

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

STUDIE PODVOZKU PRO NÍZKOPODLAŽNÍ TRAMVAJOVÉ  
VOZIDLO

Autor: **Bc. Stanislav Krejčík**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.**

Akademický rok 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Stanislav KREJČÍK**  
Osobní číslo: **S13N0024P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**  
Název tématu: **Studie podvozku pro nízkopodlažní tramvajové vozidlo**  
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:

Trakční podvozek pro nízkopodlažní tramvajové vozidlo. Rozbor možností řešení hlavních částí pro částečně nízkopodlažní a 100% nízkopodlažní vozidlo.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Rozhodnutí o zvolené variantě podvozku, která bude podrobněji zpracována
2. Celková dispozice podvozku
3. Výrobní výkres vybrané části
4. Pevnostní kontrola vybrané části
5. Technologický postup výroby vybraného dílu

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **50-70 stran A4**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**DOSTÁL, J., HELLER, P.** *Kolejová vozidla I.* V Plzni: Západočeská univerzita, 2007

**DOSTÁL, J., HELLER, P.** *Kolejová vozidla II.* V Plzni: Západočeská univerzita, 2009

**DOSTÁL, J., HELLER, P.** *Kolejová vozidla III.* V Plzni: Západočeská univerzita, 2011

**LATA, M.** *Konstrukce kolejových vozidel II.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004

**POHL, R., NOVOTNÝ, C.** *Železniční vozidla II.* V Praze: ČVUT, 2003

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.**  
Regionální technologický institut  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Říha**  
ŠKODA TRANSPORTATION, a.s., Plzeň

Datum zadání diplomové práce: **22. září 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **22. května 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



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

V Plzni dne 22. září 2014

## Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: .....

.....

**podpis autora**

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Petru Hellerovi, CSc., vedoucímu diplomové práce, který mi byl po celou dobu vypracovávání diplomové práce nápomocen, za jeho ochotu, trpělivost, užitečné rady a připomínky.

Dále děkuji Ing. Jiřímu Říhovi za poskytnutí odborných informací.

Rád bych poděkoval své rodině a hlavně pak rodičům za podporu při studii. Také díky jejich podpoře mohla tato práce vzniknout.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Krejčík	<b>Jméno</b> Stanislav		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301T001 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>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Studie podvozku pro nízkopodlažní tramvajové vozidlo			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	71	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	67	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	4
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce obsahuje návrh trakčního tramvajového neotočného podvozku pro použití v nízkopodlažním tramvajovém voze. Návrh vychází z provedené rešerše. Byla vytvořena celková dispozice podvozku a byly popsány jednotlivé části vedoucí k úspoře celkové hmotnosti. Byl proveden výpočet síly působící na nápravu, kontrola ložiskové jednotky, výpočet a návrh vypružení. Pomocí počítačové simulace byl proveden návrh komponenty primárního vypružení.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Tramvaje, nízkopodlažní trakční podvozky, nekonvenční rám a vypružení, nižší hmotnost, 3D model, výpočty, počítačová simulace.

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Krejčík	Name Stanislav	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301T001 Transport and handling machinery		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Heller, CSc.	Name Petr	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The studies of bogie for low-floor tram vehicle		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2015
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	71	<b>TEXT PART</b>	67	<b>GRAPHICAL PART</b>	4
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The master thesis is about the design of traction non-rotatable bogie for use in low-floor tram vehicle. The design is carried out researches. The bogie layout was created and described components leading to weight savings. The calculation of axle, the bearing unit and suspensions was created. The design of suspension spring was created by computer simulation.
<b>KEY WORDS</b>	The trams, the low –floor traction bogies, the unconventional frame and the suspension, the less weight, the 3D model, the calculations, the computer simulation.

# Obsah

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	9
1 ÚVOD .....	11
1.1 Vznik tramvajového vozidla.....	11
1.2 Cíle práce .....	15
2 PODVOZKY TRAMVAJOVÝCH VOZIDEL .....	17
2.1 Podvozky pro částečně nízkopodlažní tramvajová vozidla .....	18
2.1.1 Otočné podvozky.....	18
2.1.2 Neotočné .....	20
2.2 Podvozky pro 100% nízkopodlažní tramvajová vozidla.....	21
2.2.1 Otočné .....	22
2.2.2 Neotočné .....	24
3 Zajímavě řešené podvozky kolejových vozidel.....	32
3.1 Podvozek efWING (KAWASAKI).....	32
4 Návrh vlastní koncepce .....	33
4.1 Rám.....	38
4.2 Dvojkolí.....	40
4.2.1 Nápravové ložisko – ložisková jednotka.....	40
4.2.2 Kolo.....	42
4.2.3 Náprava .....	42
4.3 Vypružení.....	45
4.3.1 Výpočet vypružení.....	46
4.3.2 Návrh rozměrů šroubovitě pružiny sekundárního vypružení.....	48
4.4 Pohonné a brzdné ústrojí .....	50
4.4.1 Trakční motor a kotoučová brzda.....	50
4.4.2 Převodovka.....	51
5 Návrh a pevnostní kontrola pružiny primárního vypružení .....	53
5.1 Model .....	54
5.2 Náhrada interakce sousedních listů .....	54
5.3 Okrajové podmínky .....	55
5.4 Nastavení sítě .....	56
5.5 Úplný model .....	56



5.6	Výpočet.....	57
5.6.1	Zatížení silou <b>F1L</b> .....	57
5.6.2	Zatížení silou <b>F1P</b> .....	59
5.6.3	Zjištění napětí v pružnici při dosažení maximálního posunutí <b>ZC</b> .....	60
5.7	Shrnutí výsledků .....	62
5.8	Alternativní materiál pružiny.....	63
6	Technologický postup výroby příčnicku.....	65
7	Závěr.....	66
8	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	67
9	SEZNAM TABULEK .....	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	71
10	SEZNAM ZDROJŮ .....	72
10.1	Knižní publikace.....	72
10.2	Časopisecké zdroje .....	72
10.3	Publikace na internetu .....	72

## PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
KCU	Vrubová houževnatost
m [kg]	Hmotnost
F [N]	Síla
P [N]	Svislá síla
Q [N]	Svislá reakce
H [N]	Příčná síla
Y [N]	Příčná síla
M [N.m]	Moment
g [m/s <sup>2</sup> ]	Gravitační zrychlení
i [-]	Převod, počet náprav
h, s, b [m]	Délkové rozměry
y, m, k [m]	Ramena k průřezům
D, d [m]	Průměr
R, r [m]	Poloměr
p [MPa]	Tlak
μ [-]	Součinitel adheze
Γ [-]	Součinitel tření
σ [MPa]	Normálové napětí
τ [MPa]	Tečné napětí
v [m/s]	Rychlost
n [ot]	Otáčky
C [N]	Základní dynamická únosnost
P [N]	Ekvivalentní dynamické zatížení
L [ot]	Trvanlivost
l [m]	Obvod
G [MPa]	Modul pružnosti ve smyku
k [N/m]	Tuhost
f [Hz]	Frekvence

H [m]	Výška pružiny
z [m]	Stlačení pružiny

Poznámka: V seznamu nejsou uvedeny symboly a zkratky všeobecně známé nebo používané jen ojediněle s vysvětlením v textu.

# 1 ÚVOD

## 1.1 Vznik tramvajového vozidla

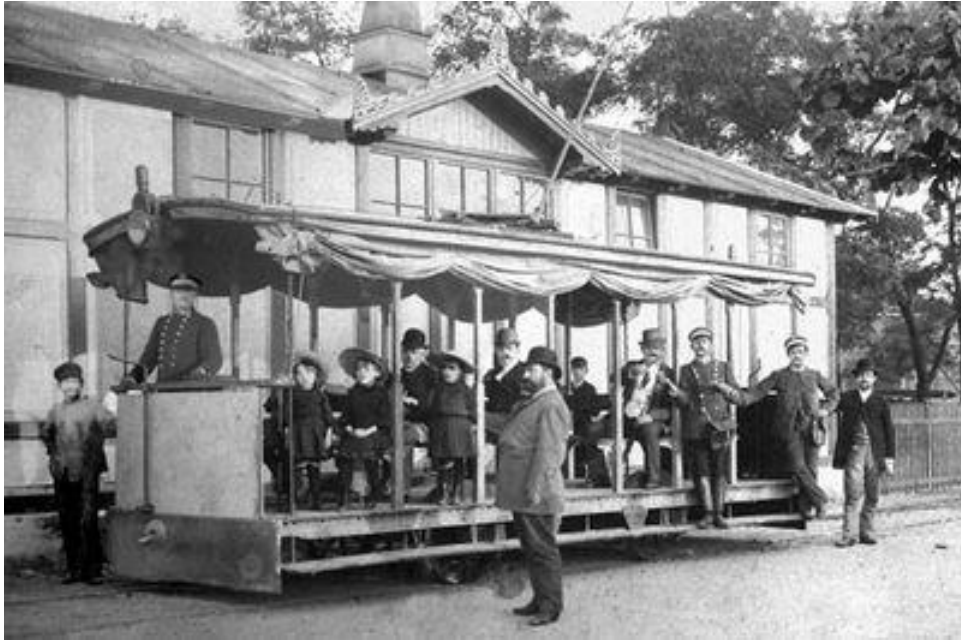
První zmínka o tramvaji tažené koňmi, která jezdila ulicemi New Yorku je z roku 1832. Do Evropy tento progres v městské dopravě přišel až v roce 1853 a bylo to v Paříži. Co se území dnešní České republiky týče, tento druh přepravy většího počtu lidí, určený převážně do větších měst, byl zaveden v Brně roku 1869, následovala Praha roku 1875. Podobu, jak tehdejší tramvaj mohla vypadat, vykresluje dobová fotografie na obrázku 1.



**Obrázek 1. Dobový obrázek pražské tramvaje [4]**

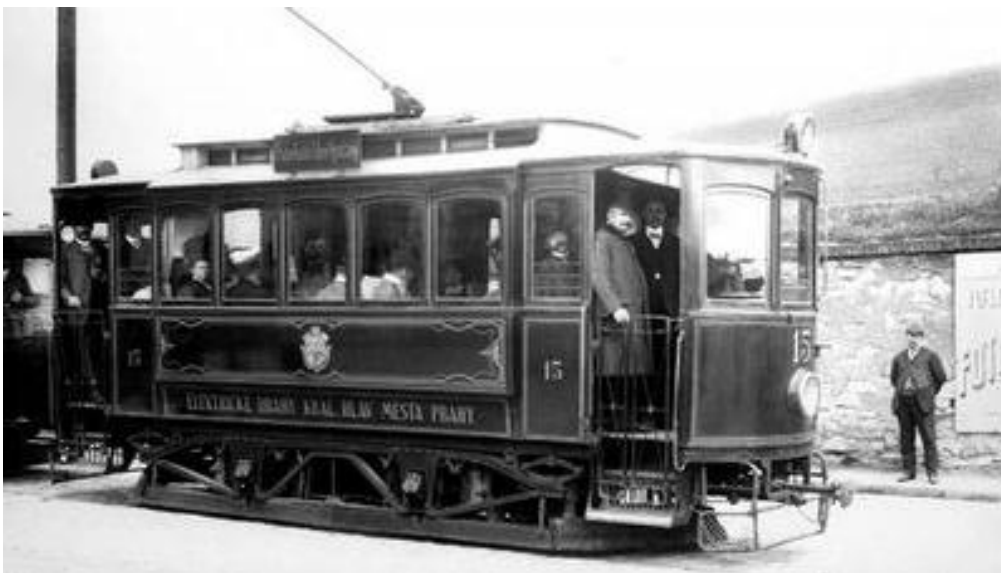
Na obrázku je dále vidět celkem zajímavá věc. Mohlo by s nadsázkou platit tvrzení, že jde o nízkopodlažní tramvaj, protože úroveň podlahy je jistojistě do 300 mm nad temenem kolejnice. Kdyby v tehdejší době existovaly nástupní ostrůvky na každé zastávce, mohl by být nástup a výstup z tramvaje takřka bezbariérový. Důležité je povšimnout si, proč tomu tak je. Samozřejmě je to kvůli tomu, že nejsou velké nároky na úložný prostor pod skříň tramvaje. Kola nebezpečně prostupují přes podlahu, hnací sílu obstarává kůň.

Zajisté tramvaje, jak je známe dnes, obsahují mnohé navíc. Samozřejmě podvozek s primárním a sekundárním vypružením pro zlepšení komfortu, na rámu podvozku je dále uložen trakční elektromotor, převodovky, brzdy a další nutné systémy. Je jasné, že s postupným rozvojem nároky na zástavbový prostor vzrostly a s tím se i podlaha a tedy celá skříň tramvaje nutně musela posouvat směrem vzhůru.



**Obrázek 2. První elektrická tramvaj v Čechách [4]**

Právě modernizací a nahrazením koňské síly elektromotorem zapříčinilo posunutí podlahy tramvaje směrem nahoru, jak je vidět na obrázku 2. Tato tramvaj jezdila v Praze ze Stromovky na Letnou. Dráhu postavil František Křižík. Ještě více patrné je vyvýšení podlahy na obrázku 3 tramvaje z roku 1907, která jezdila v Praze ve Vysočanech. Tento obrázek ukazuje, že nástup a výstup z tramvaje již mohl být dosti obtížný. Vysoké postavení podlahy tramvaje nad úrovní země, vytvořilo potřebu užití vysokých schůdků.



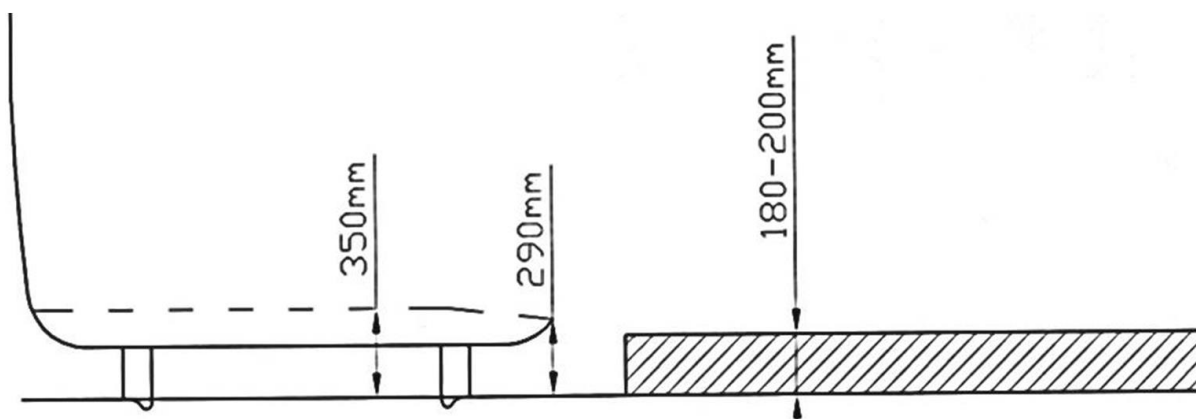
**Obrázek 3. Tramvaj z roku 1907 [4]**

Tramvajová doprava se postupem času stala neodmyslitelnou součástí městské infrastruktury pro její nesporné výhody, kterými jsou hlavně relativně nízké provozní náklady pro velké množství přepravovaných lidí, při nízkém valivém odporu kol po kolejnicích. Také elektrická trakce má své výhody. Velké účinnosti elektromotorů, výhodná momentová charakteristika elektromotorů a možnost zpětného dodávání do elektrické sítě při jízdě tramvaje z kopce.

Elektrikou poháněná vozidla neprodukují skleníkové plyny. Rychlost dopravy po městě je také výhodou, když je město zablokováno kolonami osobních automobilů. Nevýhodou je špatná manévrovatelnost tramvajového vozidla. Pokud je na koleji překážka, tramvajová doprava na lince stojí.

Mezi nevýhody by se mohly počítat rozměrové zákonitosti tramvají, kterými je jízdní průřez a minimální poloměr jízdy v oblouku. Dále pak v zimě při zhoršených povětrnostních podmínkách, zejména námrazy, je možný prokluz hnacích kol tramvaje po kolejnici a tím zastavení provozu na lince.

Nevýhody vztažené přímo k tramvajovému vozidlu z pohledu cestující osoby jsou spojené s vnitřním uspořádáním vozu. Mezi nejvýraznější takovéto nevýhody patří bezesporu vysoká podlaha u starších typů tramvajových vozidel, kde podlaha dosahovala výšky až 800 mm nad temeno kolejnice. U takto vysokých podlah musely být tři schody k překonání výškového rozdílu od nástupního ostrůvku k podlaze vozidla. Bariéra v podobě schodů je zvláště pro vozíčkáře a starší lidi mnohdy nepřekonatelný problém.



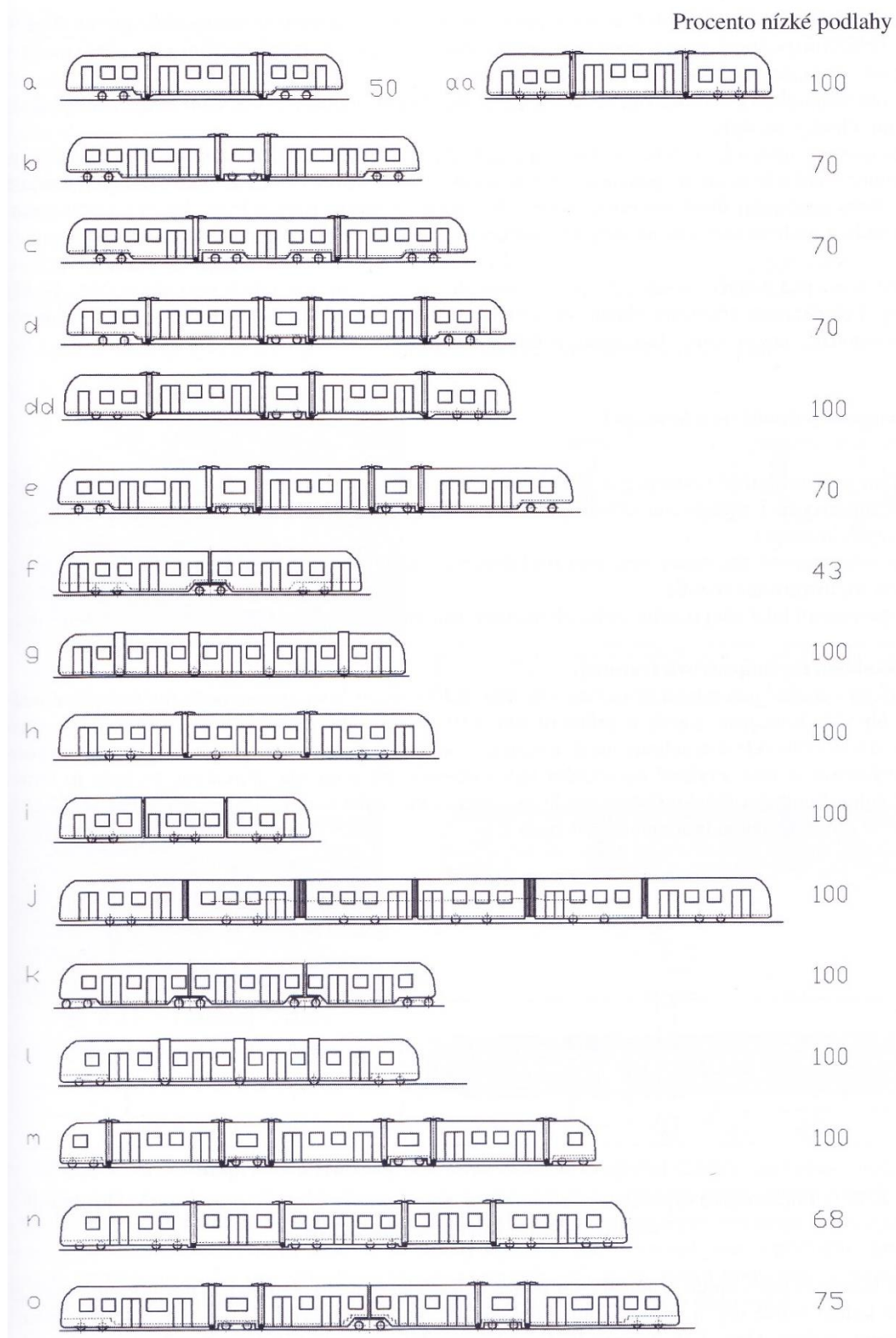
**Obrázek 4. Podmínka nízkopodlažnosti tramvaje [3]**

Mnohým z dnešních požadavků zákazníka na výrobce tramvaje je právě nízkopodlažnost tramvaje. Pro výrobce tak nastává problém především při návrhu podvozku. Veliké nároky na zástavbový prostor podvozku jsou dány uložením motoru, převodovky, brzd a všeho potřebného na rám podvozku. Dnešní výrobci tramvají tedy hledají nové koncepční směry při návrhu tramvaje. Nastává jen otázka, z kolika procent bude budoucí tramvaj nízkopodlažní?

V dnešní době jezdí mnoho částečně nízkopodlažních tramvají, tedy nízkopodlažních z několika procent (30%, 50%, 75%). Například v podvozkové části skříně je vyvýšená podlaha, kam se pohybově postižení lidé bez pomoci nedostanou, ale právě pro ně je v části skříně mezi podvozky bezbariérová nízkopodlažní část (350 mm od temene kolejnice, viz další odstavec). Výhoda těchto částečně nízkopodlažních tramvají z pohledu konstruktéra tkví v tom, že je na podvozku, pod skříní, dost prostoru pro uložení motoru, převodovky, brzd atd. Možné variace nízkopodlažních tramvají jsou vidět na obrázku 6.

Nejvíce obtížná je z pohledu konstruktéra koncepce 100% nízkopodlažní tramvaje. Právě tato podmínka podlahy vozidla stanovuje, že podlaha u vstupních dveří nesmí přesahovat výšku 350 mm od temena kolejnice, obrázek 5. Několik koncepcí můžeme vidět na obrázku 5. Podvozek

tramvaje musí být navržen alespoň tak, aby podlaha vozidla v místě podvozku byla spojitá s podlahou v místě dveří. To se nejčastěji řeší přechodovou částí s šikmou rampou. Tato podmínka podlahy je zároveň i důvodem proč dnešní podvozky mají jinak uspořádané pohony, obvykle na vnější straně rámu podvozku a ne uvnitř, jako tomu bylo u starších typů podvozků. Další možností, jak ještě snížit podlahu je užití nápravnice místo nápravy. To s sebou však přináší i své nevýhody z hlediska konstrukce. Vše je blíže popsáno v dalších kapitolách.



Obrázek 5. Koncepce nízkopodlažních tramvají [3]

## 1.2 Cíle práce



Cíl práce je shrnout současné podvozky tramvajových vozidel v teoretické části. Na základě shrnutí vytvořit vlastní koncepční řešení tramvajového podvozku pro nízkopodlažní tramvajové vozidlo. Hledat možnosti snížení hmotnosti podvozku. Navrhnout způsob vedení dvojkolí a způsob vypružení. Vytvořit konstrukční řešení a 3D model návrhu. V závěru zhodnotit výsledky práce.

## 2 PODVOZKY TRAMVAJOVÝCH VOZIDEL

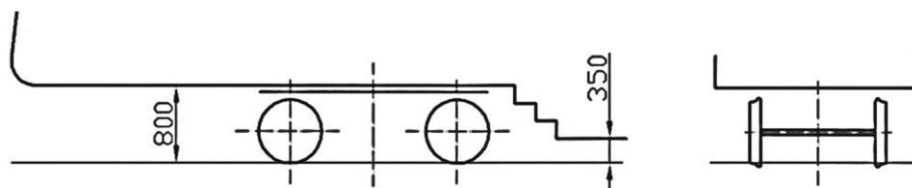
„Podvozky tramvajových vozidel mají stejnou funkci, jako podvozky hnacích vozidel železničních. Jsou na ně však kladeny jiné požadavky. Tramvajová vozidla se pohybují po kolejích s mnohem menšími kolejovými oblouky (poloměr 20m i menší), většinou bez přechodnice, s mnohem většími traťovými sklony, přitom výkony trakčních motorů obvykle nepřesáhnou 120 kW na nápravu. Také obrysy pro tramvajová vozidla (viz ČSN 28 0337) omezují výrazně jejich konstrukci. Průlomové požadavky na nová, nízkopodlažní tramvajová vozidla, zejména požadavek nízké podlahy (viz. Obrázek 4), měly za následek posunutí konstrukce podvozků do nové dimenze. Tato kapitola bude věnována dvounápravovým podvozkům. Samozřejmým požadavkem v konstrukci podvozků je také splnění příslušných částí norem, které platí pro tramvajová vozidla. V Česku se jedná o normu ČSN 28 1300 Tramvajová vozidla – Technické požadavky a zkoušky. Obecně lze konstatovat, že podvozky pro tramvajová vozidla mají menší rozměry než podvozky vozidel železničních. Rozvor podvozků bývá obvykle 1800 až 1900 mm. Průměr dvojkolí nepřesahuje 700 mm u standartních tramvajů, u nízkopodlažních bývá do 600 mm. Nápravové zatížení tramvajových vozidel je do 10 maximálně 11 t na nápravu.“ [3]

Dle koncepce se podvozky tramvajových vozidel dělí na:

- Podvozky otočné pro standardní vysokopodlažní vozidla.
- Podvozky částečně nízkopodlažních vozidel.
- Podvozky neotočné pro 100% nízkopodlažní vozidla
- Podvozky otočné pro 100% nízkopodlažní vozidla.

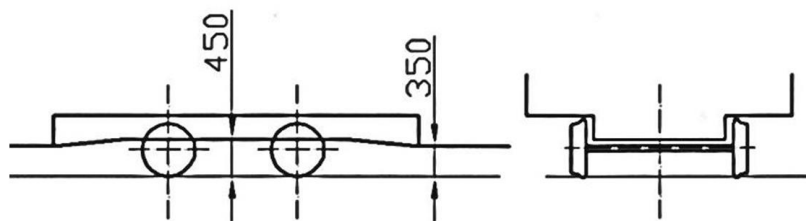
V této kapitole se budu věnovat podvozkům nízkopodlažních tramvajů. Uspořádání nízkopodlažních tramvajů je možné prakticky čtyřmi možnými způsoby.

