flexity-karlsruhe-germany.html>

[15] *GMT Gesamtprogramm katalog*, [online] [cit. 13.5.2017] Dostupný na WWW:  
[http://www.gmt-gmbh.de/upload/Kataloge/Produktkatalog\\_engl\\_2012.pdf](http://www.gmt-gmbh.de/upload/Kataloge/Produktkatalog_engl_2012.pdf)

## **Software:**

Siemens NX 11 ® - © 2016 Siemens Product Lifecycle Management Software  
Inventor Professional 2016 ® - © Autodesk Inc.  
MS office pro Mac® - ©2016 Microsoft

## **Přílohy**

Příloha 1: Výkres sestavy podvozku

Příloha 2: Výrobní výkres ramene

Příloha 3: CD s elektronickou verzí BP