- a) *Částečně nízkopodlažní vozidlo* – podvozek obvyklé koncepce umístěn v prostoru pod vysokou podlahou, kde je neotočný podvozek. Do prostoru nízké podlahy vedou 2 až 3 schody. [3]



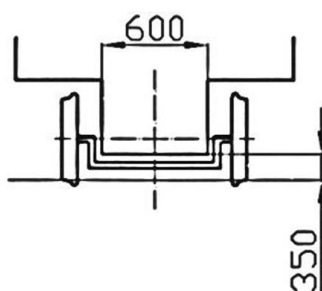
**Obrázek 6. Částečně nízkopodlažní vozidlo [3]**

- b) *Dvojkolí s menším průměrem kol* - úroveň podlahy je snížena na cca 450 mm. Mezi nízkou podlahou a vyšší podlahou je šikmá rampa nebo schod. [3]



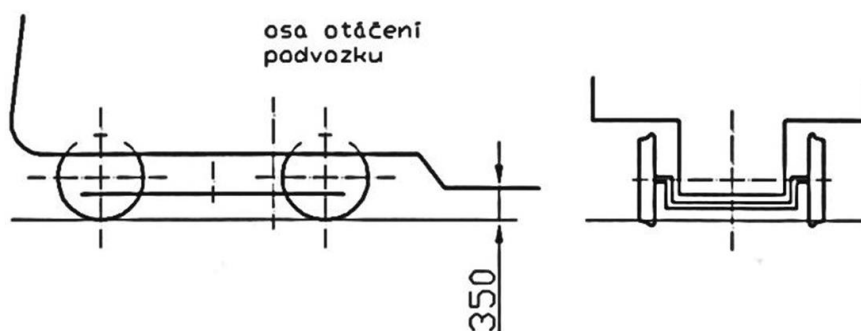
**Obrázek 7. Dvojkolí s menším průměrem kol [3]**

- c) *Podvozek s nápravnicemi s volně otočnými koly – podvozek je většinou neotočný. Kola jsou obvyklého průměru situovaná do prostoru pod sedadlo. Ulička by měla být široká nejméně 600 mm. [3]*



**Obrázek 8. Podvozek s nápravnicí [3]**

- d) *Otočný podvozek s nápravnicemi, vysunuté pod kabinu řidiče. [3]*



**Obrázek 9. Podvozek s nápravnicí pod kabinou řidiče [3]**

## 2.1 Podvozky pro částečně nízkopodlažní tramvajová vozidla

### 2.1.1 Otočné podvozky

#### AVANTO SF 70

Podvozek navržený firmou Siemens. Z plechů a odlitků svařovaný rám tvaru H má k sobě připojený čelník přes částečně pružné elementy. Čelník slouží k podpírání pohonného ústrojí. Vedení dvojkolí je zajištěno pružnými silentbloky Meggi, které tedy fungují i jako primární vypružení. Meggi se vyznačuje dostatečnými tlumícími vlastnostmi. Jako sekundární vypružení zde slouží čtyři šroubovitě pružiny s kolébkou. Kola jsou nalisovaná na nápravě. Celé dvojkolí je poháněno od asynchronního motoru přes převodovku, která je nápravová s dvěma stupni. Přenos krouticího momentu z převodovky na nápravu je přes dutou hřídel. Na konci těchto

dutých hřídelí je pružná spojka, která má tu vlastnost, že dovoluje malá posuvy ve svislém směru. Tím je zajištěn relativní pohyb mezi úplně vypruženým motorem s převodovkou a dvojkolím. Možnost natočení podvozku je 12°. [3, 10]

**Tabulka 1. Technická data [10]**

Maximální rychlost	106 km/h
Nápravové zatížení	2 x 10,5 t
Výkon motoru	140 kW
Rozvor	1900 mm
Rozchod	1435 mm
Minimální rádius zatočení	25 m
Hmotnost podvozku	5,7 t



**Obrázek 10. Podvozek Siemens SF 70 [10]**

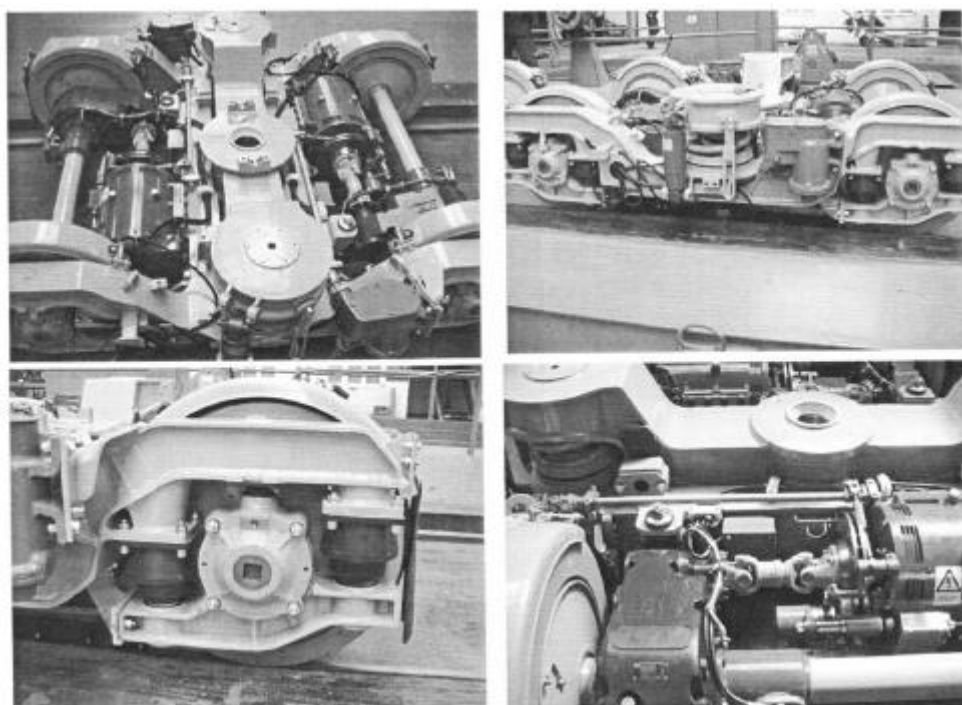
### **KOMFORT plus, tramvaje VARIO LF 2+ (Pragoimex)**

Rám podvozku je otevřený, tvaru H, svařované konstrukce. Podélníky rámu jsou v prostřední části snižené z důvodu vytvoření místa pro sekundární vypružení, které je mezi rámem a kolébkou. Sekundární vypružení je tvořeno dvěma duplexními šroubovitými pružinami s tlumiči. Na kolébce je v prostřední části silentblok s otvorem pro otočný čep (místo spojení podvozku a skříně vozidla). Trakční motor je připevněn přes konzolu k příčnicku rámu. Na poháněné hřídeli jdoucí z elektromotoru je připevněn brzdový kotouč. Samotná brzda je připevněna k motoru přes přírubu. Mezi kotoučem brzdy a dvoustupňovou převodovkou je kloubová hřídel. Převodovka je k rámu připevněna přes svislou závěsku, která přenáší reakční sílu od krouticího momentu. Převodovka je dále nasazena na nápravu dvojkolí. Kola jsou

složená s vnitřní pryžovou vložkou o průměru 700. Primární vypružení je zde zajištěno silentbloky. Schematicky se tento podvozek užívá v koncepci tramvaje dle obrázku 5.f.) [3]

**Tabulka 2. Technické parametry [3]**

Výkon 1 elektromotoru	80 kW
Rozvor	1900 mm
Rozchod	1435 mm
Hmotnost podvozku	4,1 t



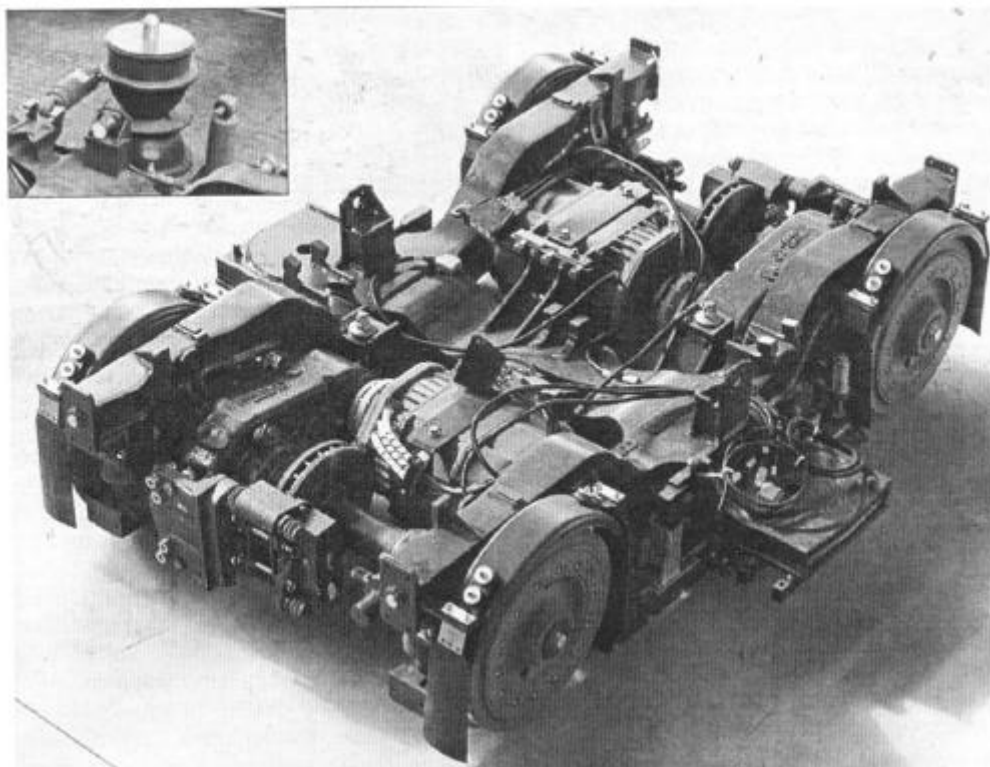
**Obrázek 11. Otočný podvozek KOMFORT plus [3]**

### 2.1.2 Neotočné

#### ASTRA ŠKODA

Rám podvozku je otevřený, tvaru H. Ve střední části jsou podélníky snížené, aby vznikl prostor pro sekundární vypružení, které je řešeno šroubovitými pružinami. Asynchronní elektromotor je spolu s převodovkou a brzdou umístěn mezi podélníky rámu. Motor je pevně spojen s příčnicí přes konzolu. Osa motoru je rovnoběžná s osou nápravy. Brzdový kotouč a převodovka jsou nasazeny na nápravu. Kola jsou složená o průměru 610 mm. Pružení primární je zde docíleno silentbloky. Mezi motorem a převodovkou je ještě spojka, která je buď pryžová, nebo zubová. Na obrázku je vidět závěska, která zachycuje reakci krouticího momentu v převodovce a přenáší ho na rám. Na spodní části rámu je přidělaná kolejnicová brzda. Přenos podélných sil z podvozku na skříň je zajištěn narážkami, které jsou umístěné na konzolách ve

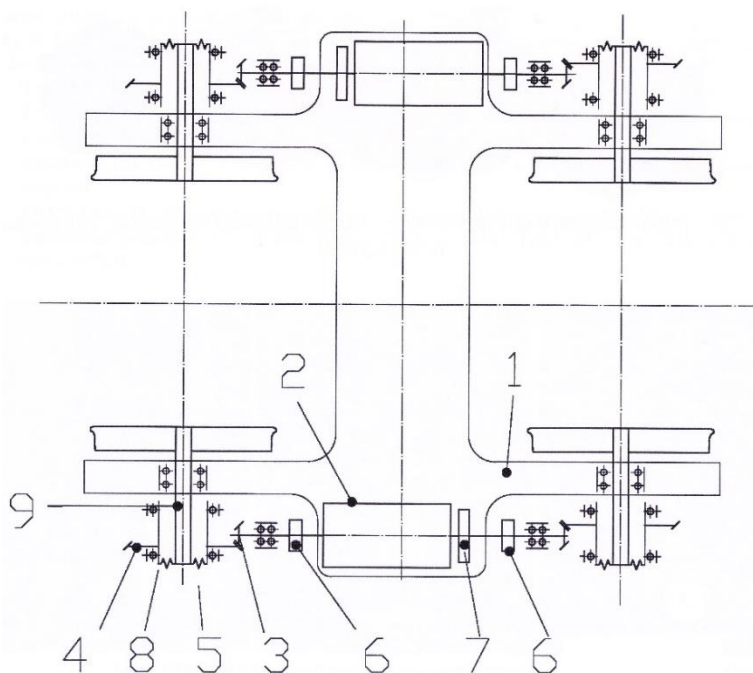
snížených částech podélníku. Tyto konzoly zajišťují i přenos příčných sil na skříň. Dovolují natočení podvozku vůči skříni o  $\pm 2^\circ$ . Tento podvozek byl v budoucnu modernizován do tramvají Anitra. Změny byly provedeny v přenosu tažných a brzdných sil ojnicí. Trakční motor se stal více odolným proti nečistotám lepším zakrytíváním. Pro sekundární vypružení byly vytvořeny tzv. balkónky. [3]



**Obrázek 12. Modernizovaný podvozek tramvají Škoda [3]**

## **2.2 Podvozky pro 100% nízkopodlažní tramvajová vozidla**

Tyto podvozky mají konstrukci navrženou tak, aby podlaha skříně vozu byla nízká i v části, kde je podvozek. Tím se konstrukce celého podvozku zásadně mění, protože motor, převodovka a veškeré prvky, které byly u podvozků částečně nízkopodlažních vozidel v prostřední části podvozku, jsou nyní přesunuty jinam, aby bylo možné podlahu umístit co nejbližší k zemi. Nejčastěji je pohonné a převodové ústrojí umístěno na vnější strany podélníků rámu (obrázek 13). Někdy je náprava nahrazena nápravnicí, aby se podlaha mohla ještě více snížit až pod úroveň, kde by normálně byla náprava (obrázek 8).



**Obrázek 13. Užití nápravnice, pohonné ústrojí na boku [3]**

1-rám, 2-motor, 3-kuželový pastorek, 4-ozubené kolo, 5,6-pružná spojka, 7-kotoučová brzda, 8-dutá hřídel, 9-nápravnice

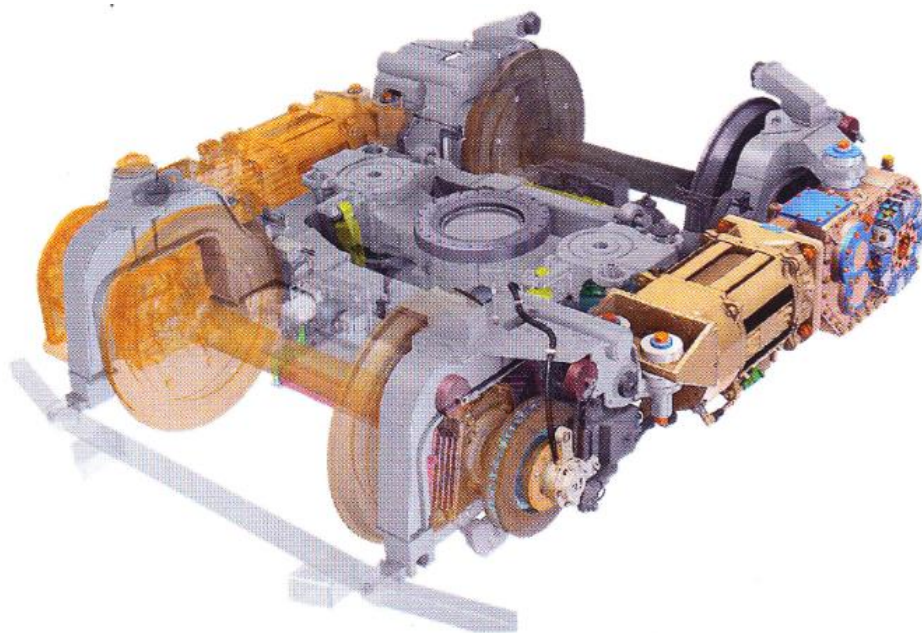
### 2.2.1 Otočné

#### **MB 202 (PROSE)**

Tento nízkopodlažní neotočný podvozek pro úzkorozchodnou tramvaj vyrobený firmou Prose je zvláště navržen a vyroben pro město Helsinky, kde je podmínka, aby podvozek odolával velkým mrazům až  $-35^{\circ}\text{C}$ . Rám je zde svařované konstrukce složený z dvou příčníků a dvou podélníků. Podélníky mají takový tvar, aby se mohlo využít vedení a primární vypružení pružinou Meggi. Trakční ústrojí je umístěno vně podélníků. Z motoru jde krouticí moment přes pružnou spojku do převodovky, která je přímo na nápravě, krouticí moment z převodovky na nápravu prochází přes další pružnou klínovou spojku. Na druhé straně nápravy je kotoučová brzda. [14]

**Tabulka 3. Technické parametry [14]**

Maximální rychlost	80 km/h
Rozchod	1000 mm
Rozvor	1700 mm
Maximální zatížení na nápravu	9 t
Průměr kola	680 / 620 mm
Hmotnost	4 400 kg



**Obrázek 14. MB 202 [14]**

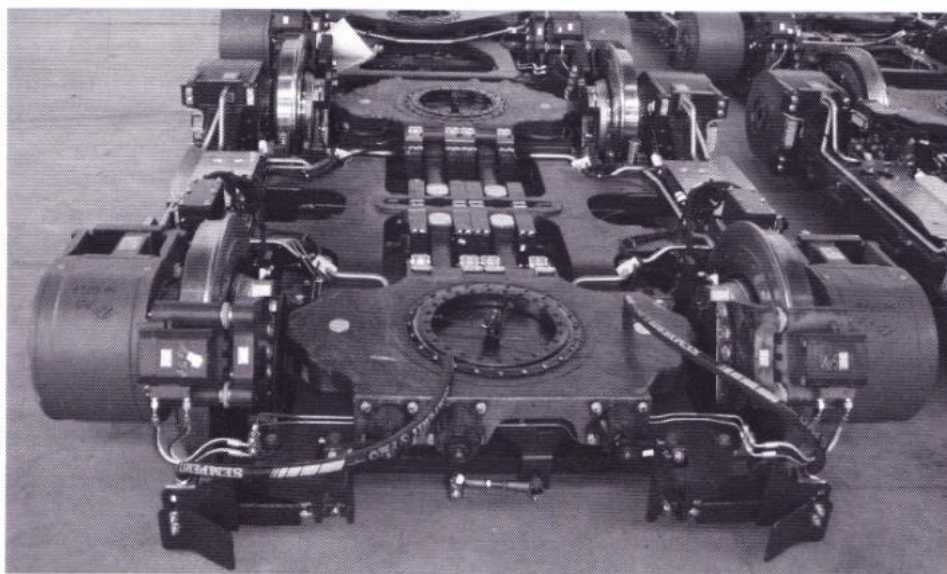
### **Podvozek tramvaje FOR CITY (ŠKODA)**

Tento podvozek se užívá na vozidlech charakteru dle obrázku 5. k). Podvozek je tedy situován mezi dvěma články tramvaje. Otočný podvozek má složitější konstrukci kvůli větším příčným pohybům podvozku při jízdě v oblouku. Tyto příčné pohyby jsou konkrétně u tohoto podvozku zmenšené tím, že jsou zde dvě otočná ložiska nesoucí skříň v přední a zadní části podvozku. Kola jsou uložena na nápravnicích, jež můžeme vidět na obrázku. Individuální pohon každého kola obstarává vodou chlazený synchronní elektromotor s permanentními magnety. Tímto uspořádáním je docíleno úspory místa v prostřední části podvozku. Primární vypružení je přes pryžové silentbloky, sekundární vypružení je docíleno šroubovitými pružinami umístěnými mezi velmi plochým rámem podvozku a kolébkami, na nichž jsou umístěny již zmíněná velká ložiska sloužící, jako otočné vazby mezi podvozkem a článkem vozu. Pro přenos podélných sil mezi kolébkou a rámem podvozku slouží dva páry ojnic, které splňují i úlohu torzních tlumičů. [3]

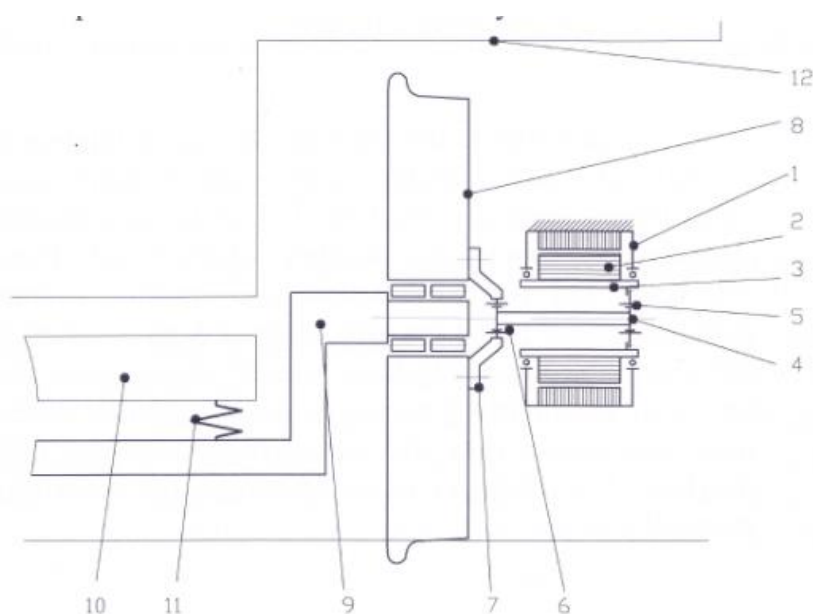


**Obrázek 15. Nápravnice podvozku pro vozidlo For City [3]**





**Obrázek 16. 100% nízkopodlažní, otočný podvozek tramvaje For City [3]**



**Obrázek 17. Pohon volně uloženého kola kloubovou hřídelí [3]**

### 2.2.2 Neotočné

#### **COMBINO SF 30 TFW (SIEMENS)**

Obrázek 13 je mimo jiné i schématický náčrt podvozku tramvaje Combino SF 30 C TFW od firmy Siemens. Zkratka TFW označuje trakční podvozek. Právě kvůli zmíněným požadavkům na nízkopodlažní tramvaje v úvodu kapitoly 2.2 má svařovaný rám podvozku složitější tvar. Hnací ústrojí je pružně připevněno na bok rámu. Motor pohání přes pružné spojky a kuželovou převodovku obě kola na své straně. Kola jsou volně uložena na nápravnicích, není zde tedy standární dvojkolí. V kolech jsou tlumící vložky. Pryžové silentbloky jsou zde použity na místě

primárního vypružení. Sekundární vypružení je zde ve formě šroubových pružin s paralelními tlumiči. Tento podvozek se využívá na tramvajích dle obrázku 5. aa, dd. [3]

**Tabulka 4. Technické parametry [10]**

Maximální rychlost	70 km/h
Nápravové zatížení	2 x 10 t
Rozvor	1800 mm
Rozchod	1435 / 1000 mm
Minimální rádius zatočení	15 m
Hmotnost podvozku	4,5 t



**Obrázek 18. Podvozek SF 30 C TFW (Siemens) [10]**

#### **COMBINO plus SF 30 TFV/LFW**

Tento podvozek je nápadně podobný předchozímu podvozku. Jedná se totiž o další vývojový stupeň podvozku Combino SF 30 TFV. Rozdíl je v tom, že se Combino plus SF 30 TFW používá na tramvajích konceptu dle obrázku 5j, tedy v ose skříňové tramvaje. Na obrázku je vidět, že se liší i sekundární vypružení, které je zde provedeno čtyřmi pryžovými silentbloky. Tyto silentbloky dovolují poměrně velké příčné posuny. Podélné tažné a brzdící síly se z podvozku na skříň přenášejí tažně tlačnou tyčí. Konce této tyče jsou uloženy v silentblocích. Tento podvozek dovoluje vertikální pohyb o cca 5°. [3, 10]

**Tabulka 5. Technické parametry [10]**

Maximální rychlost	70 km/h
--------------------	---------

Nápravové zatížení	2 x 10 t
Rozvor	1800 mm
Rozchod	1435 / 1000 mm
Minimální rádius zatočení	15 m
Hmotnost	3,2 t



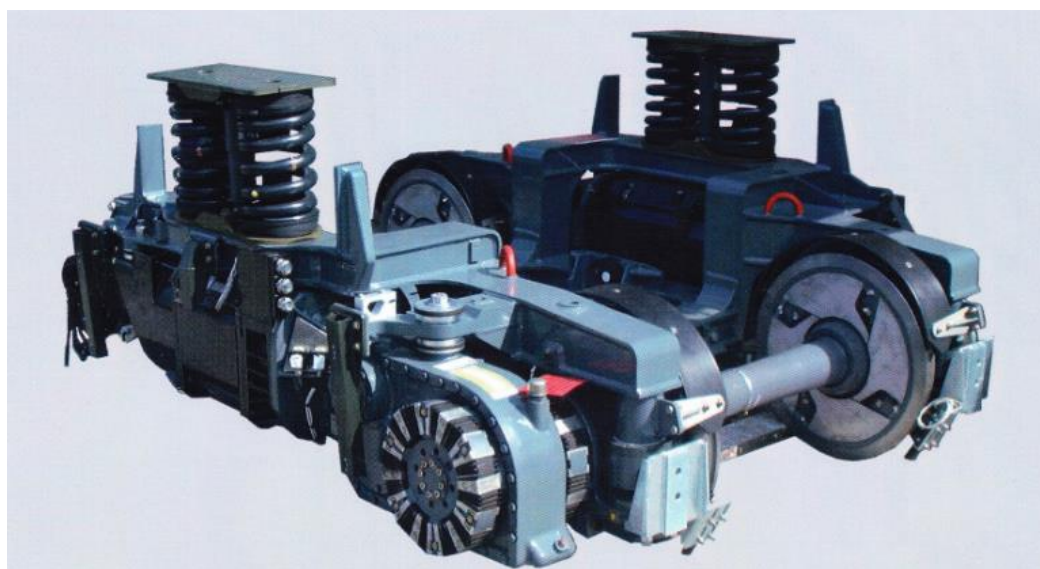
**Obrázek 19. Combino plus TFW (Siemens) [10]**

### **S 1000 (BOMBARDIER)**

Rám tohoto neotočného nízkopodlažního podvozku značky Bombardier je svařované konstrukce, složený z podélníků a příčníků skříňovitého průřezu. Poloha motorů je na vnější straně rámu podvozku. Krouticí moment jde z motoru, přes spojku, do kuželové převodovky, z které je klasické dvojkolí poháněno ještě přes pružnou pryžovou spojku, která je součástí převodovky. Brzda je zde kotoučová a umístěná je z druhé strany nápravy, než je převodovka. Reakční síly od kroutících sil převodovky jsou zachyceny závěskou, která je dobře na obrázku vidět. Primární vypružení a zároveň i vedení dvojkolí zajišťují čtyři pryžové pružící prvky na každé z náprav. Sekundární vypružení zajišťují čtyři šroubovitě pružiny flexi-coil. Díky výhodám flexi-coilových pružin nepotřebuje podvozek příčný stabilizátor. Kola jsou zde použita o průměru 560 mm a vždy uvnitř s tlumící vložkou. Podélné síly jsou z podvozku na skříň přenášeny čtyřmi konzolami s pružnými narážeci. Uprostřed příčniku je mechanismus na přenos tažných a brzdných sil. Mezi tímto mechanismem a rámem jsou připevněné hydraulické tlumiče, které brání vrtivým pohybům. [3, 11]

**Tabulka 6. Technické parametry [11]**

Maximální rychlost	70 km/h
Maximální nápravové zatížení	11 t
Rozchod	1000 / 1435 mm
Rozvor	1850 mm
Výkon motorů	2 x 100 kW
Výška podvozku pod nejnižší podlahou	310 mm
Průměr kol	560 / 500 mm
Hmotnost trakčního / běžného podvozku	4,7 / 3,3 t



**Obrázek 20. S1000 Bombardier [11]**

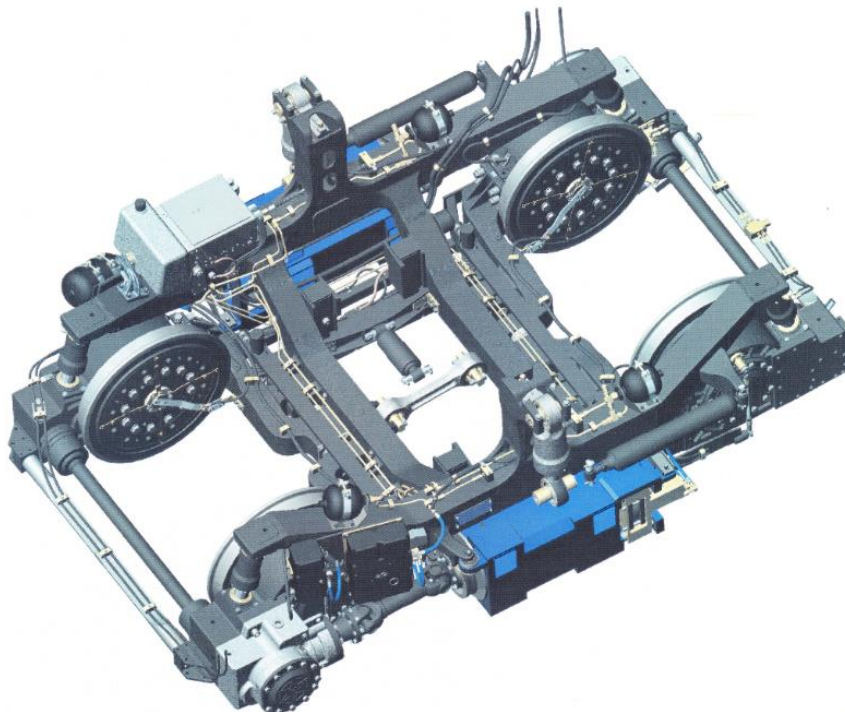
### **DG 1000/DG1235 (KONČAR, SAMES)**

Firma SAMES na úzkorozchodné tramvaji TMK 2200 představila podvozek neobvyklé konstrukce. Není zde použito ani nápravnice, ani běžného dvojkolí. Ve svařovaném rámu podvozku s dvěma příčnicími a dvěma podélníky je ještě jeden rám, který je tvořen ložiskovou skříní (na obrázku). Tento rám tvořený ložiskovou skříní funguje jako kývačka s hydropneumatickým primárním vypružením. Kola o průměru 660 mm jsou spojena s hřídelí nahrazující nápravu, která prochází ložiskovým domkem do kuželové převodovky. Takto uložená kola jsou



**Obrázek 21. Ložiskový domek s kývačkou [13]**

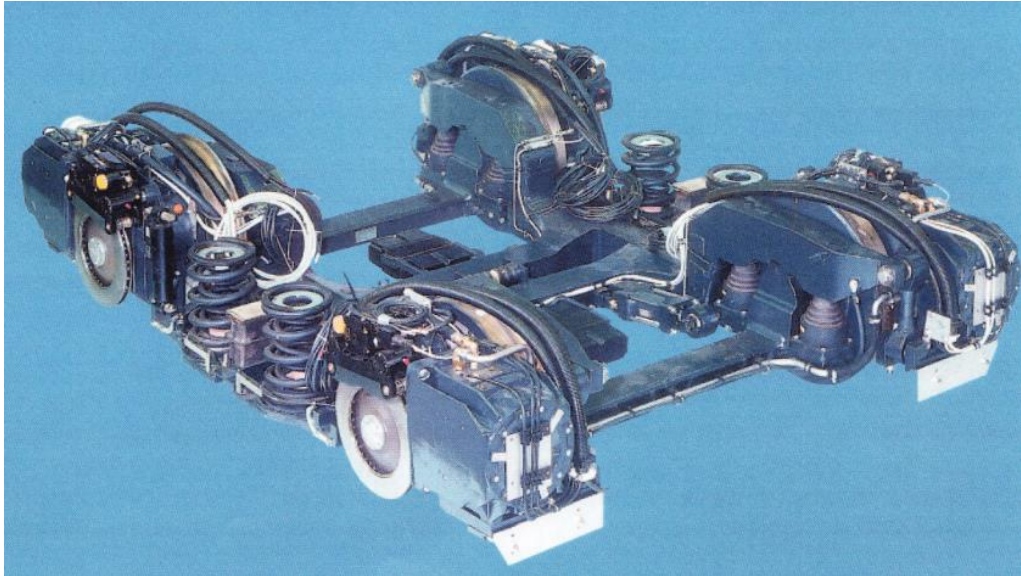
radiálně stavitelná při jízdě v zatáčce. Sekundární vypružení se skládá také z hydropneumatických pružin, na nichž je uložena skříň vozu. Podélné síly jsou z podvozku na skříň přenášeny tažně tlačnou tyčí. Jsou zde dva asynchronní motory o výkonu jednoho 65 kW, uložené po stranách rámu podvozku. [3, 12, 13]



**Obrázek 22. DG 1000 / DG 1435 [12]**

### **INCENTRO (BOMBARDIER)**

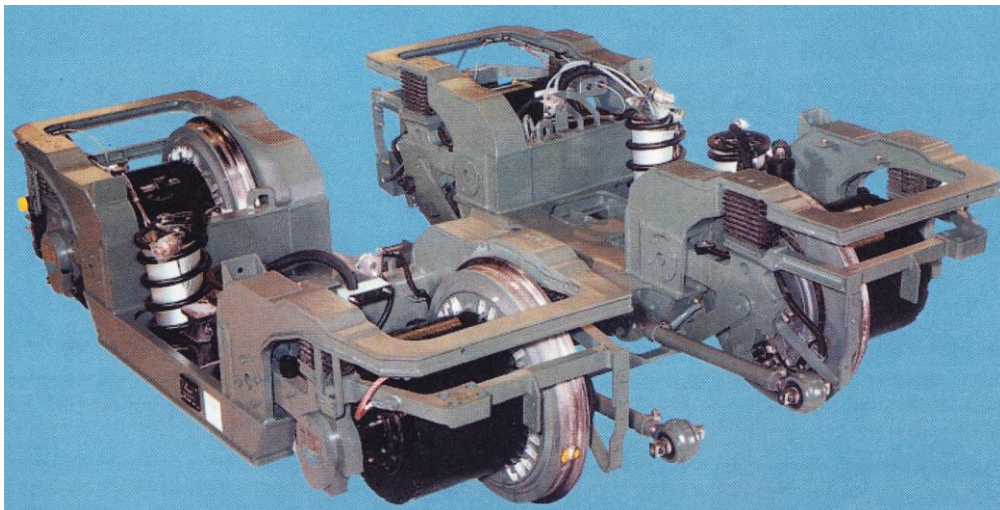
Tento 100% nízkopodlažní podvozek má svařovaný rám tvaru H z odlívaných částí. Primární vypružení obstarává pár pryžových kuželových pružin na každé straně mezi nápravnicí a rámem. Sekundární vypružení je docíleno duplexními šroubovitými pružinami s paralelními pryžovými narážkami. Pryžové disky snižují přenos hluku konstrukcí. Brzdy jsou zde kotoučové. Kotouč je z vnější strany každého kola. Jsou zde čtyři elektromotory, vždy jedno na každém kole. Rozchod podvozku je 1435 mm. Rozvor je 1800 mm. Průměr kola je 630 mm. Maximální rychlost je 80 km/h, Maximální zatížení na nápravu je 10 t. [15]



**Obrázek 23. Incentro (Bombardier) [15]**

### **VARIOTRAM (BOMBARDIER)**

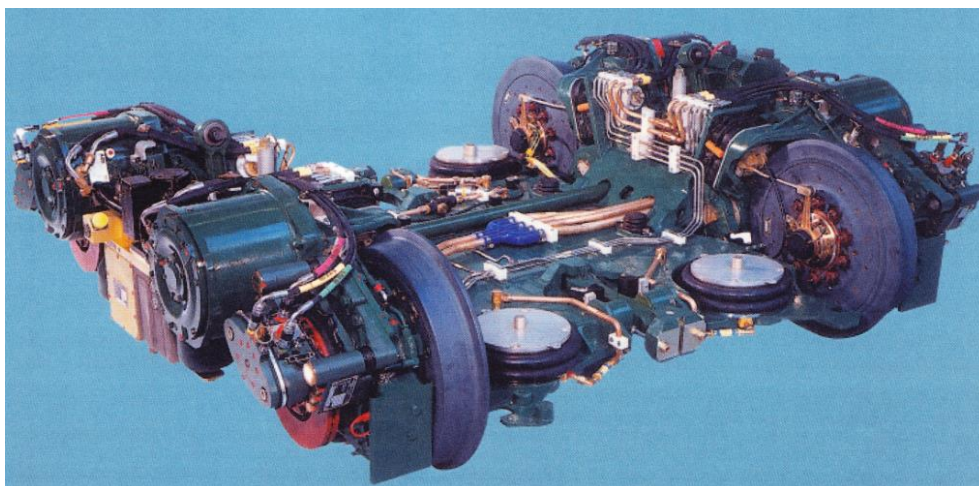
Tento 100% nízkopodlažní podvozek byl poprvé vyroben roku 1992. Řada těchto podvozků se vyznačuje výbornými jízdními vlastnostmi a jednoduchou údržbou. Rám je svařované konstrukce. Primární vypružení je docíleno pryžovými silentbloky, Jako sekundární vypružení jsou užity šroubovitě pružiny s pryžovými dorazy. Kola jsou samostatně uložena na nápravnicích. Na každém kole je elektromotor. Převodovka odpadá. Brzdy jsou zde 2 elektromagnetické zpomalovací a 2 hydraulické brzdy na záchrané brždění. Rozvor podvozku je 2100 mm, rozchod úzký, kola průměru 630 mm. Maximální rychlost je 70 km/h. Maximální zatížení na nápravu je 10 t. [16]



**Obrázek 24. Podvozek Variotram (Bombardier) [16]**

### **EUROTRAM (BOMBARDIER)**

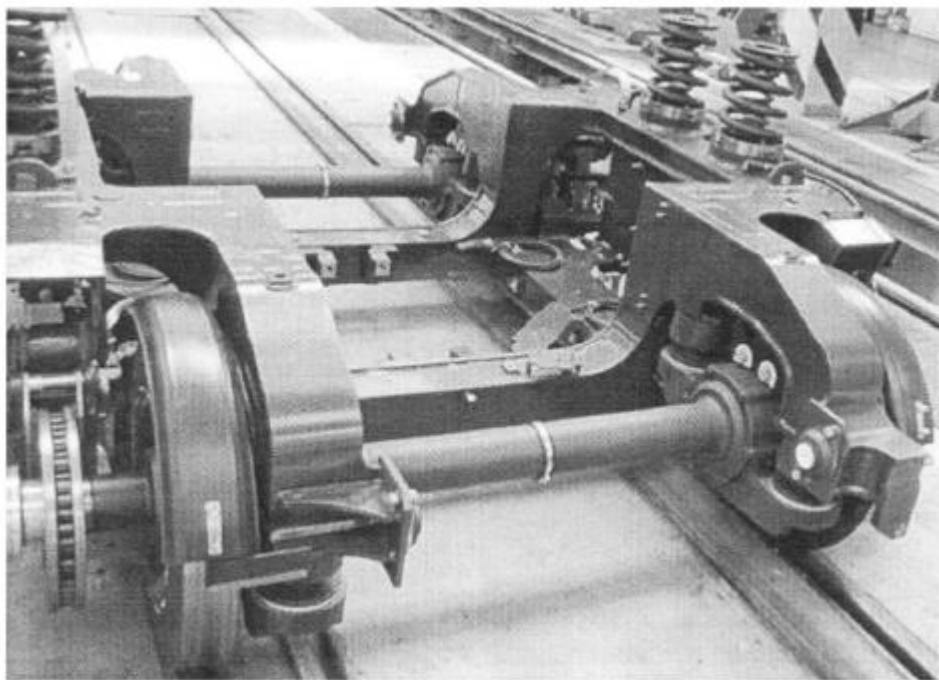
Tento podvozek byl vyvinut pro Tramvaj Incentro. Podvozek je modulární konstrukce. Tento typ konstrukce od prvního vyvinutí stále získává na popularitě. Rám je unikátního tvaru o nízké hmotnosti. Jsou zde čtyři asynchronní motory s převodovkami umístěné na kývačce, na jejímž konci je nápravnice. Kola jsou skládaná s tlumicími vložkami. Brzdění je možné třemi způsoby. Je zde motorová brzda s možností rekuperace energie, kotoučová hydraulická brzda a elektromagnetická brzda. Primární vypružení je zde docíleno pryžovými silentbloky. Sekundární vypružení obsahuje čtyři vzduchové měchy. Rozchod podvozku je 1435 mm, rozvor je 1400 mm, Průměr kola je 550 mm. Maximální rychlost je 80 km/h. Maximální zatížení na nápravu je 18,3 tuny. [17]



**Obrázek 25. Podvozek Eurotram (Bombardier) [17]**

### **SOLARIS TRAMINO S 105P**

Rám tohoto podvozku je svařované konstrukce složený z plechů a odlitků v místech, kde je vyšší namáhání. Rám je otevřený s dvěma příčníky. Je zde běžné dvojkolí, tedy kola o průměru 620 mm nalisovaná na nápravě. Z jedné strany nápravy je nalisovaný kotouč kotoučové brzdy, z druhé strany nápravy je dvojkolí poháněno a to od podélně uloženého asynchronního motoru na vnější straně rámu, přes kuželočelní převodovku, která má převodový poměr 1:6,699. Primární vypružení zde obstarávají kuželové silentbloky. Dynamické stlačení silentbloků je 12 mm. Čtyři duplexní šroubovitě pružiny zajišťují funkci sekundárního vypružení. Rozvor podvozku je 1800 mm, rozchod je 1435 mm, výkon jednoho motoru je 105 kW. [3]



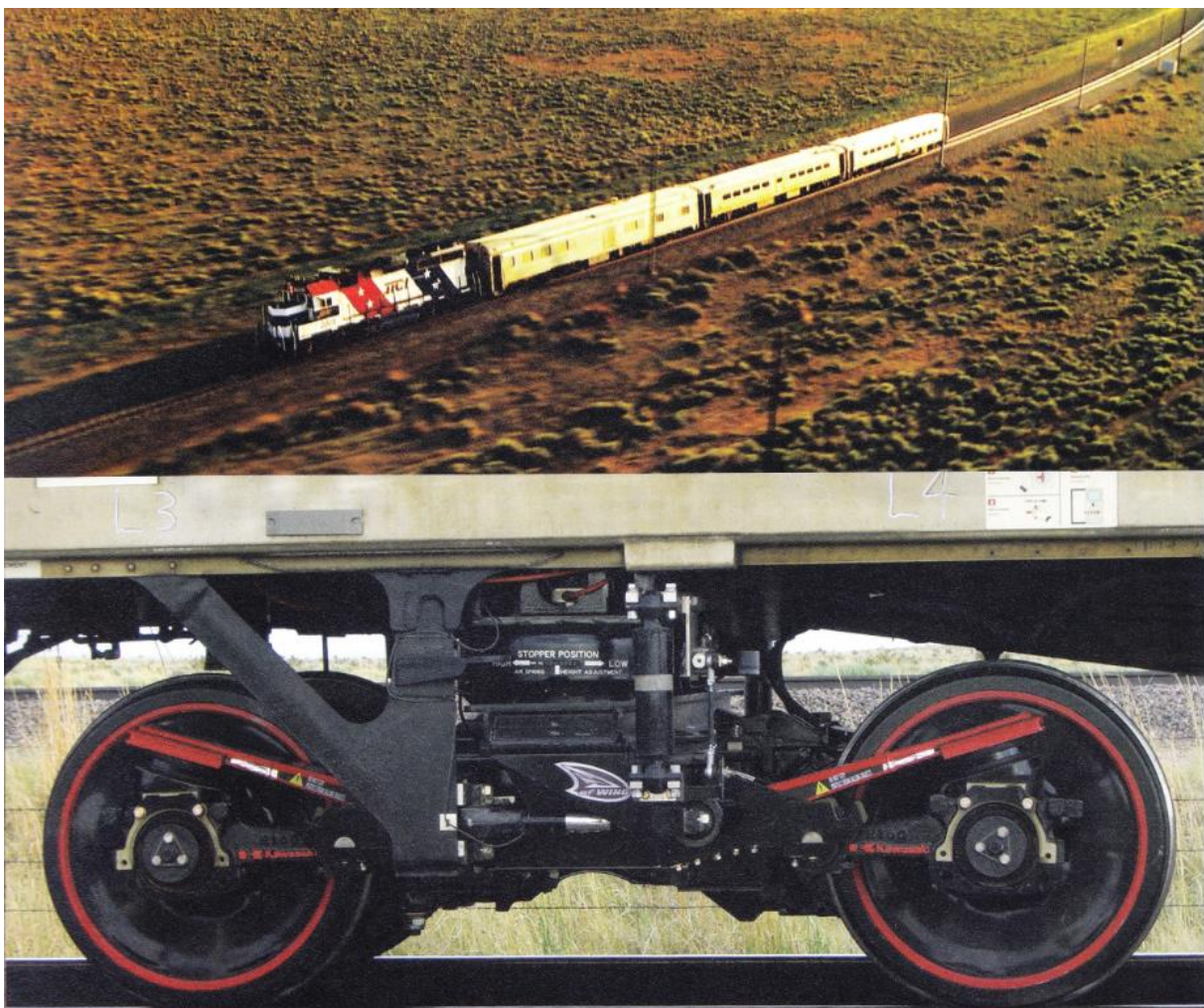
**Obrázek 26. Neotočný podvozek tramvaje Solaris Tramino S 105p [3]**



### 3 Zajímavě řešené podvozky kolejových vozidel

#### 3.1 Podvozek efWING (KAWASAKI)

Tento podvozek byl vyvinut pro podvozek železničního vozidla. Rám je svařované konstrukce unikátního tvaru. Vedení dvojkolí je zajištěno kývačkou. Nejzajímavější věc na tomto podvozku pro DP je docílení primárního vypružení pomocí listové pružiny z kompozitního materiálu. Kompozitní materiál je konkrétně u tohoto podvozku CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), což je vyztužený kompozit složený z uhlíkových vláken v plastické matici. Pružina je na svých koncích uložena volně na pryžových silentblocích, volně proto, že při pruživém pohybu mění pružina svojí absolutní délku a musí být v uložení pružiny vůle. Výrobce udává, že použitím kompozitní pružiny na místě primárního vypružení došlo k úspoře 40% hmotnosti rámu podvozku. [18]

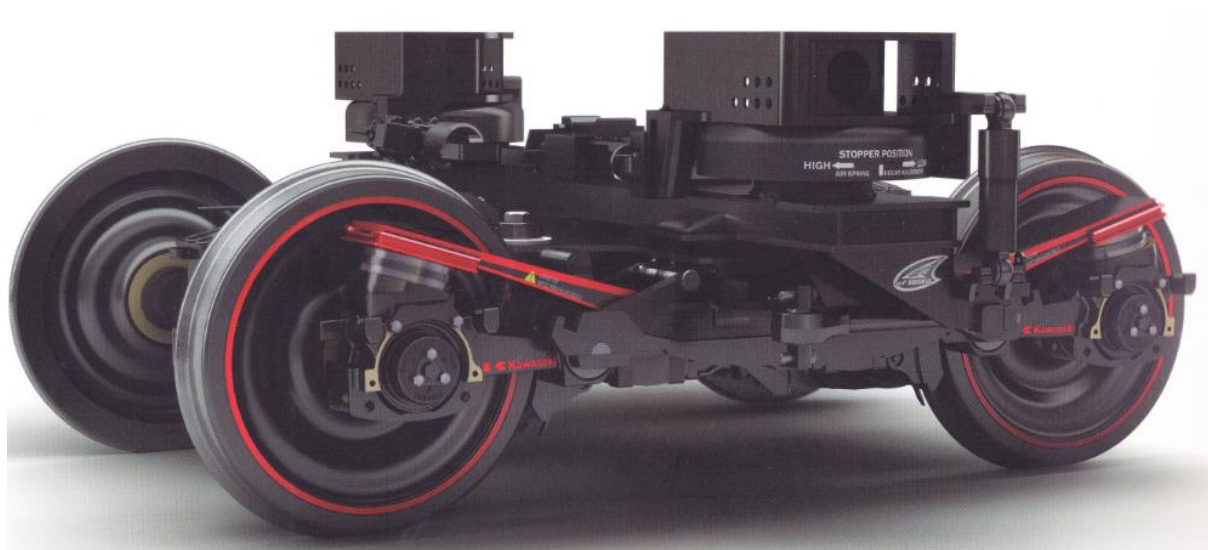


Obrázek 27. Podvozek efWING (Kawasaki) [18]

## 4 Návrh vlastní koncepce

Před samotným návrhem budoucí koncepce a konstrukčního uspořádání podvozku tramvajového vozidla byla provedena v druhé kapitole DP rešerše stávajících tramvajových podvozků předních evropských výrobců, které jsou dnes dostupné na trhu. Tato studie objevila několik zajímavostí a konstrukčních zásad, na které musel být při návrhu brán zřetel. Podvozek musel být navrhován dle normy vztažné linie obrysu vozidla ČSN 28 0318: 1994.

Jeden z hlavních cílů, který byl v kapitole 1.2 stanoven, je úspora hmotnosti. Zcela náhodou byl objeven prospekt firmy Kawasaki. Tento prospekt představuje podvozek efWING železničního vozidla zmíněný v kapitole 3.1. Jak již bylo napsáno, velká výhoda efWING je v jeho nízké hmotnosti díky užití nestandardního rámu, vedení a nestandardního primárního vypružení.



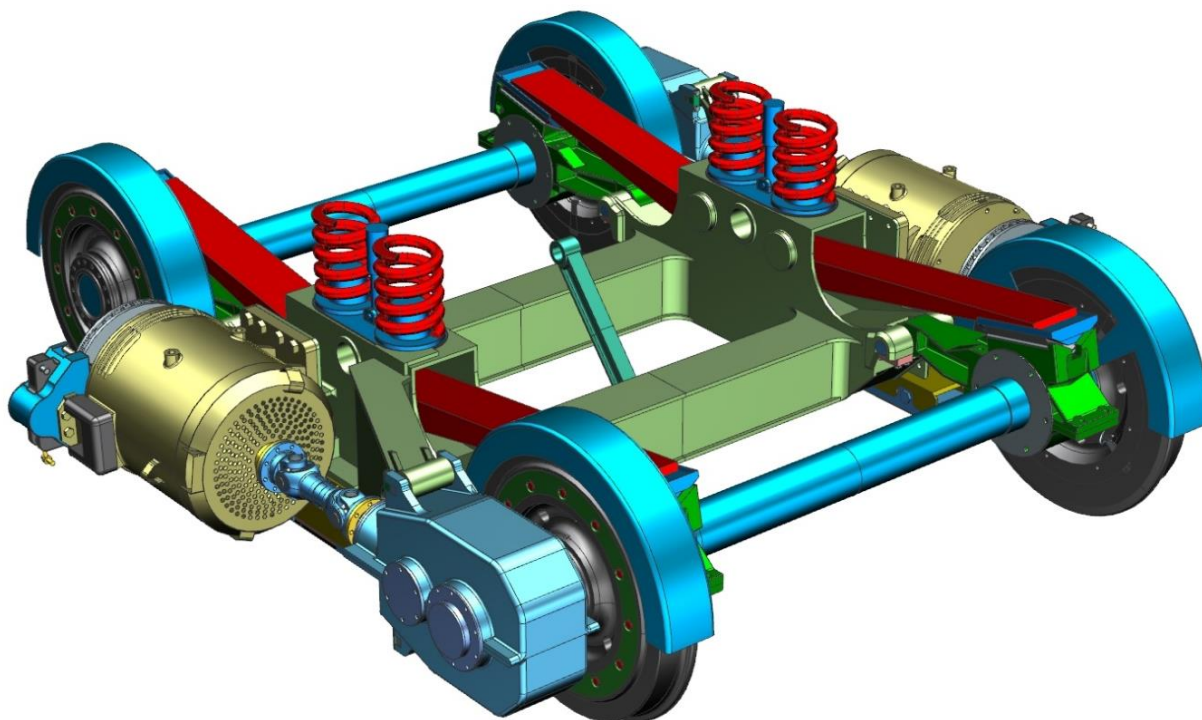
**Obrázek 28. efWING pro železniční vozidlo [18]**

Podvozek efWING mě přivedl na myšlenku navrhnout koncept neotočného podvozku pro nízkopodlažní tramvaj, který by měl podobný způsob primárního vypružení. Splnit toto předsevzetí znamenalo i vytvoření nestandardního vedení dvojkolí a nestandardního tvaru rámu podvozku.

Aby bylo možné posunout podlahu, co nejbliže k zemi, bylo zapotřebí umístit pohonné ústrojí na bok podvozku, konkrétně na boku rámu podvozku vytvořit konzoli, ke které se přišroubuje elektromotor a další nutné prvky. Podobná uspořádání se s výhodami již používají a jsou popsány v kapitole 2.2.

S umístěním pohonného ústrojí na vnější stranu rámu vyvstala otázka uchycení dalších prvků, jakým je například převodovka a kotoučová brzda. Kotoučová brzda byla uvažována v podélné ose elektromotoru z druhé strany, než je kloubová hřídel a převodovka. Uchycení hydraulické kotoučové brzdy bylo docíleno přírubou k elektromotoru. Toto umístění kotoučové brzdy je příznivé v ohledu na zástavbový prostor podvozku. Převodovka byla k rámu podvozku chycena přes závěsku, která musela být dostatečně robustní, aby dokázala zachytit reakční síly z převodovky. Krouticí moment z elektromotoru do převodovky je přenášen již zmíněnou

kloubovou hřídelí. Detailnější rozbor komponent spojených s trakcí je v kapitole *Pohonné ústrojí*. Jako primární vypružení bylo zvoleno již zmíněné nekonvenční řešení, tedy takové, které se běžně nevyužívá, ale přesto by s sebou neslo určité výhody, například na úspore hmotnosti. Na místě primárního vypružení byla po sléze zvolena listová kompozitní pružina pro její velmi výhodný poměr hmotnosti a tuhosti. Výsledný návrh podvozku vidíte na obrázku.



**Obrázek 29. Vlastní koncepce**

Takovýto koncept tramvajového podvozku se na trhu zatím neobjevuje. Zakomponování listové pružiny do podvozku s sebou přináší určitý odklon od běžně užívaných rámu a vedení dvojkolí.

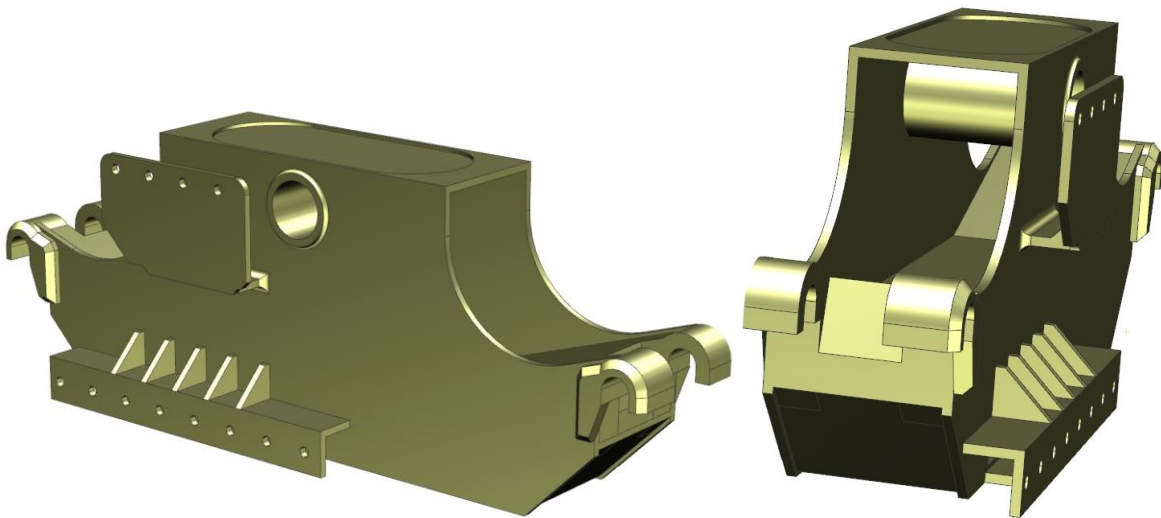
Rám podvozku je svařované konstrukce z plechů a odlitků. Obsahuje dva příčníky. Na jednom z příčníků je závěska pro přenos tažných a brzdných sil z podvozku na skříň tramvajového vozidla. Z důvodu úspory hmotnosti nebyl zvolen rám běžného tvaru H. Chybí zde klasické podélníky. Místo nich na rámu byly vytvořeny díly tvaru „lodžky“ s ohledem na tvar a rozměry listové pružiny. Listová pružina bude procházet vnitřkem „lodžky“ a bude silou působit na trubku, která je do horní části lodžky navařena. Není zde žádná pevná vazba pružiny s rámem a není ani zapotřebí. Tvar listové pružiny a silové účinky na ni působící předurčují, že se pružina bude sama vystředovat.

Důležité pro listovou pružinu z kompozitního materiálu je, udělat jí jednoduchého tvaru bez vrubů či rohových přechodů kvůli podélnému rozložení uhlíkových vláken, které nesmí být přerušeny. Každé takové přerušování vláken, například vyvrtáním otvoru, by mělo za následek velkou ztrátu pevnosti.

Je nutnost, aby v budoucnu byla pružina namáhána ve směru toku uhlíkových vláken. Většina vrstev v pružině bude mít výhodně zvolenou orientaci vláken převážně v podélném směru

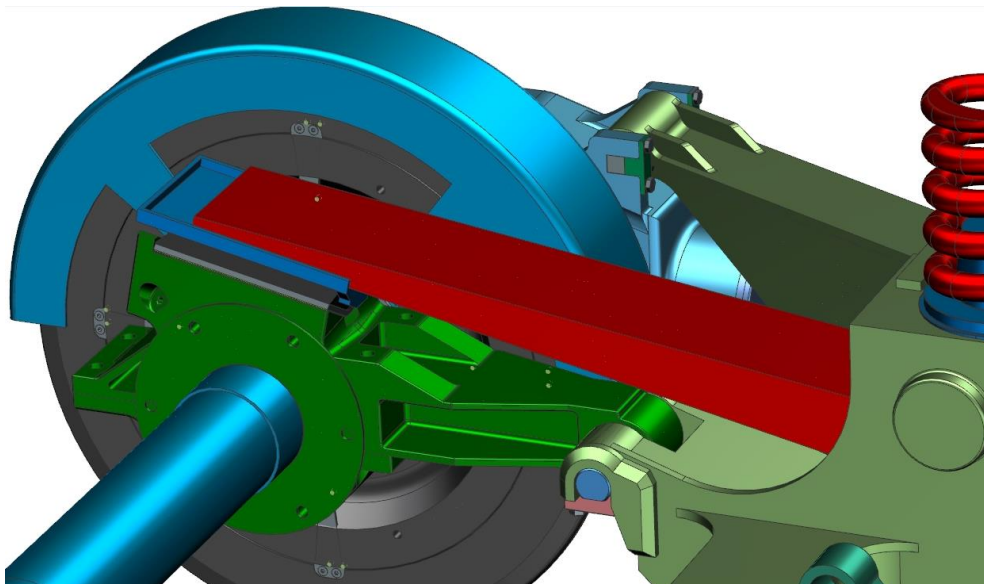
pružiny, protože je předpoklad namáhání pružiny pouze ohybovým napětím (vlákna budou tažena).

Velké namáhání krutem, které vzniká při jízdě tramvaje v oblouku, nesmí přecházet do pružiny z důvodu porušení kompozitní pružiny. Toto namáhání krutem by v pružině způsobovalo smyková napětí mezi jednotlivými vrstvami a celkové namáhání by chybně nebylo ve směru toku vláken.



**Obrázek 30. Díl rámu tvaru "lod'ky"**

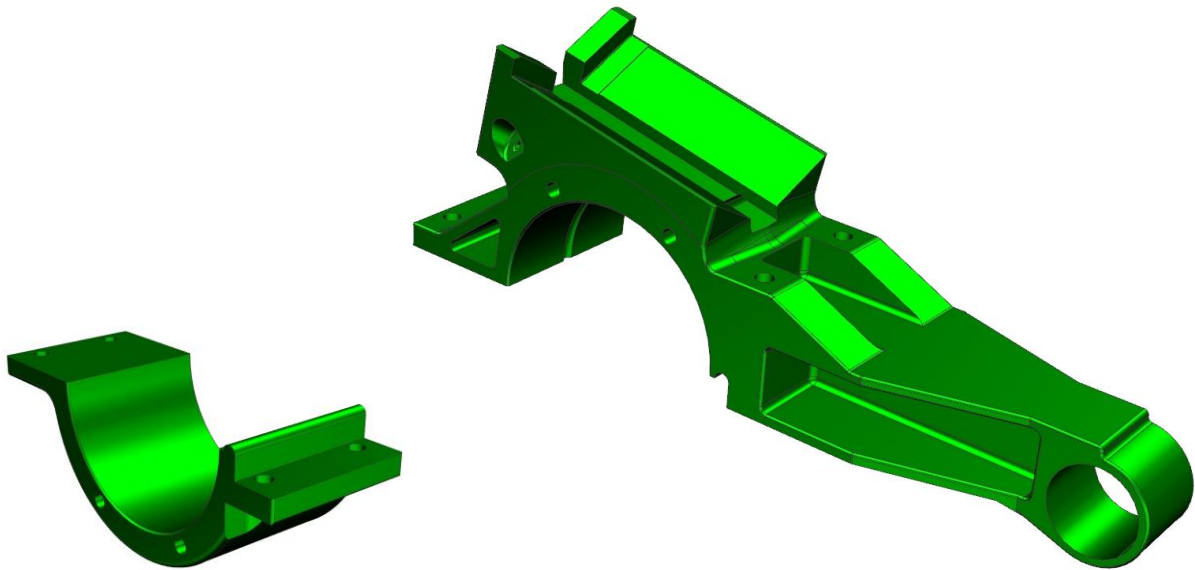
Krutové namáhání vnikající převážně při jízdě tramvaje obloukem musí zachytit vedení dvojkolí. Vedení je zajištěno tak zvanými kývačkami. To je díl, který je situován mezi rámem a dvojkolím (na obrázku sytě zelený).



**Obrázek 31. Kývačka**

Při návrhu kývačky a vedení dvojkolí jsem se řídil několika požadavky, které si celý koncept podvozku vynucoval. Kývačku a celé vedení bylo nutné umístit za vnitřní stranu kola. Důvod

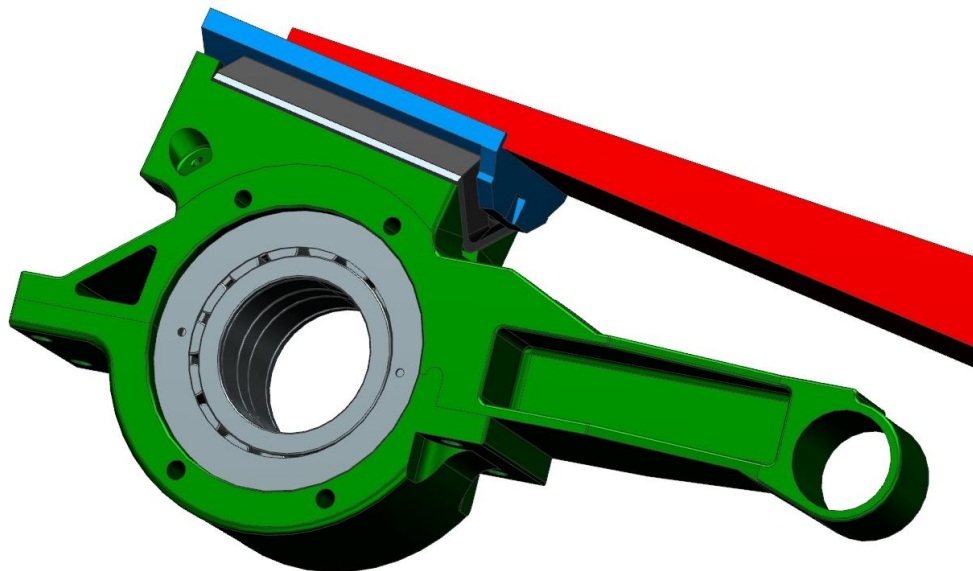
je ten, že na vnější straně kola je umístěna převodovka. Kolo je na nápravu lisované, a proto kývačka musí být rozebíratelná. Je ze dvou částí.



**Obrázek 32. Kývačka**

Horní, složitější část začíná okem, kterým prochází silentblok zajišťující otočnou vazbu mezi rámem a kývačkou. Od oka je rameno kývačky rozšiřující se profilu  $I$  a volně přecházející do části tvořící zároveň místo pro uložení nápravové ložiskové jednotky. Ložisková jednotka je vymezena sadou kroužků.

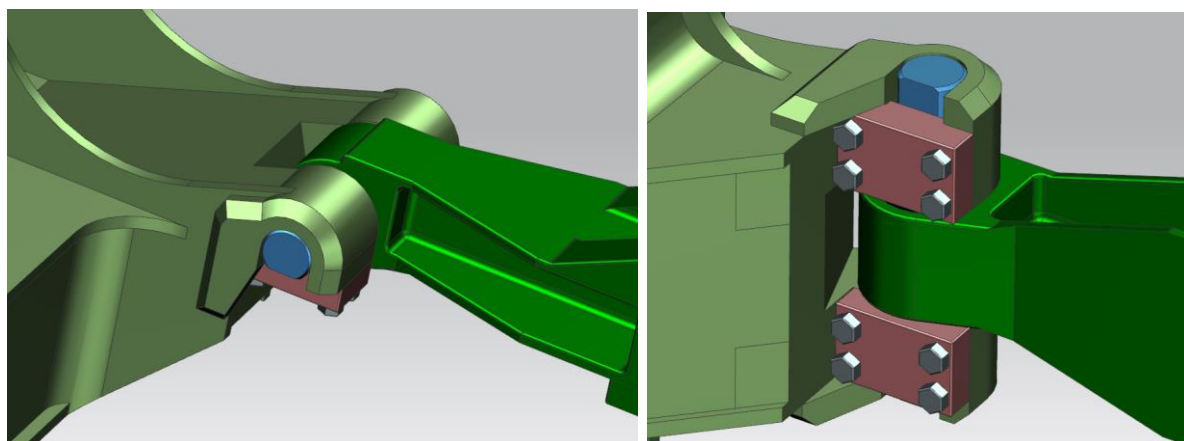
Ve vršku horního dílu je vybrání ve tvaru  $V$ , které slouží jako dosedací část pro pryžo-ocelové „sedlo“. Toto „sedlo“ tvoří tlumící mezičlen mezi kývačkou a koncovým listem pružiny.



**Obrázek 33. Pryžo-ocelové "sedlo"**

K horní části kývačky bude přiložena spodní část a spojena šrouby. Protože vnitřní plocha spodní části bude také obklopotvat ložiskovou jednotku, musí být přiložena k horní polovině přesně, k tomu slouží vytvořené odskoky.

Již jsem zmiňoval, že otočné spojení kývačky s rámem bude docíleno přes silentblok. Toto spojení je dostatečně pevné a snadno konstrukčně řešitelné. [3]

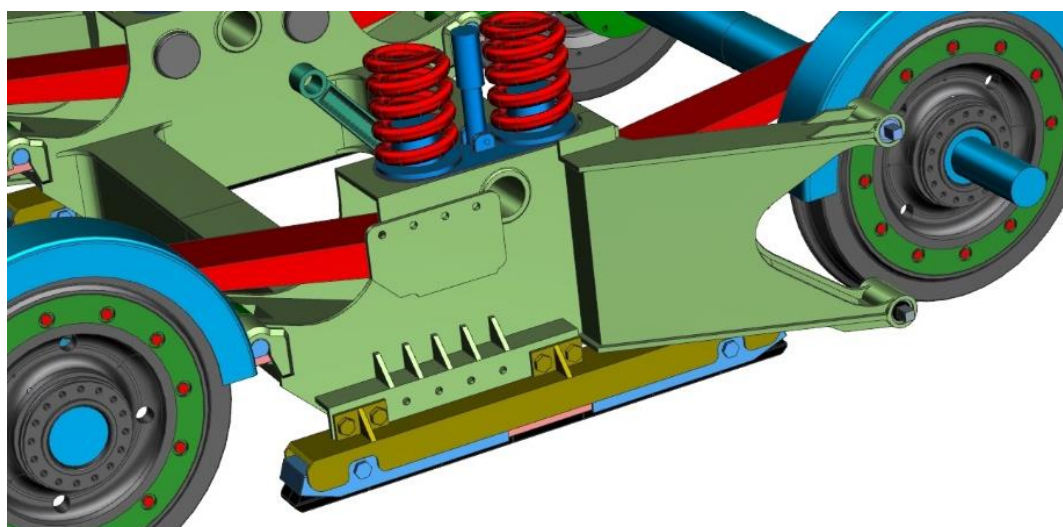


**Obrázek 34. Spojení silentblokem**

Do rámu jsou v místě silentbloků navařeny odlitky tvaru háků pro zvýšení pevnosti. Vnitřek háků tvoří lůžka pro konce silentbloků. K zajištění celého spojení slouží destičky (na obrázku růžové), které se přišroubují k hákům. Vedením dvojkolí kývačkou s použitím listové kompozitní pružiny na místě primárního vypružení oproti podvozkům s H-rámem by mělo přinést značnou úsporu hmotnosti celého podvozku.

Z obrázku 29 je vidět, že sekundární vypružení tvoří šroubovitě pružiny s paralelním tlumičem. Detailní popis a výpočet pro návrh rozměrů pružiny je v kapitole *Vypružení*.

Na podvozku je klasické dvojkolí, které tvoří plná náprava a na ní nalisovaná kola. Náprava je na jedné straně delší o kus (patrné z obrázku), na který přijde nalisovat ozubené kolo převodovky. Kolo je složené konstrukce uvnitř s tlumící pryžovou vložkou. Více informací je popsáno v kapitole *Dvojkolí*.



**Obrázek 35. Kolejnicová brzda na rámu a převislý konec nápravy**

Nejnižším místem podvozku, nepočítám-li věnec kola, je klasická kolejnicová brzda (obrázek 35). Je tvořena brzdícími segmenty (černá barva) uloženými v pouzdře (růžová barva), pouzdro

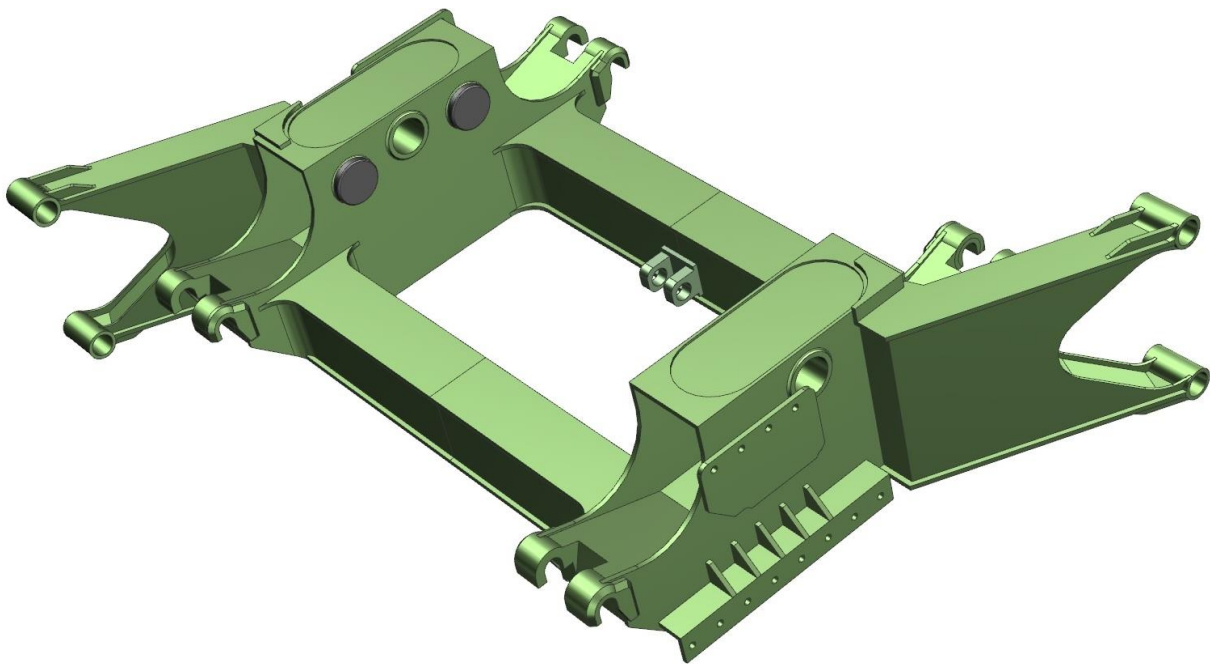
přišroubované k vnitřnímu obalu (modrá barva). Celá brzda je připevněna přes její vnější obal (khaki barva) konzolou na rám podvozku.

Neotočný nízkopodlažní podvozek byl navržen pro rozchod kolejí 1435 mm. Rozvor podvozku byl stanoven na délku 1850 mm.

#### 4.1 Rám

Rám podvozku je svařované konstrukce. Je složen převážně z plechů a v místech s větším namáháním jsou navařené odlitky. Tvar a jednotlivé části rámu vznikaly s ohledem na další části podvozku.

Střední část rámu tvoří dva menší svařované příčnický skříňového průřezu, vytvořené z plechů o tloušťce 10 a 6 mm. Tloušťky použitých plechů byly vždy konzultovány s vedoucím práce z důvodu jeho bohatých zkušeností. Plechy musí být co nejtenčí z důvodu úspory hmotnosti, ale zároveň rám musí být dostatečně tuhý a pevný. Výška příčnicků je 180 mm, šířka (bráno od vnější strany svislých plechů příčnicku) je 120 mm. Příčnický jsou posazené, co nejnižší k zemi. Vrchní části příčnicků nesmí být výš, než náprava podvozku. Na jednom z příčnicků je navařená konzola, do které přijde uchytit tažně tlačná závěska přes silentblok.

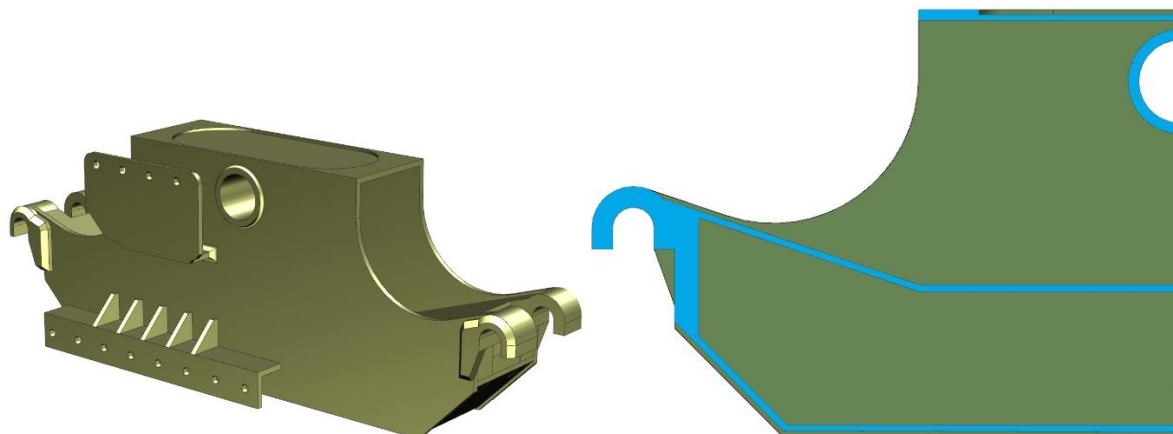


**Obrázek 36. Rám**

Přechod z příčnicků do bočních částí rámu je plynulý. Z obrázku rámu je patrné, že klasické podélníky jsou zde nahrazeny svařovanou konstrukcí tvaru „lodžky“ o které již bylo psáno (obrázek 36, 37). Tato konstrukce vznikla svařením plechů o tloušťce 10 mm. Boky „lodžky“ ohraničují prostor o šířce 163 mm, tedy dostatečný pro vedení listové pružiny vnitřkem podélníku. Na obrázku 37 je v řezu vidět, jaký tvar má robustnější odlitek namáhaných háků.

V horní části „lodžky“ je v plechu vyfrézována mělká kapsa pro ustavení sekundárního vypružení. Mezi svislými plechy tvaru „lodžky“ je v horní části navařená trubka s povrchovou úpravou, která bude ve styku s listovou pružinou. Jako vylepšení se do této trubky může přivést

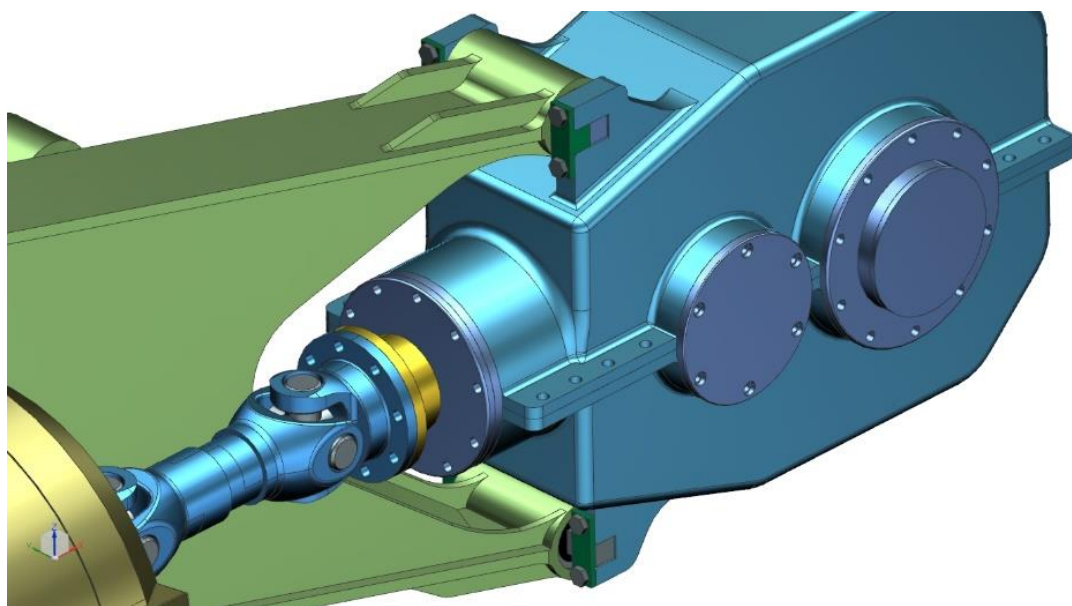
trubičkou mazací olej, který bude ještě více snižovat tření mezi trubkou a listovou pružinou. Na vnitřních stranách podélníků jsou přidělané pryžové segmenty, které plní funkci příčných dorazů mezi podvozkem a skříní vozidla.



**Obrázek 37. „Lod'ka“ bez závěsky a řez její polovinou**

Na vnější strany podélníků jsou přivařené konzoly. Tyto konzoly slouží k šroubovému spojení asynchronního elektromotoru a kolejnicové brzdy s rámem. Zvláště na spodní konzolu budou působit velké síly, proto je vyztužena žebry.

Na vnějších stranách rámu podvozku působí dominantně závěska převodovky (obrázek 36, 38). Tato závěska zachycuje reakční síly od krouticího momentu a hmotnosti převodovky. Tyto síly budou dosti velké, a proto je závěska relativně robustní konstrukce. Je skříňového průřezu, svařená z plechů o tloušťkách 6 a 10 mm. V místě spojení závěsky s podélníkem bude největší zatěžovací moment. V tomto místě je závěska rozšířena. Na druhé straně je závěska zakončena dvěma oky pro uložení silentbloků. Tyto konce jsou vyztuženy žebry.



**Obrázek 38. Detail závěsky**



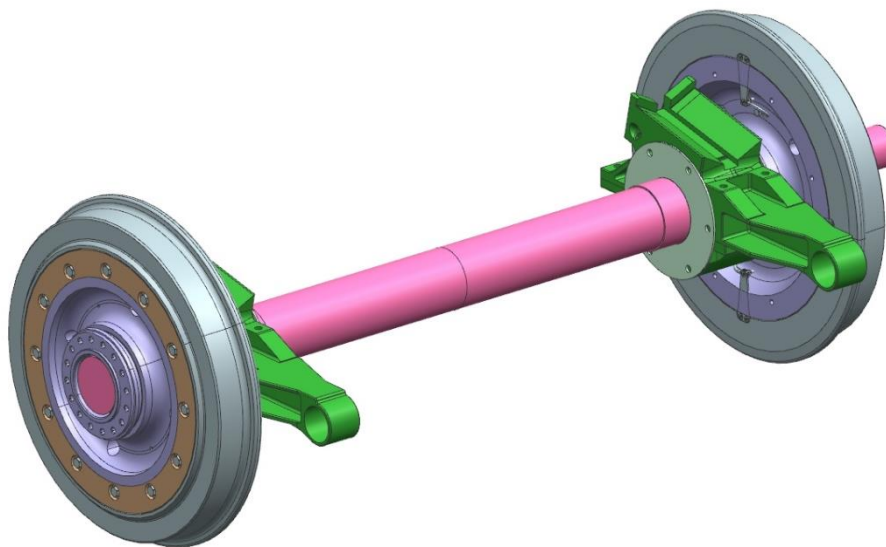
Rám je hlavní nosný prvek celého podvozku. Spolu s vedením přenáší veškeré síly z dvojkolí na skříň tramvajového vozidla. Materiál plechů nese označení S355J2G dle normy EN 10 025. Tato ocel je vhodná ke svařování, má vysokou pevnost a odolává dynamickému namáhání i při nízkých teplotách. Označení J2 říká, že vrubová houževnatost KCU neklesne pod hodnotu  $27 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$  ani při teplotách do  $-20^\circ \text{ C}$ .

Celkové rozměry rámu podvozku jsou, (bráno od obrysových částí rámu): délka je 1360 mm, šířka je 1997 mm a výška 420 mm. Celková hmotnost rámu je 320 Kg.

## 4.2 Dvojkolí

Dvojkolí tvoří náprava a dvě kola na ní nalisované. Dále jsou na nápravě nalisovány nápravové ložiskové jednotky a uzavřené v kývačce. Kývačka byla blíže popsána v úvodním povídání kapitoly 4. Mezi nápravou a kývačkou je umístěna ložisková jednotka, která přenáší veškeré síly z dvojkolí, přes primární vypružení a kývačku na rám. Kontrolní výpočet trvanlivosti zvolené ložiskové jednotky je obsažen v následující podkapitole.

Důležitým rozměrem pro návrh dvojkolí je rozchod koleje, po které bude tramvaj (podvozek) v budoucnu jezdit. Toto dvojkolí je navrženo pro rozchod koleje 1435 mm. Vzdálenost styčných kružnic byla dodržena na hodnotu  $2s = 1500 \text{ mm}$ . Průměr kol je 610 mm. Rozkolí je 1360 mm. Vzdálenost středů ložiskových domků je 1196 mm. Náprava je na jedné straně převislá. Na tuto převislou část nápravy bude nalisována převodovka.



Obrázek 39. Dvojkolí

### 4.2.1 Nápravové ložisko – ložisková jednotka

Ložisková jednotka (obrázek 33) byla zvolena dle průměru nápravy pod ložiskem. Trvanlivost zvoleného ložiska byla zkontrolována výpočtem. Byl použit vzorec  $L_n = \left(\frac{C}{P}\right)^p > L_{n_{požadované}}$ ,

kde  $C$  je základní dynamická únosnost ložiska.  $P$  je ekvivalentní dynamické zatížení ložiska,  $p = \frac{10}{3}$  pro válečkové ložisko.

Parametry pro výpočet:

Průměr kola je	$\varnothing d = 610 \text{ mm}$
Maximální rychlost tramvaje je	$v = 70 \text{ km/h}$
Požadovaná trvanlivost je	$L_{n_{\text{požadovaná}}} = 1500000 \text{ km [1]}$
Radiální zatížení je	$F_r = P_1 = 73740 \text{ N}$
Axiální zatížení je	$F_a = H = 17400 \text{ N}$
Základní dynamická únosnost je	$C = 553000 \text{ N}$

Hodnoty radiálního ( $F_r$ ) a axiálního ( $F_a$ ) zatížení jsou spočítány v kapitole 4.2.3.1.

Výpočet ekvivalentního zatížení ložiska ( $P$ ):

$$P = 0,92 \cdot F_r + 0,4 \cdot F_a \quad \text{pro } \frac{F_a}{F_r} > 0,15$$

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{17400}{73740} = 0,236 > 0,15$$

$$P = 0,92 \cdot 73740 + 0,4 \cdot 17400 =$$

$$P = 74800 \text{ N}$$

Přepočet požadované trvanlivosti z km na otáčky:

$$l_k = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 0,61 =$$

$$l_k = 1,9154 \text{ m} \quad , \text{ kde } l_k \text{ je délka kružnice kola.}$$

$$L_{n_{\text{požadované}}} [\text{ot}] = \frac{L_{n_{\text{požadované}}} [\text{m}]}{l_k} = \frac{1500000000}{1,9154} = 783,1 \cdot 10^6 \text{ otáček}$$

Základní trvanlivost ložiska:

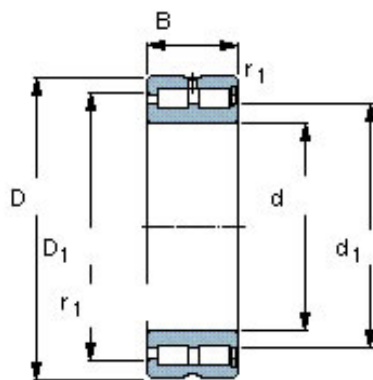
$$L_n = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{553000}{74800}\right)^{\frac{10}{3}} =$$

$$L_n = 787,2 \cdot 10^6 \text{ otáček}$$

$$L_n = \left(\frac{C}{P}\right)^p > L_{n_{\text{požadované}}}$$

$$787,2 \cdot 10^6 > 783,1 \cdot 10^6 \dots \Rightarrow \text{Ložisko vyhovuje.}$$

Bylo navrženo a výpočtem zkontrolováno ložisko SKF NNCF 5024 CV. Vnější průměr  $D$  zvoleného ložiska je 180 mm. Vnitřní průměr  $d$  je 120 mm. Šířka ložiska  $B$  je 80 mm.

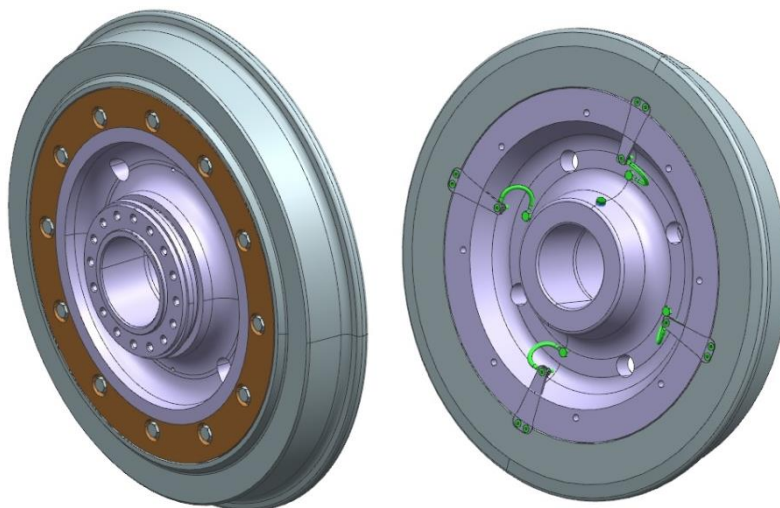


Obrázek 40. Parametry ložiska [20]

#### 4.2.2 Kolo

Pro návrh dvojkolí bylo navrženo složené kolo o průměru 610 mm. Kolo je složené z náboje (vnitřní průměr náboje je 115 mm.), z přitlačného kruhu, klínové pryžové vložky a z věnce. Po vložení pryžové vložky pod věnec kola se přišroubováním přitlačného kruhu (hnědé barvy) k náboji (fialové barvy) zajistí celé kolo. Pryžová vložka tlumí vibrace, hluk a zároveň pruží.

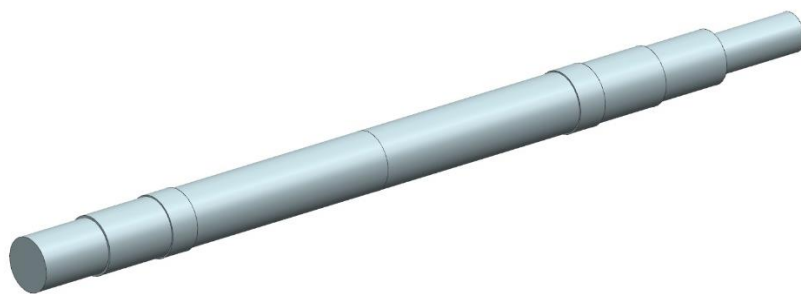
Nevýhody složeného kola jsou vyšší zahřívání, větší jízdní odpor, menší pevnost a vznik statické elektřiny. Na kole byly proto vytvořeny vodivé můstky pro odvod této statické elektřiny. Kolo je na nápravu nalisováno s přesahem za tepla. Navrhovaný materiál kola je ER8.



Obrázek 41. Kolo složené konstrukce

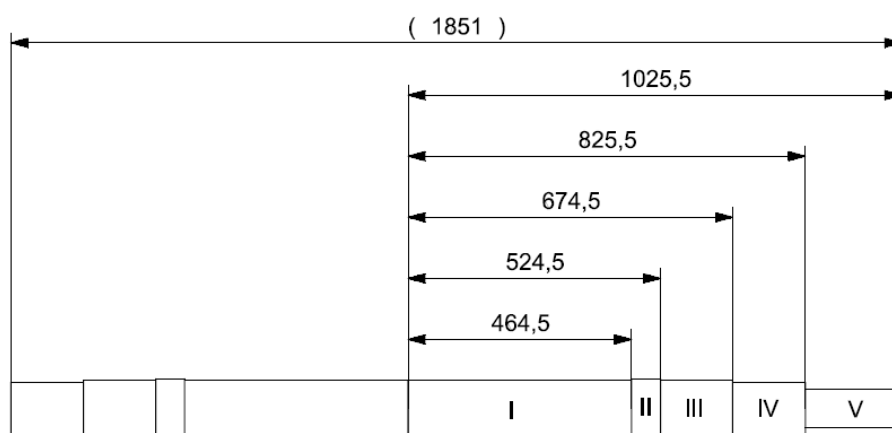
#### 4.2.3 Náprava

Náprava je velice zatěžovaná část dvojkolí ohybem za rotace. Je odstupňovaných průměrů, plného průřezu. V každém přechodu z menšího na větší průměr je rádius jako ochrana proti vrubům a koncentrátorům napětí. Materiálem nápravy byla zvolena ocel EA1N. Na nejužší místo nápravy bude nalisována převodovka. Náprava musí splňovat pevnostní výpočet dle normy ČSN EN 13 104.



**Obrázek 42. Náprava**

$\varnothing d_I = 125 \text{ mm}$                        $\varnothing d_{II} = 130 \text{ mm}$                        $\varnothing d_{III} = 120 \text{ mm}$   
 $\varnothing d_{IV} = 115 \text{ mm}$                        $\varnothing d_V = 100 \text{ mm}$



**Obrázek 43. Náprava-rozměrové schéma**

#### 4.2.3.1 Výpočet nápravy

Pro výpočet je nutností znát váhové parametry tramvajového vozidla, v jehož podvozku je náprava užitá. Bylo uvažováno tříčlánkové tramvajové vozidlo Citadis-Alstom s těmito parametry:

Hmotnost prázdného vozidla $m_v$	25 t
Počet podvozků	2
Počet sedadel	40
Maximální počet cestujících (4os./m <sup>2</sup> )	145
Výška těžiště nad osou nápravy $h_1$	800 mm

Je zde uveden pouze výpočet referenční hmotnosti, výpočet sil spojených s hmotností v pohybu, svislé zatížení nápravy a vertikální reakce, kde

$F_1$  je síla neodpružené hmoty od převodovky,

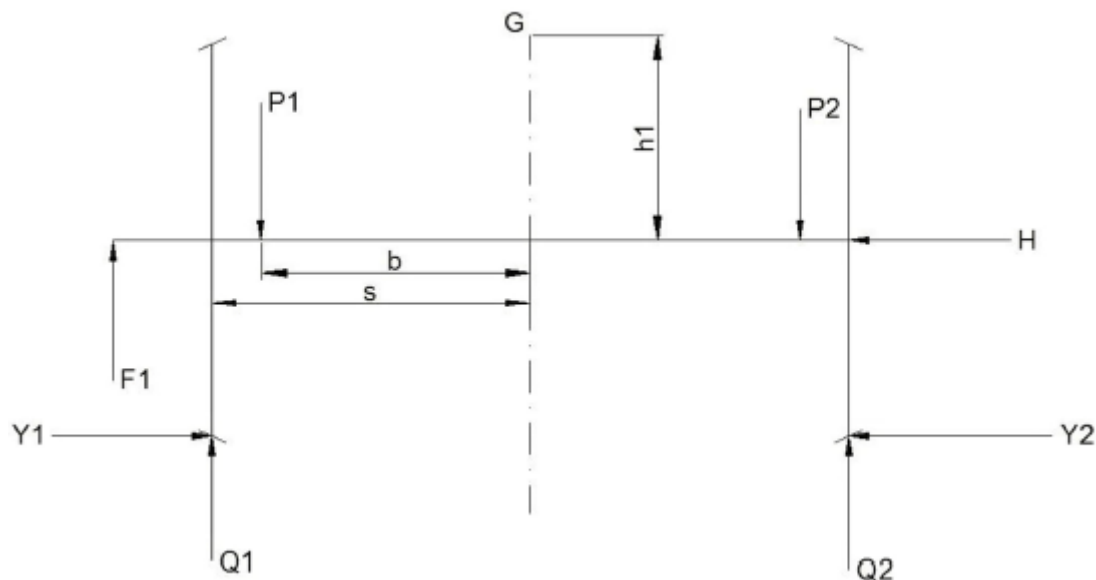
$Y_1$  a  $Y_2$  jsou příčné síly,

$Q_1$  a  $Q_2$  jsou svislé reakce,

$P_1$  a  $P_2$  jsou svislé síly působící na nápravu v místě ložisek,

$H$  je příčná síla.

Velikost příčné síly  $H$  je jednou ze vstupních hodnot pro návrhový výpočet nápravového ložiska.



**Obrázek 44. Schéma silového zatížení nápravy**

#### Referenční hmotnosti:

Hmotnost cestujících:  $m_c = (145 + 40) \cdot m_{c1} = (145 + 40) \cdot 70 =$

$$m_c = 12950 \text{ kg}$$

$m_{c1}$  je průměrná hmotnost jednoho člověka.

Hmotnost neodpružených částí na nápravě:

$$m_n = m_{dv} + m_p + m_{ld} = 662 + 150 + 95 =$$

$$m_n = 907 \text{ kg}$$

$m_{dv}$  je hmotnost dvojkolí,  $m_p$  je hmotnost od převodovky,  $m_{ld}$  je hmotnost ložiskového domku.

Hmotnost odpružených hmot:

$$m_o = \frac{m_v}{i} + 1,2 \cdot \frac{m_c}{i} - m_n = \frac{25000}{4} + 1,2 \cdot \frac{12950}{4} =$$

$$m_o = 10135 \text{ kg} \quad , \text{ kde}$$

$m_v$  je hmotnost prázdného vozidla,  $i$  je počet náprav.

#### Síly spojené s hmotností v pohybu:

$$P_1 = \left(0,625 + 0,0875 \cdot \frac{h_1}{b}\right) \cdot m_o \cdot g = \left(0,625 + 0,0875 \cdot \frac{0,8}{0,6}\right) \cdot 10135 \cdot 9,81 =$$

$$P_1 = 73740 \text{ N}$$

$$P_2 = \left(0,625 - 0,0875 \cdot \frac{h_1}{b}\right) \cdot m_o \cdot g = \left(0,625 - 0,0875 \cdot \frac{0,8}{0,6}\right) \cdot 10135 \cdot 9,81 =$$

$$P_2 = 50541 \text{ N} \quad , \text{ kde}$$

$h_1$  je výška těžiště nad osou nápravy,  $b$  je vzdálenost středu ložiskového domku od osy podvozku,  $g$  je konstanta gravitačního zrychlení.

$$Y_1 = 0,35 \cdot m_o \cdot g = 0,35 \cdot 10135 \cdot 9,81 =$$

$$Y_1 = 34799 \text{ N}$$

$$Y_2 = 0,175 \cdot m_o \cdot g = 0,175 \cdot 10135 \cdot 9,81 =$$

$$Y_2 = 17399 \text{ N}$$

$$H = Y_1 - Y_2 = 34799 - 17399 =$$

$$H = 17400 \text{ N}$$

#### Svislé zatížení nápravy:

$$F_1 = m_p \cdot g = 150 \cdot 9,81 = 1471,5 \text{ N}$$

#### Vertikální reakce Q:

$$Q_1 = \frac{1}{2s} [P_1(b + s) + P_2(s - b) + (Y_1 - Y_2) \cdot R + F_1 \cdot y_1]$$

$$Q_1 = \frac{1}{1,5} [73740 \cdot (0,6 + 0,75) + 50541 \cdot (0,75 - 0,6) + (34799 - 17399) \cdot 0,305 + 1471 \cdot 0,315] =$$

$$Q_1 = 72082 \text{ N}$$

$$Q_2 = \frac{1}{2s} [P_2(b + s) + P_1(s - b) + (Y_1 - Y_2) \cdot R - F_1 \cdot (2s + y_1)]$$

$$Q_2 = \frac{1}{1,5} [50541 \cdot (0,6 + 0,75) + 73740 \cdot (0,75 - 0,6) - (34799 - 17399) \cdot 0,305 - 1471,5(1,5 + 0,315)] =$$

$$Q_2 = 47542 \text{ N}$$

### 4.3 Vypružení

Vypružení je důležitým prvkem při návrhu tramvajového podvozku. Vypružení tlumí vibrace a redukuje přenos rázů od dvojkolí na skříně tramvajového vozidla. Je tedy nezbytné pro zaručení pohodlí cestujících. Tramvajové vypružení se skládá z primárního a sekundárního vypružení (obrázek 29). Primární vypružení se nalézá mezi dvojkolím a rámem podvozku, sekundární se nalézá mezi podvozkem a skříní vozu.

Primární vypružení je zde uvažováno ve formě listové pružiny. Tyto listové pružiny jsou na každém podvozku celkem dvě, vždy na pravé a levé straně. Sekundární vypružení je docíleno

šroubovitými válcovými pružinami. Sekundární vypružení obsahuje vždy 4 tyto pružiny na podvozku, dvě na pravé i levé straně.

#### 4.3.1 Výpočet vypružení

Pro výpočet vypružení je zapotřebí znát váhové parametry tramvajového vozidla, (kapitola 4.2.3.1 výpočet nápravy)

Hmotnost tramvaje	$m_v = 25 \text{ t}$
Hmotnost užitečná	$m_{už} = 12950 \text{ kg}$
Hmotnost dvojkolí	$m_{dv} = 662 \text{ kg}$
Hmotnost lož. domku	$m_{ld} = 47,5 \text{ kg}$
Hmotnost na nápravě od převodovky	$m_{př} = 150 \text{ kg}$
Hmotnost skříně	$m_s = 18,2 \text{ t}$
Maximální užitečné zatížení	$z_{už} = 50 \text{ mm}$
Maximální dovolené napětí	$\tau_{dov} = 785 \text{ MPa}$
Modul pružnosti ve smyku	$G = 7.85 \cdot 10^4 \text{ MPa}$
Dynamické stlačení	$z_{dyn} = 30 \text{ mm}$

Hmotnost rámu podvozku:

$$2m_p = m_v - m_s - (4 \cdot m_d + 8 \cdot m_{ld} + 4 \cdot m_{př})$$

$$2m_p = 25000 - 18200 - (4 \cdot 662 + 8 \cdot 47,5 + 4 \cdot 150) = 3152 \text{ kg}$$

Poměr celkové tuhosti primárního a sekundárního vypružení prázdné tramvaje:

$$y_p = 2 + \frac{2m_p}{m_s}$$

$$y_p = 2 + \frac{3152}{18200} = 2,17$$

Poměr celkové tuhosti primárního a sekundárního vypružení pro plně obsazenou tramvaj:

$$y_L = 2 + \frac{2m_p}{m_s + m_{už}}$$

$$y_L = 2 + \frac{3152}{18200 + 12950} = 2,10$$

Poměr tuhostí:

$$y = \frac{y_p + y_L}{2}$$

$$y = \frac{2,17 + 2,10}{2} = 2,13$$

Je výhodné, aby byl poměr tuhostí v intervalu 2 až 2,5. Při tomto poměru jsou amplitudy svislého zrychlení skříně za působení širokospektrálního dynamického buzení nejmenší (plochý průběh frekvenční charakteristiky). [1]

Celková tuhost:

$$k_c = \frac{m_{u\check{z}}}{z_{u\check{z}}} \cdot g$$

$$k_c = \frac{12950}{0,050} \cdot 9,81 = 2540790 \text{ N/m}$$

Pro sériově řazené pružiny primárního a sekundárního vypružení:

$$k_c = \frac{k_{1c} \cdot k_{2c}}{k_{1c} + k_{2c}}$$

$$k_{1c} = y \cdot k_{2c}$$

odtud:

Celková tuhost sekundárního vypružení:

$$k_{2c} = \frac{(1 + y) \cdot k_c}{y}$$

$$k_{2c} = \frac{(1 + 2,13) \cdot 2540790}{2,13} = 3733649 \text{ N/m}$$

Celková tuhost primárního vypružení:

$$k_{1c} = y \cdot k_{2c}$$

$$k_{1c} = 2,13 \cdot 3733649 = 7952673 \text{ N/m}$$

Tuhost jednotlivých pružin primárního ( $k_1$ ) a sekundárního ( $k_2$ ) vypružení

$$k_1 = \frac{k_{1c}}{12}$$

$$k_1 = \frac{7952673}{4} = 1988168 \text{ N/m}$$

$$k_2 = \frac{k_{2c}}{8}$$

$$k_2 = \frac{3733649}{8} = 466706 \text{ N/m}$$

Pro první vlastní frekvenci prázdné a ložené tramvaje:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_c}{m_s}}$$



$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2540790}{18200}} = 1,88 \text{ Hz}$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_c}{m_s + m_{u\check{z}}}}$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2540790}{18200 + 12950}} = 1,44 \text{ Hz}$$

Součástí sekundárního vypružení jsou ještě paralelní tlumiče, takže skutečné frekvence budou v reálu nižší.

Síly na jednu pružinu primárního vypružení prázdné a ložené tramvaje:

$$F_{1P} = \frac{(m_s + 2m_p)}{4} \cdot 9,81 = \frac{(18200 + 3152)}{4} \cdot 9,81 =$$

$$F_{1P} = 52366 \text{ N}$$

$$F_{1L} = \frac{(m_s + 2m_p + m_{u\check{z}})}{4} \cdot 9,81 = \frac{(18200 + 3152 + 12950)}{4} \cdot 9,81 =$$

$$F_{1L} = 84126 \text{ N}$$

Síly na jednu pružinu sekundárního vypružení prázdné a ložené tramvaje:

$$F_{2P} = \frac{m_s}{8} \cdot 9,81 = \frac{18200}{8} \cdot 9,81 =$$

$$F_{2P} = 22318 \text{ N}$$

$$F_{2L} = \frac{(m_s + m_{u\check{z}})}{8} \cdot 9,81 = \frac{(18200 + 12950)}{8} \cdot 9,81 =$$

$$F_{2L} = 38198 \text{ N}$$

### 4.3.2 Návrh rozměrů šroubovitě pružiny sekundárního vypružení

Stlačení pružiny prázdné a ložené tramvaje:

$$z_{2P} = \frac{F_{2P}}{k_2} = \frac{22318}{466706} =$$

$$z_{2P} = 0,048 \text{ m} = 48 \text{ mm}$$

$$z_{2L} = \frac{F_{2L}}{k_2} = \frac{38198}{466706} =$$

$$z_{2L} = 0,082 \text{ m} = 82 \text{ mm}$$

Napětí v pružině při dynamickém zatěžování ložené tramvaje:

$$\tau_{2Dyn} = \tau_{dov} \cdot \frac{z_{2L}}{z_{2L} + z_{dyn}} = 785 \cdot \frac{82}{82 + 30} =$$

$$\tau_{2Dyn} = 574,7 \text{ MPa}$$

Výpočet součinitele dle Wahla (K):

$$K = \frac{i+0,2}{i-1}, \text{ kde } i = \frac{D}{d}$$

$D$  je průměr pružiny,  $d$  je průměr drátu pružiny.

Výpočet napětí v pružině:

$$\tau_2 = \frac{16 \cdot F_{2L} \cdot R \cdot K}{\pi \cdot d^3}, \text{ kde } R = \frac{D}{2}$$

$$\tau_2 = \frac{16 \cdot 38198 \cdot 80 \cdot 1,3}{3,14 \cdot 32^3}$$

**Tabulka 7. Výpočet pružiny sekundárního vypružení**

d	38	28	34	<b>32</b>
D	190	162	170	<b>160</b>
$i = \frac{D}{d}$	5	5,786	5	<b>5</b>
K	1,3	1,25	1,3	<b>1,3</b>
$\tau_2$	438	897	547	<b>617</b>

Tučně zvýrazněný sloupec obsahuje parametry vhodné pružiny.

$$\tau_2 < \tau_{dov}$$

$$617 < 785 \Rightarrow \text{pružina vyhovuje}$$

Počet činných závitů pružiny (n):

$$n = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot k_2} = \frac{7,85 \cdot 10^{10} \cdot 0,032^4}{8 \cdot 0,16^3 \cdot 466706} =$$

$$n = 5,38 \Rightarrow 6 \text{ závitů}$$

Délka pružiny (h):

$$h_{volná} = (n + n') \cdot d + 0,1 \cdot d \cdot n + z_{dyn} =$$

$$h_{volná} = (6 + 1,5) \cdot 32 + 0,1 \cdot 32 \cdot 6 + 30 =$$

$$h_{volná} = 289 \text{ mm}$$

$$h_{prázdné tramvaje} = h_{volná} - z_{2P} = 289 - 48 =$$

$$h_{prázdné tramvaje} = 241 \text{ mm}$$

$$h_{ložené tramvaje} = h_{volná} - z_{2L} = 289 - 82 =$$

$$h_{plně ložené tramvaje} = 207 \text{ mm}$$

**Tabulka 8. Výsledné parametry šroubovitě pružiny sekundárního vypružení**

Materiál pružiny, dovolené napětí [MPa]	ČSN 13250, $\tau_{dov} = 785$
Střední průměr pružiny $D$ [mm]	160
Průměr drátu pružiny $d$ [mm]	32
Volná délka pružiny [mm]	289
Délka pružiny prázdné tramvaje [mm]	241
Délka pružiny plně zatížené tramvaje [mm]	207
Počet činných závitů	6

#### 4.4 Pohonné a brzděné ústrojí

Pohonné ústrojí musí být součástí každého trakčního podvozku. U tramvají s vysokou podlahou je motor, převodovka a vše potřebné situováno v prostřední části podvozku mezi podélníky. U nízkopodlažních tramvají není, na prvky spojené s trakcí, uprostřed rámu místo a umísťují se nejčastěji na vnější boky rámu. To je výhodné z hlediska místa, ale nesmí být porušena, normou stanovená, vztažná linie obrysu vozidla.

Výkon elektromotoru prakticky závisí na velikosti elektromotoru. U tramvají se používají elektromotory od 60 kW do 200 kW například u pětičlánkové osminápravová tramvaj Citadis, (Bo',2'2'Bo).

Pohonné ústrojí na mnou navrženém podvozku se skládá z asynchronního elektromotoru, kotoučové brzdy, kloubové hřídele, sadou spojek a převodovkou.

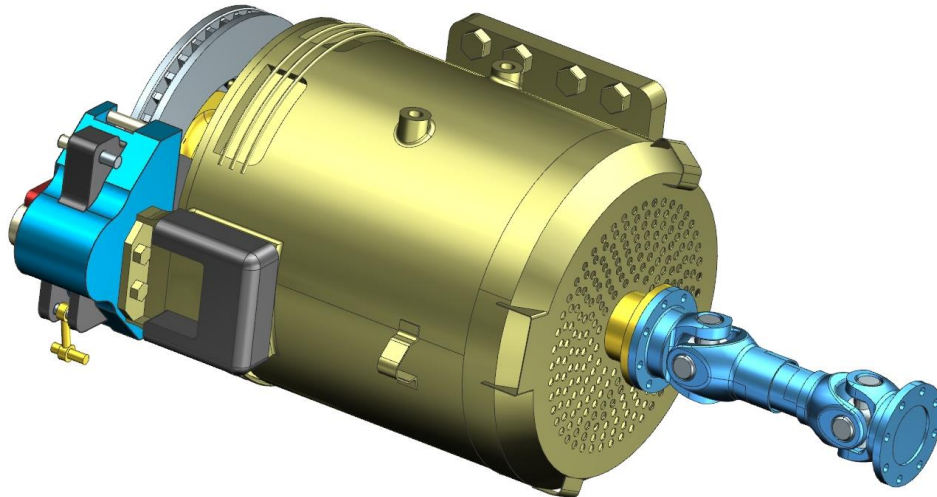
##### 4.4.1 Trakční motor a kotoučová brzda

Volně zjistitelných informací o trakčních motorech pro tramvajová vozidla je pramálo. Při návrhu rozměrů a tvaru elektromotoru jsem vycházel z různých zdrojů. Tvarem a podobou jsem se snažil přiblížit asynchronnímu motoru TAM 1004 C/R, který je použit na částečně nízkopodlažních tramvají Vario LF [21].

Výkon motoru je 90 kW, jmenovité otáčky 1900 za minutu. Na podvozku jsou celkem dva o celkovém výkonu 180 kW. Rozměry elektromotoru jsou 480x455x410. Váha je 280 kg.

Motor je připevněn k boku rámu podvozku přes tuhou konzolu. Osa elektromotoru je rovnoběžná s podélnou osou podvozku. Jako každý asynchronní motor tvoří i tenhle statorová a rotorová část. Statorová část je pevně spojena s obalem celého elektromotoru. Rotorová část je pevně spojena s výstupní hřídelí. Hřídel vychází oběma podélnými směry.

Na jednom konci hřídele je pevně umístěn kotouč kotoučové brzdy. Druhý konec hřídele pohání převodovku přes kloubovou hřídel a sadou kotoučových spojek.



**Obrázek 45. Elektromotor, brzda, kloubová hřídel**

#### 4.4.2 Převodovka

Převodovka je nedílnou součástí každého pohonného ústrojí. Umožňuje docílit požadované rychlosti podvozku úpravou otáček vycházejících z motoru.

Rozměry převodovky záleží na vstupních parametrech a na požadovaných výstupních parametrech.

Motor o výkonu  $P = 90 \text{ kW}$ , jmenovitých otáček  $n_j = 1900 \text{ ot/min}$ , pohání přes dvoustupňovou kuželočelní převodovku dvojkolí s kolem o průměru  $d = 610 \text{ mm}$ . Maximální otáčky  $n_{max} = 4100 \text{ ot/min}$ .

Obvod kola:

$$l = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 0,61 = 1,9154 \text{ m}$$

Otáčky nápravy  $n_n$  při maximální rychlosti  $v = 70 \text{ km/h}$  ( $19,4 \text{ m/s}$ ):

$$n_n = \frac{v}{l} = \frac{19,4}{1,9154} = 10,128 \text{ ot/s} = 607,7 \text{ ot/min}$$

Maximální krouticí moment motoru  $M$ :

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{60 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot n_j} = \frac{60 \cdot 90000}{2 \cdot 3,14 \cdot 1900} = 452,6 \text{ Nm}$$

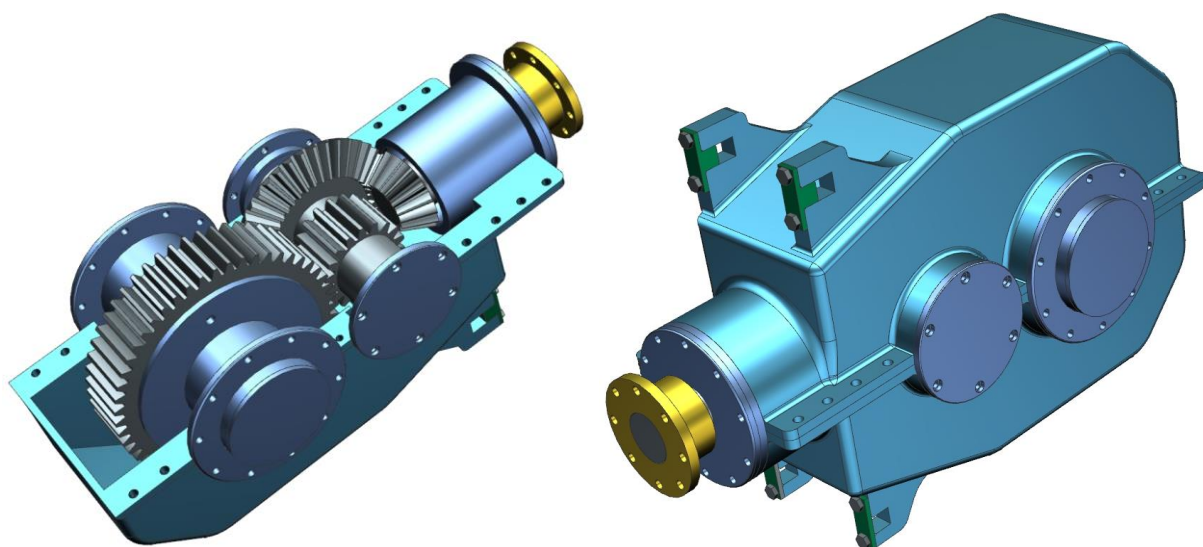
Celkový převodový poměr převodovky  $i$ :

$$i = \frac{n_{max}}{n_n} = \frac{4100}{607,7} = 6,746$$

Krouticí moment vycházející z převodovky  $M_n$ :

$$M_n = M \cdot i = 452,6 \cdot 6,746 = 3053 \text{ Nm}$$

Nyní vypočtené hodnoty posloužily pro hrubý návrh soukolí v programu Autodesk Inventor 2015. Na základě velikosti soukolí byl vytvořen obal převodovky. Převodovka má rozměry 580x350x215.



**Obrázek 46. Převodovka**

Převodovka je nalisována na převislý konec nápravy. Reakční síly z ozubeného převodu musí zachytit plášť převodovky a dále musí být tyto síly přeneseny na rám podvozku. Převodovka je proto zajištěna již zmíněnou závěskou (obrázek 38). Spojení převodovky s oky závěsky je přes silentblok. Toto spojení je dostatečně pružné, pevné a konstrukčně výhodné.

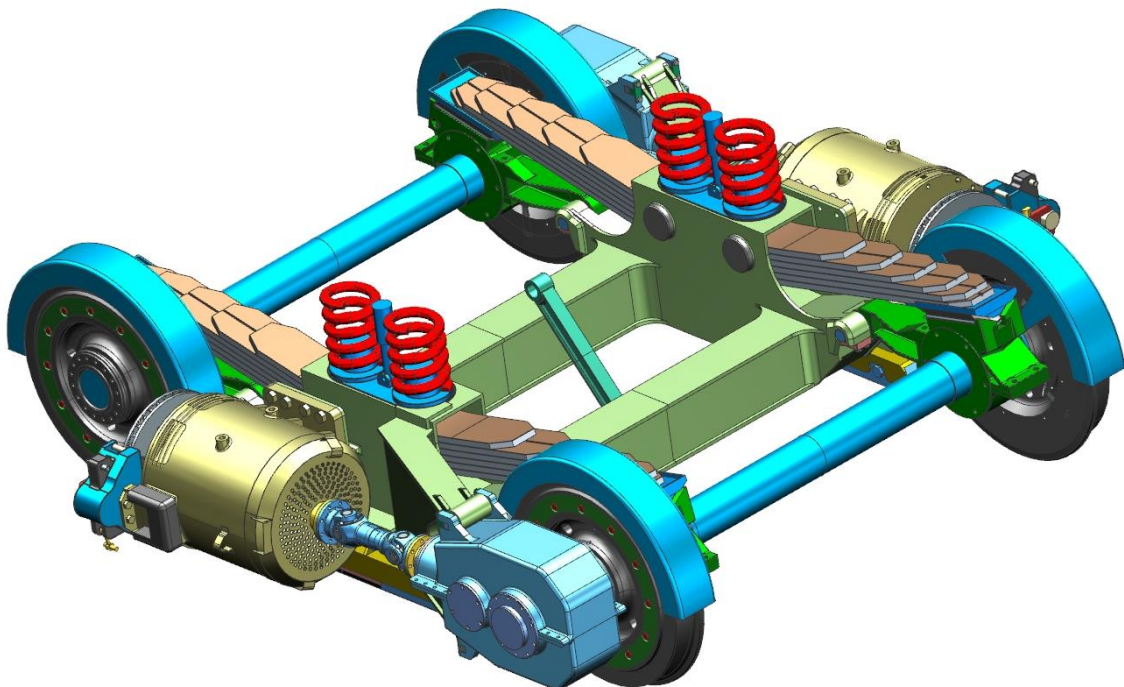
## 5 Návrh a pevnostní kontrola pružiny primárního vypružení

Myšlenka na koncepci nestandardního neotočného podvozku pro nízkopodlažní tramvajové vozidlo vzešla převážně z podvozku přečtení prospektu Kawasaki (obrázek 28). EfWING má mimo nestandardního rámu a vedení i užitou kompozitní listovou pružinu na místě primárního vypružení. I díky těmto třem odlišnostem má efWING nižší hmotnost než konkurenční podvozky pro železniční vozidla. [18]

Při navrhování nízkopodlažního podvozku bylo vše podřízeno tomu, postupovat tak, aby se mohla na místě primárního vypružení užít kompozitní listová pružina.

Postupným zjišťováním dalších a dalších informací o problematice výpočtů komponent z kompozitních materiálů bylo postupně od myšlenky užití kompozitní listové pružiny upuštěno. Hlavní důvod byl převážně v nemožnosti získání potřebných materiálových konstant. Tyto konstanty se v praxi získávají experimentálně, například trhací zkouškou. Firmy zabývající se výrobou namáhaných kompozitních dílů si tyto konstanty zjišťují sami relativně nákladnou cestou. Informace týkající se materiálových charakteristik patří k vlastnictví firmy, a proto získat tyto informace ze soukromého sektoru bylo pro mě, jako pro studenta, prakticky nemožné převážně z finančních důvodů.

Po domluvě s vedoucím práce byla použita ocelová listová pružina, tak zvaná pružnice. Výhodou oproti kompozitní je její relativně nízká cena, ale značnou nevýhodou je vyšší hmotnost.



**Obrázek 47. Nahrazení kompozitní pružiny ocelovou**

Pružnice je lichoběžníková. Tvoří ji šest listů, každý tloušťky 18 mm. Uprostřed jsou k sobě listy staženy objímkou a zajištěny klínem. Pro zamezení vzájemného natáčení, mají listy na

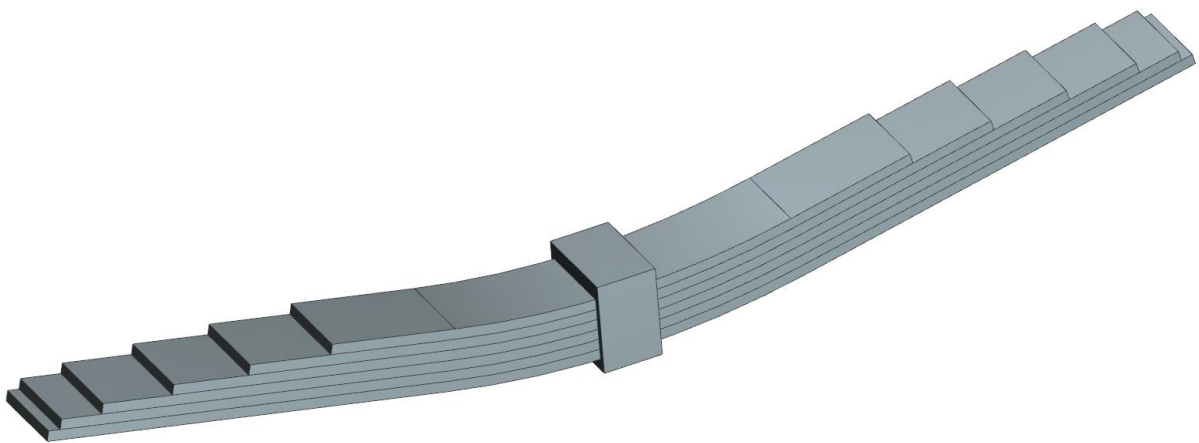
spodní ploše pero, které zapadá do drážky vytvořené na horní ploše. Pro zamezení vzájemného podélného posuvu je vytvořena tak zvaná bradavka [1].

Hlavní list je dlouhý 2015 mm, široký 140 mm. Koncové spodní plochy přicházejí do kontaktu s pryžo-ocelovým sedlem, které je umístěno nad ložiskovým domkem. Zbylé listy jsou kratší odstupňovaných délek. Velikost odstupňování má velký vliv na velikost deformace a napětí v jednotlivých listech pružiny. Velikost těchto odstupňování byla zjištěna mnohým zkoušením a opakováním počítačového výpočtu, metodou konečných prvků v programu NX 8.5, firmy Siemens.

## 5.1 Model

Byl vytvořen model typu multi-solid body. Mezi pojišťovacím klínem a horní plochou vrchního listu dochází při pružení k tlaku. Do pružiny vstupuje přes rám síla od hmotnosti skříně. Žádné jiné síly do pružiny nevstupují. Při výpočtu jde hlavně o deformaci a průběh napětí v listech. O objímku se nejedná, proto se klín uvažuje jako jedno těleso spolu s objímkou. Vyhneme se tím v budoucnu zbytečnému definování dalšího kontaktu mezi klínem a objímkou, který by prodloužil čas výpočtu.

Model byl kreslen tak, aby bylo co nejméně časově náročné upravovat počet, tloušťku a délku jednotlivých listů. To proto, že nastavením zmíněných parametrů (počet, tloušťka, délka) docílíme požadovaného průhybu pružiny při dané zatěžující síle. Na obrázku 48 je uveden obrázek posledního návrhu modelu pružiny. Model je idealizovaný, bez sražených hran a rádiusů, které by zhoršovaly kvalitu sítě.

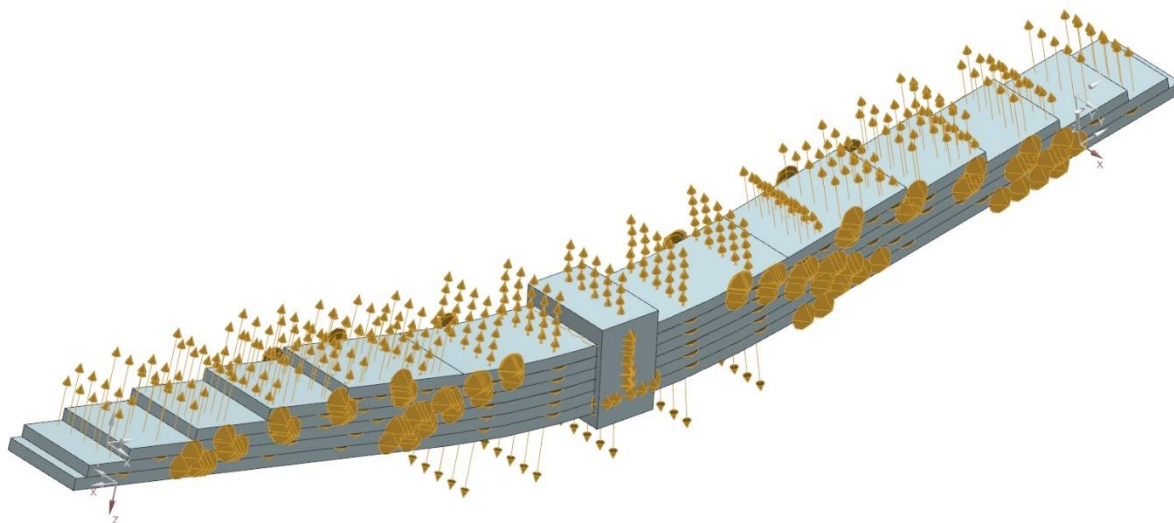


Obrázek 48. Model pružnice

## 5.2 Náhrada interakce sousedních listů

Lze napsat, že na každém místě, kde dochází k dotyku mezi dvěma sousedními listy pružnice, je nadefinovaný kontakt. Kontakt byl zvolen druhu „Surface-to-Surface-Contact“, manuálního typu. Tento druh kontaktu zaručuje prostý styk sousedních těles bez slepení ploch. Důležitým parametrem pro správné nastavení této funkce je kromě zvolení dotykových ploch i koeficient tření. Materiál listů pružnice je ocel. Koeficient tření byl s ohledem na znečištění pružiny v provozu nepatrně zvýšen z obvyklé hodnoty 0.1 na 0,15.

U nadefinování kontaktu mezi boky listů a vnitřních boků objímky bylo postupováno obdobně. Nicméně posunutí v příčném směru není předpokládáno, z důvodu zatěžování pružnice pouze ve svislém směru od rámu podvozku.



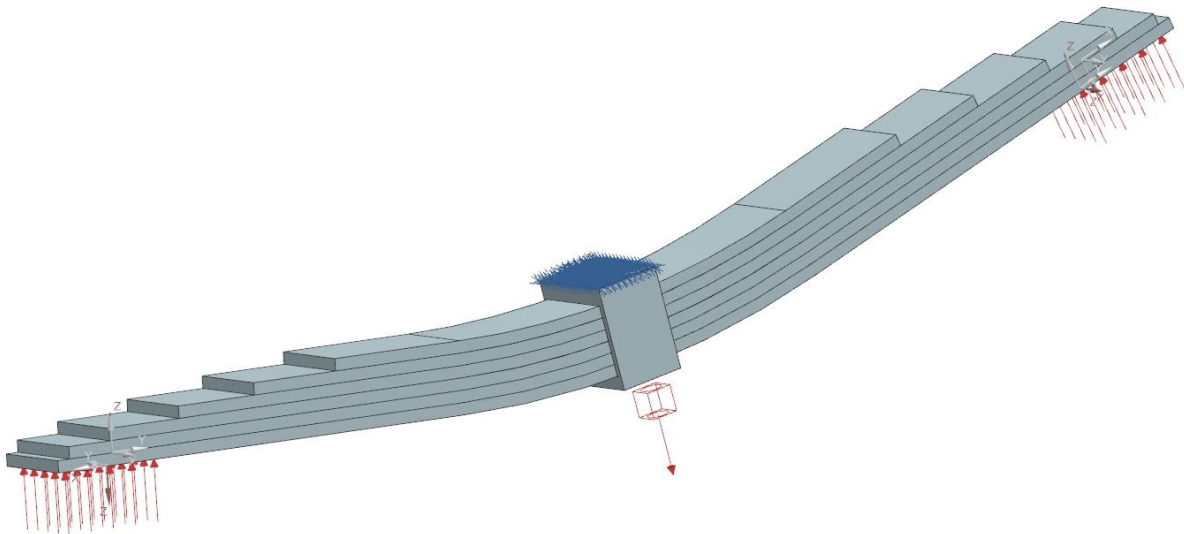
**Obrázek 49. Nadefinované kontakty**

### 5.3 Okrajové podmínky

Pružnice bude v kontaktu s dalšími komponentami podvozku na třech místech. Horní část objímky čepem v hloubce 15 mm „zaskočí“ do vytvořené díry v odlitku, který je navařen ke spodní straně horního plechu příčnicku. Toto spojení bude v podélném a příčném směru s malou vůlí, síly v těchto směrech nebudou, protože jsou přenášeny vedením dvojkolí. Hlavní zatěžující síla bude od rámu působit na horní plochu objímky. Tato síla se v symetrické pružnici rovnoměrně rozloží. Spodní plochy konců hlavního listu pružnice jsou v kontaktu se sedlem kývačky (obrázek 33). Tato sedla tvoří podpory koncům pružnice.

Horní ploše objímky bylo odebráno šest stupňů volnosti. Na spodní plochy konců hlavního listu, v délce, v které je ve spojení se sedlem kývačky (190 mm od konců hlavního listu), byly postupně zavedeny poloviční síly  $F_{1L}$  a  $F_{1P}$  (viz kapitola 4.3.1 – výpočet vypružení). Působení těchto sil bude normálově k ploše (funkce Plane normal). Jako poslední silový účinek byla zavedena gravitační síla.

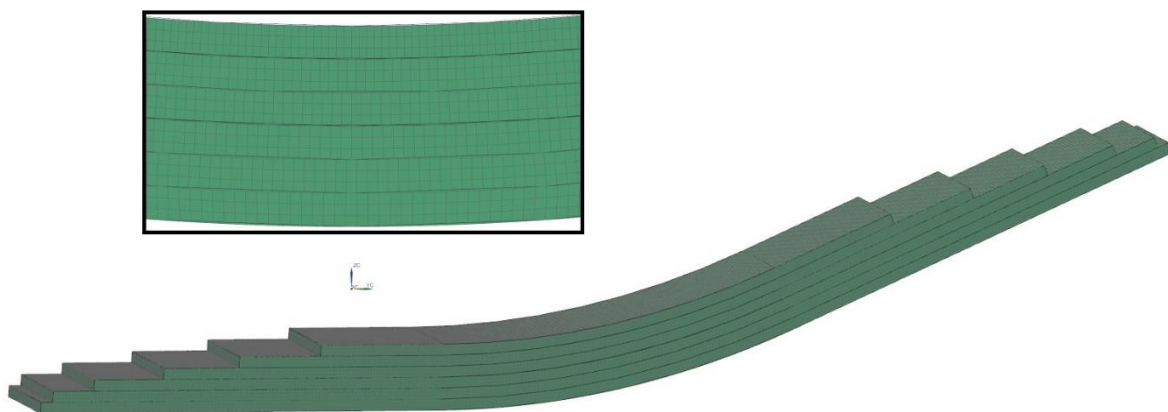




**Obrázek 50. Nadefinované okrajové podmínky**

## 5.4 Nastavení sítě

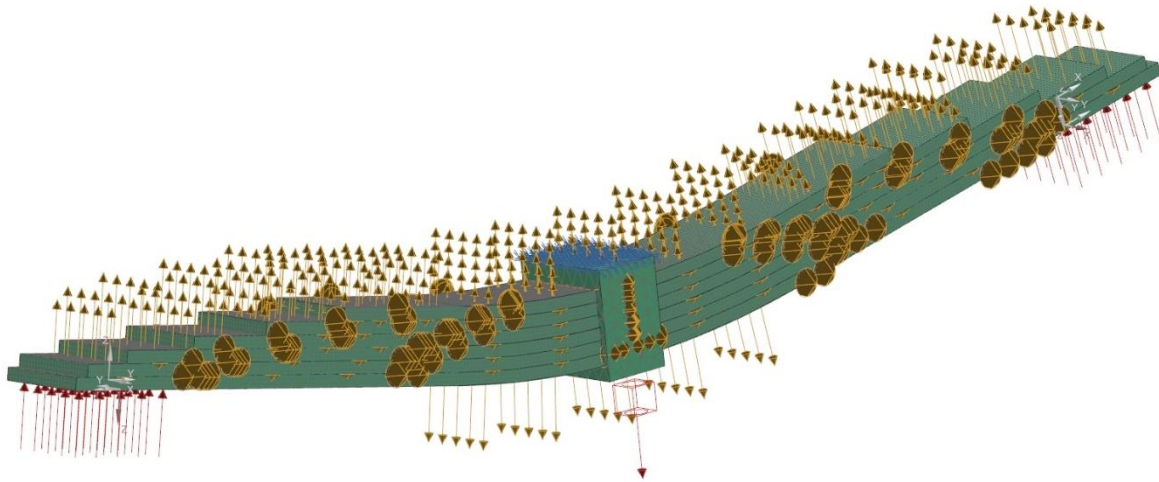
Tvar listů pružnice vyzývá k tomu použít tak zvanou taženou síť. Ta se v programu NX 8.5 skrývá pod příkazem *3D Swept Mesh*, typ sítě *Until Target*. Síť je tažena od jedné krajní plochy listu k druhé, přičemž je v tomto případě výhodné zvolit plochy na koncích listu. Při povolení funkce *Use Layers* je možnost zvolit si počet vrstev mezi počáteční a koncovou plochou a tím docílit kvalitní sítě s nedeformovanými elementy. Typ elementu byl zvolen *Chexa(20)*. Velikost elementu 6. Počet vrstev je různý dle délky každého listu. Největší namáhání je očekáváno uprostřed listů pružnice. Na obrázku je vidět, jak je zde síť kvalitní.



**Obrázek 51. Nadefinovaná síť**

Na objímku byla použita síť *3D Tetrahedral Mesh*. Typ elementu *CTETRA(10)* o doporučené velikosti 20 mm.

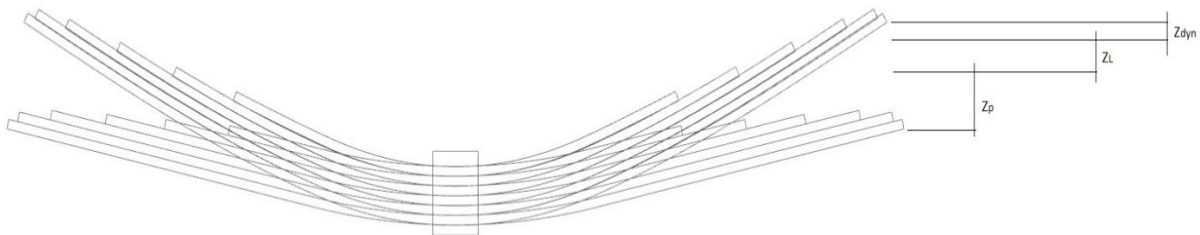
## 5.5 Úplný model



Obrázek 52. Úplný model

## 5.6 Výpočet

Je potřeba zvolit délku jednotlivých listů tak, aby pružnice podvozku vyhovovala stavům, kdy je tramvajové vozidlo prázdné ( $F_{1P}$ ), kdy je plně ložené ( $F_{1L}$ ) a ještě mít rezervu pro tak zvané dynamické stlačení ( $Z_{dyn}$ ) vyvolané pohybem vozidla. Vše je dobře vidět na obrázku 53. Správné nastavení délky listů bylo stanoveno velkým počtem zkušebních pokusů.



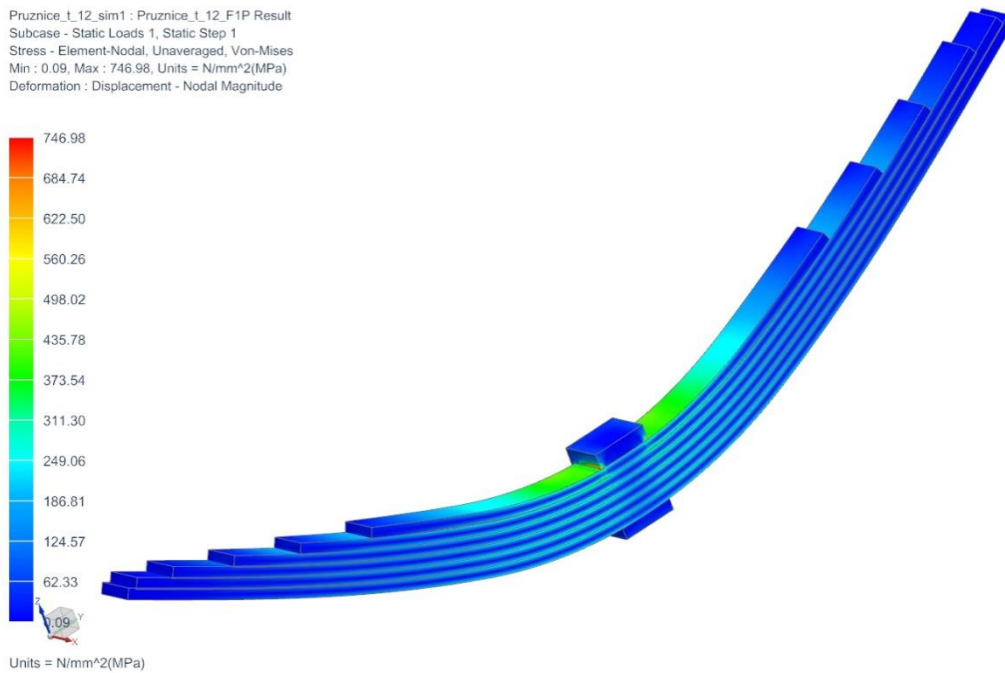
Obrázek 53. Schéma zatížení pružiny

Posunutí pružiny v ose  $Z$  je určující. Po upevnění skříně na podvozek se pružina smí posunout maximálně o  $Z_p = 40$  mm. Tento stav tedy nastává, když je tramvaj bez cestujících. Pokud se tramvaj stane plně obsazenou, smí se pružina dále posunout o maximálně  $Z_L = 30$  mm. Pak stále v pružině musí být rezerva na případné posunutí spojené s dynamikou jízdy. Maximální  $Z_{dyn} = 15$  mm.

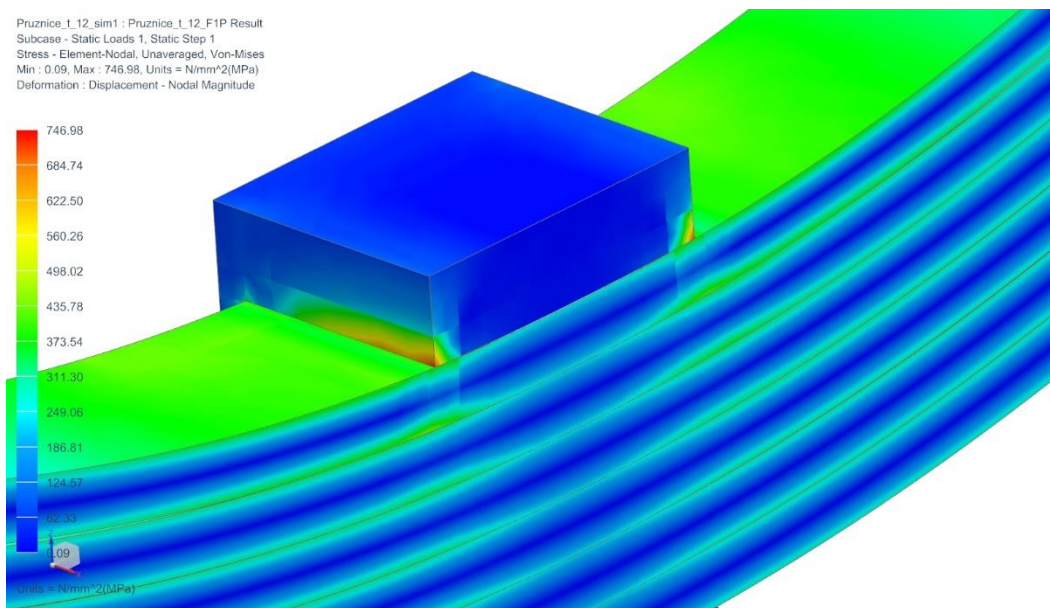
### 5.6.1 Zatížení silou $F_{1L}$

Na koncích pružiny (obrázek 52) působíme silou  $\frac{F_{1L}}{2} = \frac{84100}{2} = 42050$  N. Na obrázku 54 vidíme průběh napětí.

Na hraně objímky působí vysoké redukováné napětí (obrázek 55) dle Von Misesovy hypotézy. Vzniká působením horní plochy vrchního listu při ohýbání pružnice na zmíněnou hranu objímky. Bylo zde proto vytvořené zkosení a zaoblení. Touto úpravou docílíme snížení napětí a přesnějších výsledků (obrázek 56).



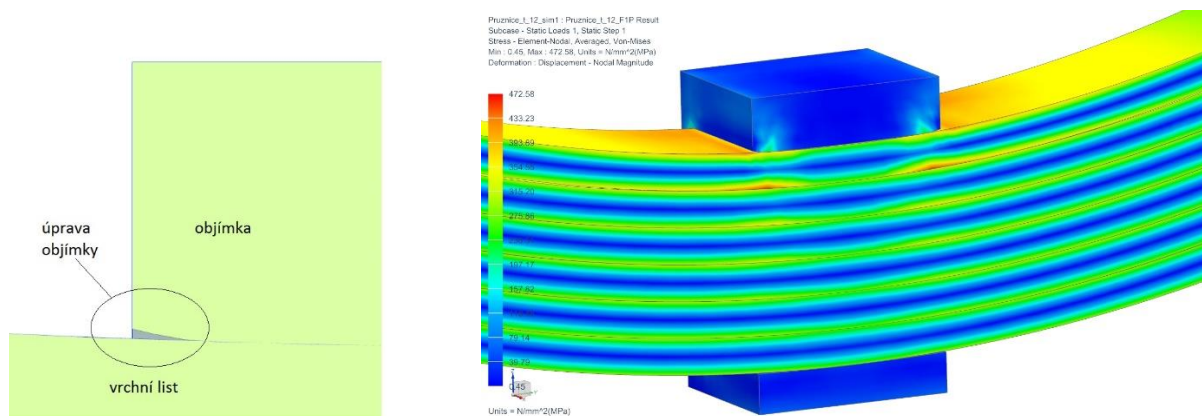
**Obrázek 54. Výsledné napětí dle HMH**



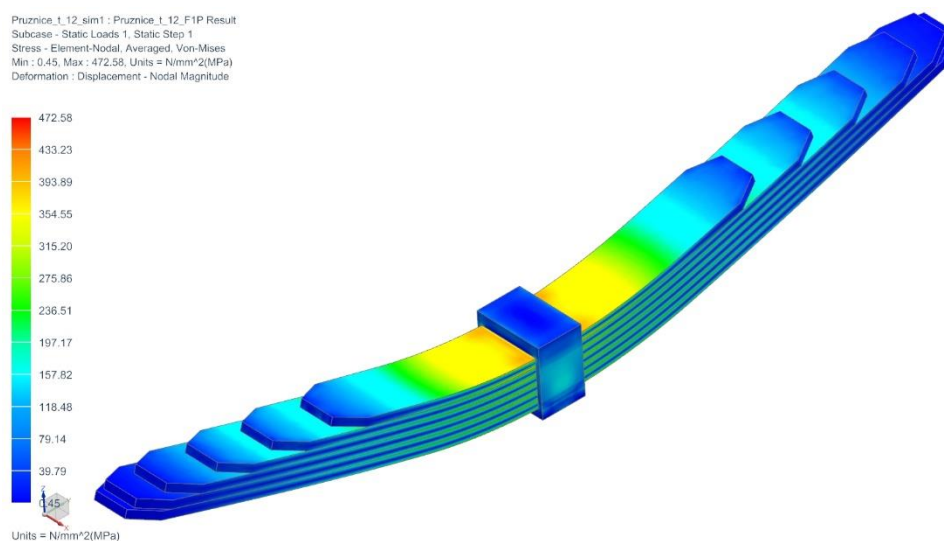
**Obrázek 55. Detail, zvýšené napětí na hraně objímky**

Po zkosení a zaoblení hrany objímky (obrázek 56) kleslo maximální napětí (obrázek 57). Dále je z průběhu napětí na obrázku 54 vidět, že konce listů nejsou nijak zvlášť zatěžované, a proto dojde k tvarové úpravě, která povede k mírnému snížení hmotnosti.

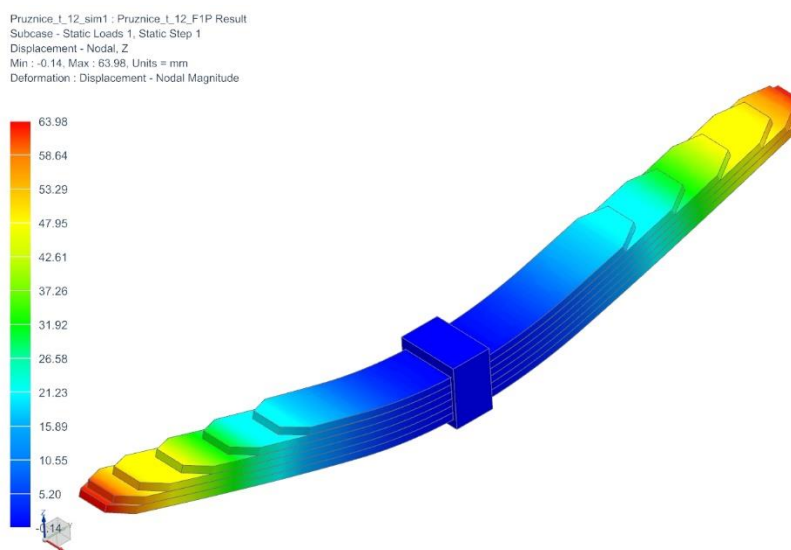
Posunutí v ose Z je na obrázku 58.



**Obrázek 56. Úprava objímky v řezu a snížení redukované napětí**



**Obrázek 57. Výsledné napětí dle HMH s upravenou objímkou**



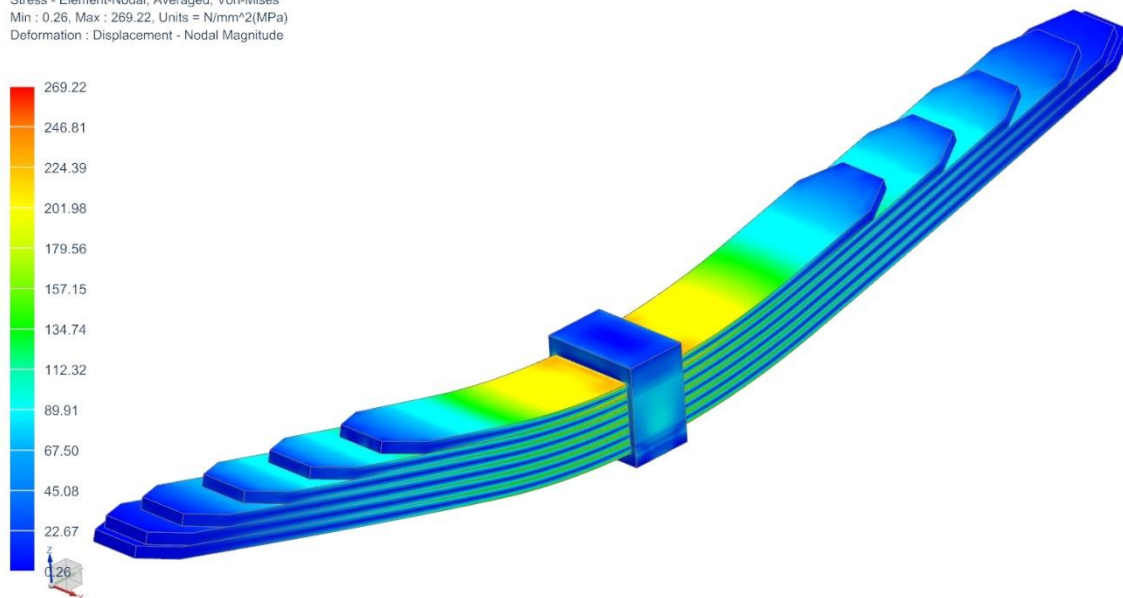
**Obrázek 58. Posunutí v ose Z**

## 5.6.2 Zatížení silou $F_{1P}$

Nyní zatížíme pružnici silou  $F_{1P}$ , tedy na koncích pružnice vždy silou  $\frac{F_{1P}}{2} = \frac{52366}{2} = 26183$  N.

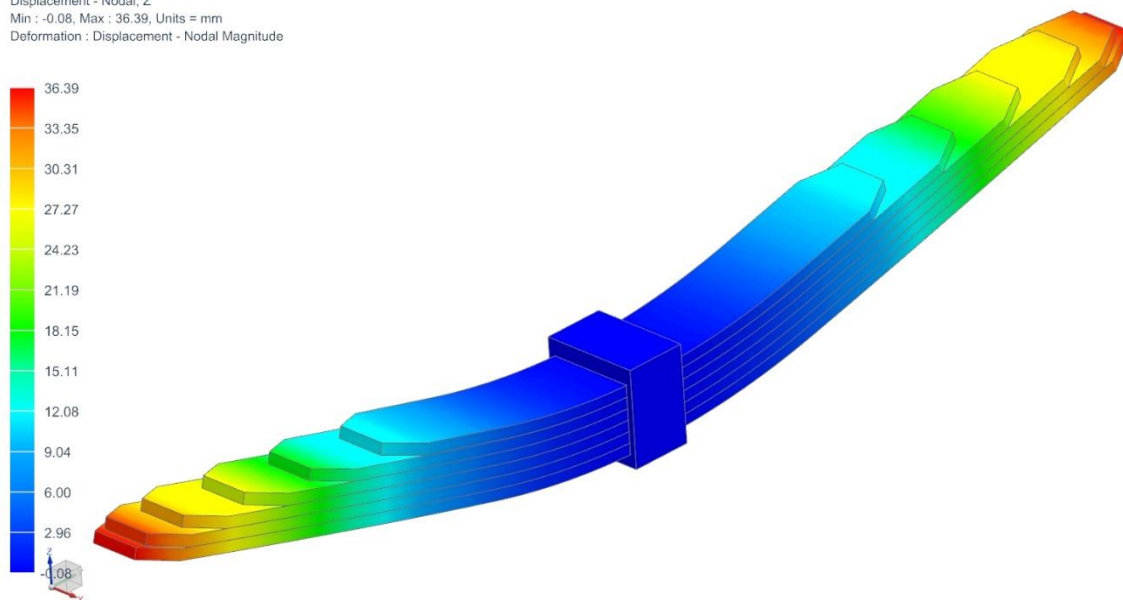
Redukované napětí dle Von Misesovy hypotézy je 269,22 MPa. Rozdíl mezi nezprůměrovaným a zprůměrovaným napětím je 3%, což je ukazatel nezkreslených výsledků.

Pružnice\_t\_12\_sim1 : Pružnice\_t\_12\_F1P Result  
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
 Stress - Element-Nodal, Averaged, Von-Mises  
 Min : 0.26, Max : 269.22, Units = N/mm^2(MPa)  
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



**Obrázek 59. Průběh redukovaného napětí dle HMH**

Pružnice\_t\_12\_sim1 : Pružnice\_t\_12\_F1P Result  
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
 Displacement - Nodal, Z  
 Min : -0.08, Max : 36.39, Units = mm  
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



**Obrázek 60. Hodnota posunutí v ose Z**

### 5.6.3 Zjištění napětí v pružnici při dosažení maximálního posunutí $Z_C$

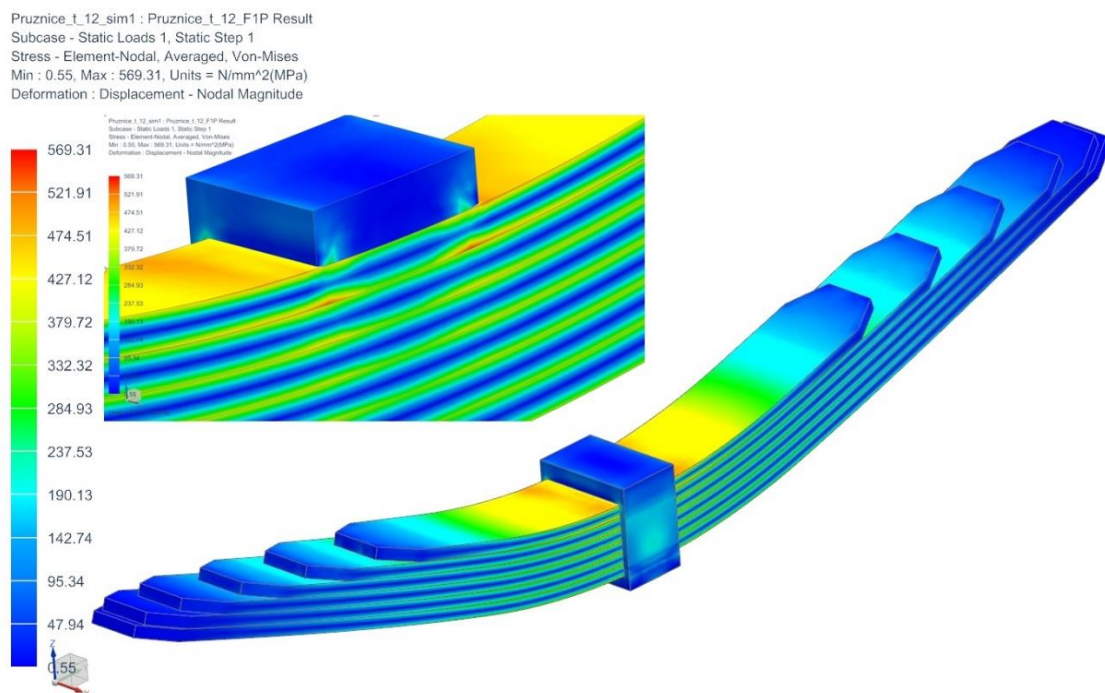
Maximální možné posunutí  $Z_C$  je hodnota daná součtem dílčích posunutí  $Z_P, Z_L, Z_{dyn}$ . Dle teorie by nemělo  $Z_C$  překročit hodnotu  $Z_C = Z_P + Z_L + Z_{dyn} = 40 + 30 + 20 = 90$  mm.

Protože jsou již známé skutečné hodnoty  $Z_P = 36.39$  mm a  $Z_L = 63,98 - 36.39 = 27,59$  mm, je možno pružnici zatížit zatím neznámou silou  $F_C$ , která však způsobí a přiblíží se známému, celkovému teoretickému posunutí v ose Z přibližně 79,49 mm:

$$Z_C = 36.9 + 27,08 + Z_{dyn_{teoretické}} = 36,39 + 27,59 + 15 = 79,49 \text{ mm.}$$

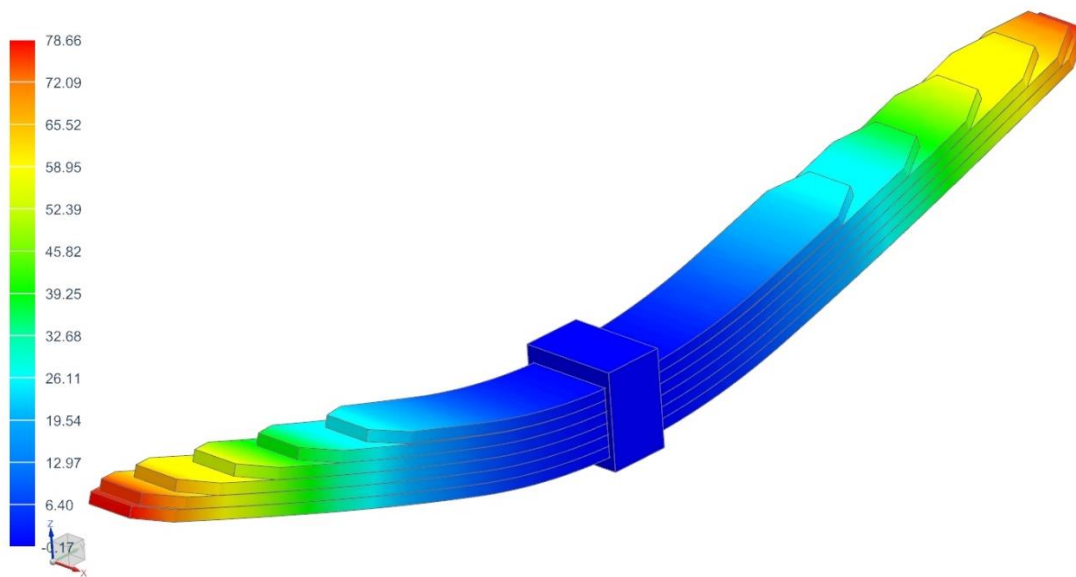
Napětí v pružině vyvolané silou  $F_C$  nesmí přesáhnout dovolené. Dovolené napětí pro materiál pružiny ČSN 14260 je 700 MPa pro statické namáhání a 1000 MPa pro dynamické namáhání.

**Po překonání  $Z_C = 79,49$  mm je dalšímu posunutí pružiny zamezeno dorazem, který je součástí skříně vozidla.**



**Obrázek 61. Průběh redukovaného napětí dle HMM**

Pruznice\_t\_12\_sim1 : Pruznice\_t\_12\_F1P Result  
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
 Displacement - Nodal, Z  
 Min : -0.17, Max : 78.66, Units = mm  
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 62. Posunutí v ose Z

## 5.7 Shrnutí výsledků

Simulace byla vytvořena pro zatěžování ocelové listové pružiny (pružnice). Tato pružina je uvažována na místě primárního vypružení tramvajového nízkopodlažního podvozku.

Bylo postupováno tak, že byla navržena pružnice s parametry počet listů  $i$ , tloušťka listu  $t$ , délka listů  $l$ , šířka listů  $b$ . Postupnými zkušebními výpočty se přibližovalo a došlo ke konečnému tvaru pružnice s konkrétními parametry, která bude vyhovovat požadovaným posunutím v ose  $z$  při konkrétních zatěžujících silách.

Tabulka 9. Parametry pružnice

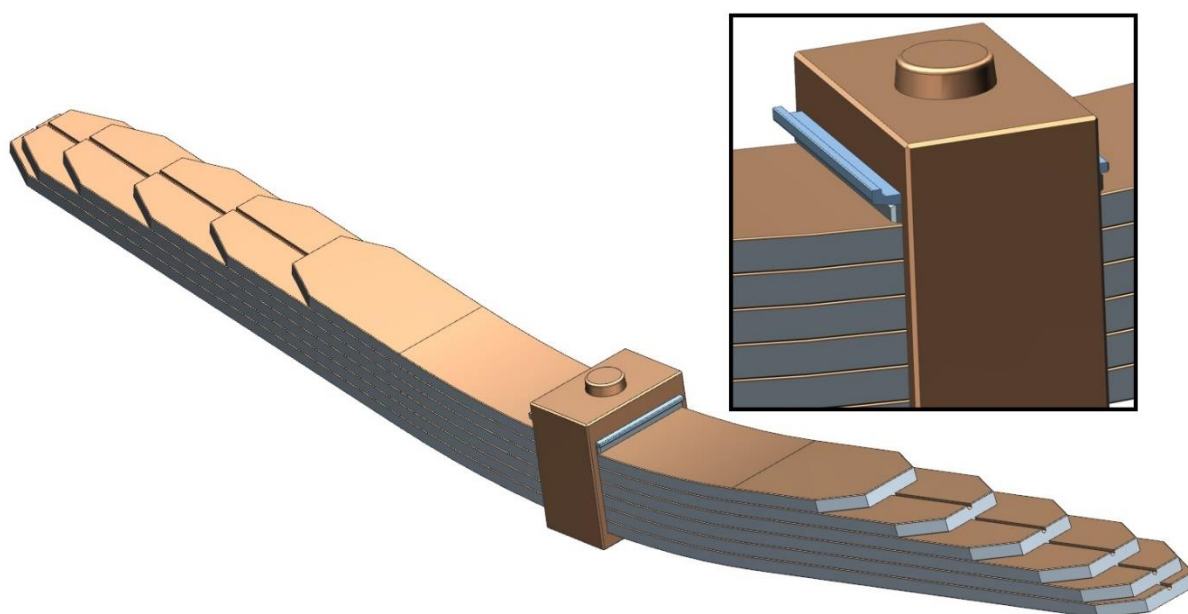
LIST, $i$	TLOUŠŤKA, $t$ [mm]	DÉLKA, $l$ [mm]	ŠÍŘKA, $b$ [mm]
1 (hlavní list)	18	2015	140
2	18	1960	140
3	18	1812	140
4	18	1565	140
5	18	1297	140
6	18	1010	140

**Tabulka 10. Přehled zatěžujících sil, výsledných napětí a posunutí**

SÍLA NA PRUŽINU [N]	CELKOVÁ POSUNUTÍ [mm]	REDUKOVANÁ NAPĚTÍ [MPa]	DOVOLENÉ NAPĚTÍ [Mpa]	DÍLČÍ POSUNUTÍ [mm]	Max. DÍLČÍ POSUNUTÍ [mm]
$F_{1P} = 52366$	36,39	269,22	700	$Z_P = 36,39$	40
$F_{1L} = 84126$	63,98	472,58	700	$Z_L = 27,59$	30
$F_{1dyn} = 108428$	78,66	569,31	1000	$Z_{dyn} = 14,68$	15

Pozn.: Použitý materiál ČSN 14 260 (54SiCr6 – DIN). [1]

**Pružnice vyhověla všem zatěžujícím stavům. Dílčí posunutí jsou v požadovaných mezích, spíše se přibližují horní maximální hranici.**



**Obrázek 63. Navržená pružnice**

## 5.8 Alternativní materiál pružiny

Díky nucenému nahrazení kompozitních listových pružin ocelovými vzrostla celková váha podvozku přibližně o 354 kilogramů. Při přibližné celkové váze hrubé stavby podvozku 3634 kilogramů (včetně ocelových pružin) tato úspora není zanedbatelná.

Největší výhodou kompozitního materiálu je bezesporu vysoký poměr pevnosti vůči váze. Je možnost, už při výrobě kompozitní pružiny, řídit její budoucí vlastnosti smyslem rozložení vláken. U příkladu jednosměrného kompozitu jsou pro vlastnosti v příčném směru rozhodující vlastnosti matrice, pro vlastnosti v podélném směru pak vlastnosti vláken. Tím je dán fakt, že je malá pevnost kompozitu ve směru příčném na vlákna ve srovnání se směrem podélným.



Při výrobě laminátového dílu se jednotlivé vrstvy stejných vlastností musí klást pod určitými, stejnými úhly. Tím se zamezí přídavnému namáhání.

Listová pružina z kompozitního materiálu nesmí být v budoucnu namáhána jinak, než ve směru vláken, v nejlepším případě prostým tahem vláken. Nežádoucí jsou vazby mezi ohybem a tahem nebo krutem a tahem. V praxi by to znamenalo, že velké krouticí síly vznikající na dvojkolí podvozku nesmí být přeneseny do pružiny. V pružině by vznikaly smyková napětí, deformace mezi jednotlivými vrstvami a došlo by k porušení kompozitu.

Pro budoucí funkci kompozitní listové pružiny na místě primárního vypružení podvozku by se s výhodami mohl použít symetricky vyrovnaný kompozit, který nemá zmíněné škodlivé vazby mezi tahem a ohybe, tahem a krutem a nevznikaly by žádné smykové síly a deformace. Dále má vrstvy o stejné tloušťce vrstvené pod určitým úhlem. Například  $[55^\circ/-45^\circ]_S$ .

55°
-45°
-45°
55°

**Obrázek 64. Příklad symetricky vyrovnaného laminátu**

NASTAVENÍ ÚLOHY V NX. 8.5:

Tento postup je zde uveden pouze pro doplnění. Z důvodu nezískání materiálových konstant jsem si nemohl správnost postupu ověřit.

Pro nastavení kompozitní úlohy v programu NX8.5 by se použily stejné okrajové podmínky. Tvar pružiny by se samozřejmě lišil. Síť by se použila „3D Swept Mesh“ s přesným počtem vrstev, aby bylo rozložení elementů rovnoměrné. V „Mesh Collector“ se ve fyzikálních vlastnostech nastaví typ „Solid Laminate“. V záložce „Solid Laminate Modeler“ se nastaví teplota okolí, interlaminární vlastnosti (například pro epoxydovou pryskyřici je tečná složky 48 MPa, normálová 42 MPa) a počet vrstev. U každé vrstvy se nastaví úhel kladení a tloušťka (do 0,5 mm). Dále se zvolí pro každou vrstvu kritérium pevnosti. Kritéria existují například: *Hill*, *Hoffman*, *Tsai-Wu*, *Max Strain*, *Max Stress*. Liší se v přístupu, složitosti a také přesnosti.

Pro další postup je nutné znát materiálové konstanty, které charakterizují vlastnosti kompozitu ve všech směrech atd. Tyto konstanty se zjišťují experimentálně, například trhací zkouškou. Tyto konstanty se mi nepodařilo sehnat a po domluvě s vedoucím práce proto byla nakonec zvolena ocelová listová pružina.

Jak už bylo napsáno, hmotnostní úspora by byla značná při nahrazení oceli kompozitem. Nastavení optimálního kompozitu a správného výpočtu by bylo zřejmě dost složité. Budu rád, když se zmíněná problematika stane inspirací například pro další Diplomové práce.

## 6 Technologický postup výroby příčnicku

Příčnick je střední ocelová část rámu podvozku. Spojuje oba podélníky. Je svařované konstrukce z plechů a odlitek. Odlitky jsou použity v místech s velkým namáháním. Použité plechy jsou tloušťky 8, 6 a 4 mm. Přejchod z příčnicku do podélníku musí být plynulý. Pro svaření plechů jsou použity svary typu „V“, „půl-V“ a koutové.

Plech použitý na horní a spodní stranu příčnicku bude vypálen na lasseru, tloušťky osm milimetrů. Na boky příčnicku bude použit vystřižený plech tloušťky 6 milimetrů. V délce příčnicku budou uvnitř umístěny tři žebra. Tyto žebra budou vystřižena ze čtyř milimetrového plechu. V každém žebře bude odlehčovací otvor tvaru kruhu. Ve spojení horního plechu s příčnickem bude umístěný odlitek. To proto, že je zde předpokládáno velké napětí.

Při výrobě příčnicku se bude postupovat v tomto pořadí. Mezi boční plechy budou umístěna žebra, která se následně přivaří koutovým svarem. Tento svařenec bude položen na spodní plech a přivařen koutovými svary. Jako poslední bude na svařenec umístěn a následně přivařen horní plech. Typ svarů mezi horním plechem a svařencem bude „půl-V“.

Materiál plechů nese označení S355J2G dle normy EN 10 025. Tato ocel je vhodná ke svařování, má vysokou pevnost a odolává dynamickému namáhání i při nízkých teplotách. Označení J2 říká, že vrubová houževnatost KCU neklesne pod hodnotu  $27 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$  ani při teplotách do  $-20^\circ \text{ C}$ .

Výrobní výkres příčnicku je přiložen v deskách Diplomové práce.

## 7 Závěr

Na základě užitečných informací obsažených v rešerši byl vytvořen koncept neotočného podvozku nízkopodlažního tramvajového vozidla. Před samotnou tvorbou byly hledány způsoby, jak docílit co nejnižší hmotnosti podvozku.

Vznikl návrh podvozku s nekonvenčními prvky. Rám podvozku je nestandardního tvaru lehké svařované konstrukce. Na první pohled by měl zaujmout tvarem příčnicku, který vychází z toho, že jím prochází kompozitní listová pružina. Tento kompozitní díl s sebou přináší další úsporu hmotnosti. Vedení dvojkolí kývačkou je zde jako náhrada klasických, těžkých podélníků. Hmotnost rámu je 320 kg, celého podvozku pak přibližně 3634 kg. Váha podvozku by byla ještě nižší, kdyby nemusela být kompozitní listová pružina nahrazena ocelovou pružnicí z důvodu popsaného v kapitole 5.

Pohon dvojkolí byl umístěn vně rámu. Podvozek splňuje podmínku vztažné linie obrysu vozidla. Byl vytvořen pro rozchod 1435 mm a rozvor 1850 mm.

V jedné z posledních kapitol práce je napsána krátká kapitola, která se úzce dotýká využití kompozitních materiálů při stavbě kolejových vozidel. Právě kompozitní materiály mohou být cestou k rapidnímu ušetření hmotnosti a tím i celkových nákladů na provoz.

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Dobový obrázek pražské tramvaje [4] .....	11
Obrázek 2. První elektrická tramvaj v Čechách [4] .....	12
Obrázek 3. Tramvaj z roku 1907 [4] .....	12
Obrázek 4. Podmínka nízkopodlažnosti tramvaje [3] .....	13
Obrázek 5. Koncepce nízkopodlažních tramvají [3] .....	15
Obrázek 6. Částečně nízkopodlažní vozidlo [3] .....	17
Obrázek 7. Dvojkolí s menším průměrem kol [3] .....	18
Obrázek 8. Podvozek s nápravnicí [3] .....	18
Obrázek 9. Podvozek s nápravnicí pod kabinou řidiče [3] .....	18
Obrázek 10. Podvozek Siemens SF 70 [10] .....	19
Obrázek 11. Otočný podvozek KOMFORT plus [3] .....	20
Obrázek 12. Modernizovaný podvozek tramvají Škoda [3] .....	21
Obrázek 13. Užití nápravnice, pohonné ústrojí na boku [3] .....	22
Obrázek 14. MB 202 [14] .....	23
Obrázek 15. Nápravnice podvozku pro vozidlo For City [3] .....	23
Obrázek 16. 100% nízkopodlažní, otočný podvozek tramvaje For City [3] .....	24
Obrázek 17. Pohon volně uloženého kola kloubovou hřídelí [3] .....	24
Obrázek 18. Podvozek SF 30 C TFW (Siemens) [10] .....	25
Obrázek 19. Combino plus TFW (Siemens) [10] .....	26
Obrázek 20. S1000 Bombardier [11] .....	27
Obrázek 21. Ložiskový domek s kývačkou [13] .....	27
Obrázek 22. DG 1000 / DG 1435 [12] .....	28
Obrázek 23. Incentro (Bombardier) [15] .....	29
Obrázek 24. Podvozek Variotram (Bombardier) [16] .....	29
Obrázek 25. Podvozek Eurotram (Bombardier) [17] .....	30
Obrázek 26. Neotočný podvozek tramvaje Solaris Tramino S 105p [3] .....	31
Obrázek 27. Podvozek efWING (Kawasaki) [18] .....	32
Obrázek 28. efWING pro železniční vozidlo [18] .....	33
Obrázek 29. Vlastní koncepce .....	34
Obrázek 30. Díl rámu tvaru "loďky" .....	35

Obrázek 31. Kývačka .....	35
Obrázek 32. Kývačka .....	36
Obrázek 33. Pryžo-ocelové "sedlo".....	36
Obrázek 34. Spojení silentblokem .....	37
Obrázek 35. Kolejnicová brzda na rámu a převislý konec nápravy.....	37
Obrázek 36. Rám.....	38
Obrázek 37. „Lodřka“ bez závěšky a řez její polovinou.....	39
Obrázek 38. Detail závěšky.....	39
Obrázek 39. Dvojkolí .....	40
Obrázek 40. Parametry lořiska [20] .....	42
Obrázek 41. Kolo složené konstrukce.....	42
Obrázek 42. Náprava.....	43
Obrázek 43. Náprava-rozměrové schéma .....	43
Obrázek 44. Schéma silového zatížení nápravy.....	44
Obrázek 45. Elektromotor, brzda, kloubová hřidel .....	51
Obrázek 46. Převodovka .....	52
Obrázek 47. Nahrazení kompozitní pruřiny ocelovou.....	53
Obrázek 48. Model pruřnice .....	54
Obrázek 49. Nadefinované kontakty .....	55
Obrázek 50. Nadefinované okrajové podmínky.....	56
Obrázek 51. Nadefinovaná síť.....	56
Obrázek 52. Úplný model .....	57
Obrázek 53. Schéma zatížení pruřiny .....	57
Obrázek 54. Výsledné napětí dle HMM .....	58
Obrázek 55. Detail, zvýšené napětí na hraně objímky.....	58
Obrázek 56. Úprava objímky v řezu a snížení redukované napětí.....	59
Obrázek 57. Výsledné napětí dle HMM s upravenou objímkou .....	59
Obrázek 58. Posunutí v ose Z.....	59
Obrázek 59. Průběh redukovaného napětí dle HMM .....	60
Obrázek 60. Hodnota posunutí v ose Z.....	60
Obrázek 61. Průběh redukovaného napětí dle HMM .....	61
Obrázek 62. Posunutí v ose Z.....	62

Obrázek 63. Navržená pružnice .....	63
Obrázek 64. Příklad symetricky vyrovnaného laminátu .....	64

## 9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Technická data [10].....	19
Tabulka 2. Technické parametry [3] .....	20
Tabulka 3. Technické parametry [14] .....	22
Tabulka 4. Technické parametry [10] .....	25
Tabulka 5. Technické parametry [10] .....	25
Tabulka 6. Technické parametry [11] .....	27
Tabulka 7. Výpočet pružiny sekundárního vypružení .....	49
Tabulka 8. Výsledné parametry šroubovitě pružiny sekundárního vypružení.....	50
Tabulka 9. Parametry pružnice.....	62
Tabulka 10. Přehled zatěžujících sil, výsledných napětí a posunutí .....	63

## SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy jsou umístěny v deskách Diplomové práce.

VÝKRESY: Dispoziční výkres podvozku. číslo výkresu: PS-01-01  
Výrobní výkres příčnicku rámu. číslo výkresu: PS-01-01-1



## 10 SEZNAM ZDROJŮ

### 10.1 Knižní publikace

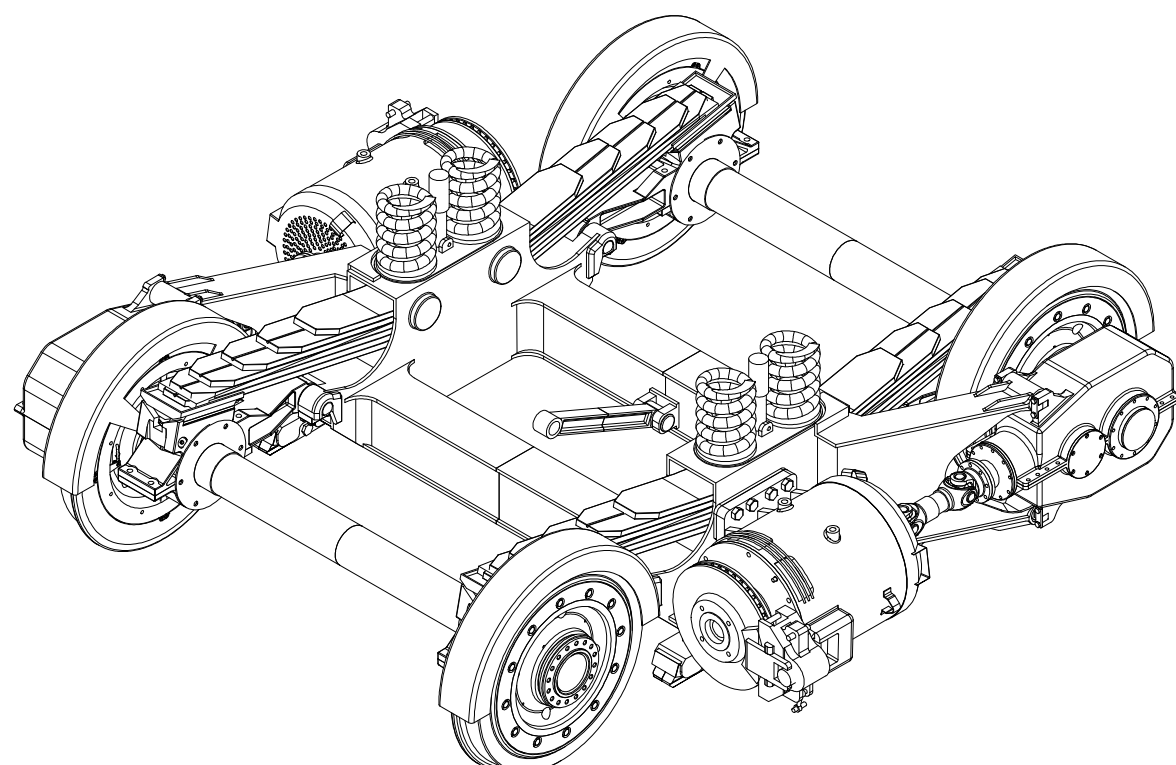
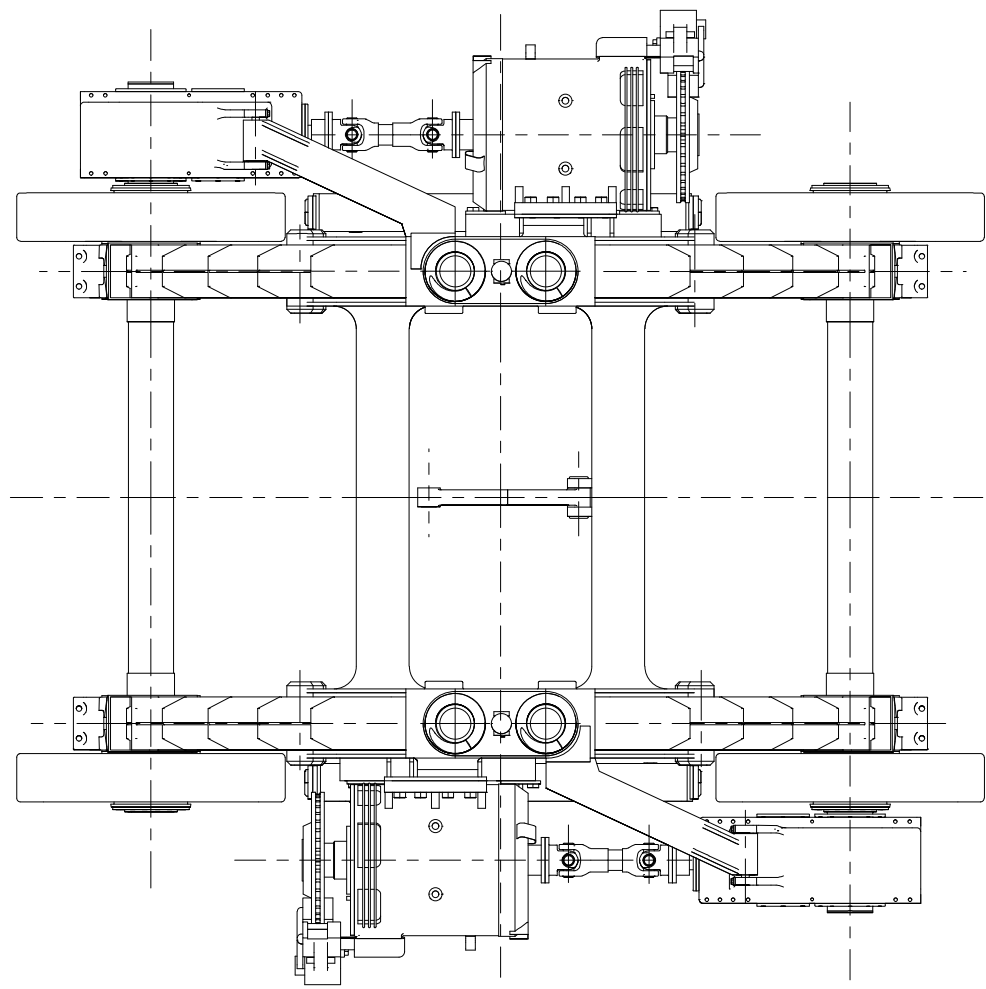
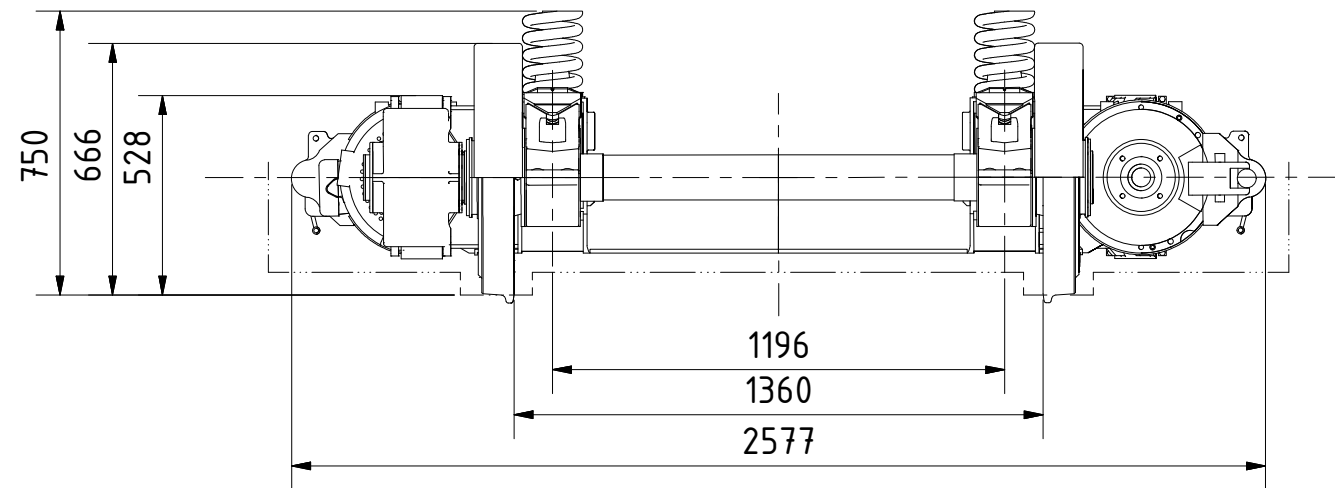
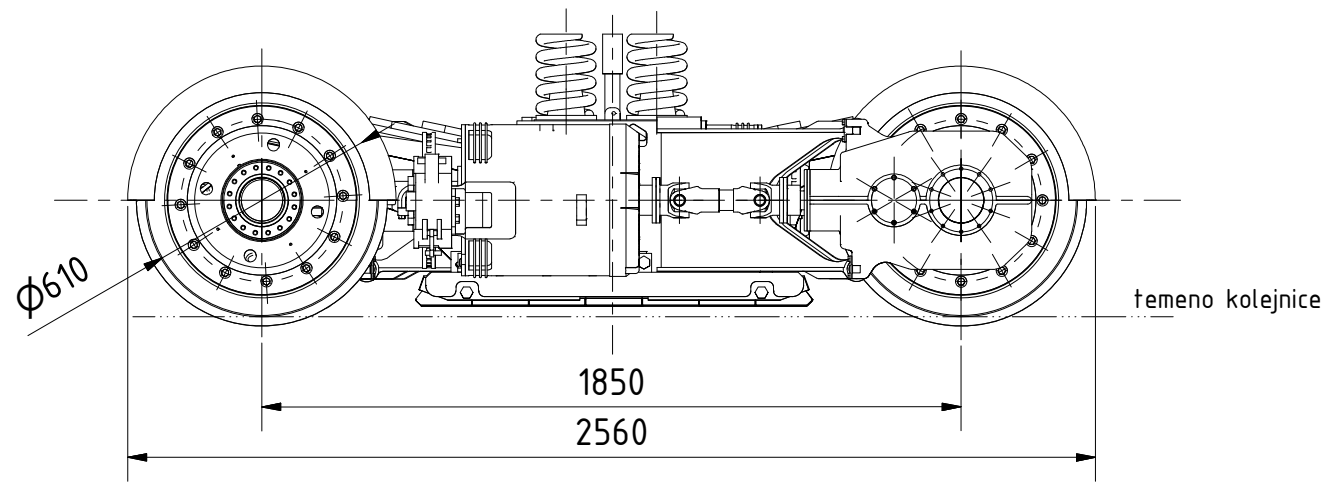
- [1] DOSTÁL, J., HELLER, P. *Kolejová vozidla I.* Plzeň Západočeská univerzita, 2007. ISBN 978-80-7043-960-9
- [2] DOSTÁL, J., HELLER, P. *Kolejová vozidla II.* Plzeň Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-641-7
- [3] DOSTÁL, J., HELLER, P. *Kolejová vozidla III.* Plzeň Západočeská univerzita, 2011. ISBN 978-80-261-0028-7
- [4] LAŠ, V. *Mechanika kompozitních materiálů.* Plzeň Západočeská univerzita, 2008.


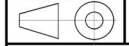
### 10.2 Časopisecké zdroje

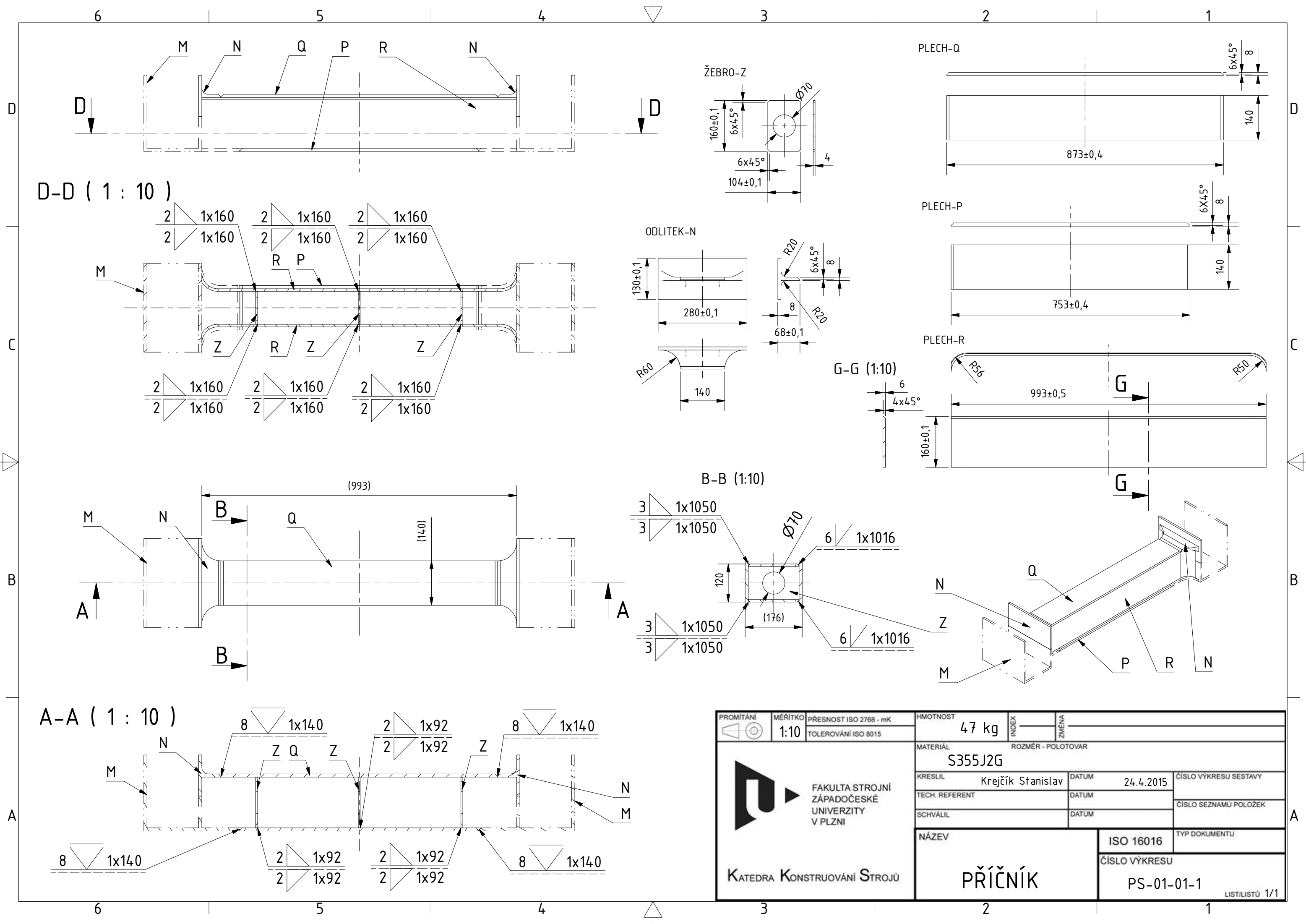
- [10] *Fahrwerke erster Klasse: Das komplette Programm für den hochwertigen Schienenverkehr.* 2007.
- [11] *Bombardier S-Size Bogies: S1000.* 2004.
- [12] *Niederflur-Fahrwerke: DG 1000 / DG 1435.* 2006.
- [13] *Schienenfahrzeugtechnik: DG 1000 / DG 1435.* 2006.
- [14] *Prose: Bogie engineering in Finnish.* 2014.
- [15] BOMBARDIER. *LIST OF REFERENCES: INCENTRO BOGIE.* 2002.
- [16] BOMBARDIER. *LIST OF REFERENCES: VARIOTRAM BOGIE.* 2002.
- [17] BOMBARDIER. *LIST OF REFERENCES: EUROTRAM BOGIE.* 2002.
- [18] KAWASAKI. *ROLLING STOCK: efWING.* 2014.

### 10.3 Publikace na internetu

- [20] EXION: MECHANICAL EQUIPMENT. 2016. SKF [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://cs.aotengbearing.com/csp/skf-cylindrical-roller-bearings-nncf5024cv-csproduct27031.html>
- [21] Partially low-floor tram: VarioLF2. 2010. *Maximum of Savings* [online]. (-) [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: [http://www.pragoimex.cz/files/LF-EN\\_61fdfeaf0e4212360664cb06a67c8128.pdf](http://www.pragoimex.cz/files/LF-EN_61fdfeaf0e4212360664cb06a67c8128.pdf)



 <p>FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p> <p>KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ</p>	PROMÍTÁNÍ	MĚŘITKO	CELK. HMOTNOST	ZMĚNA 1	
		1:20	3634 kg	ZMĚNA 2	
	KRESLIL	Krejčík Stanislav	DATUM	22.4.2015	ČÍSLO VÝKRESU SESTAVY
	TECH. REFERENT		DATUM		ČÍSLO SEZNAMU POLOŽEK
SCHVÁLIL		DATUM		TYP DOKUMENTU	
NÁZEV	ISO 16016		ČÍSLO VÝKRESU		
NEOTOČNÝ PODVOZEK			PS-01-01		
				LISTŮ/LIST 1/1	



PROMĚTÁNÍ	MĚŘÍTKO 1:10	PŘESNOST ISO 2768 - mK TOLEROVÁNÍ ISO 8015	HMOTNOST 47 kg	INDEX	ZMĚNA
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI		MATERIÁL ROZMĚR - POLOTOVAR S355J2G			
KRESLIL Krejčík Stanislav		DATUM 24.4.2015		ČÍSLO VÝKRESU SESTAVY	
TECH. REFERENT		DATUM		ČÍSLO SEZNAMU POLOŽEK	
SCHVÁLIL		DATUM		TYP DOKUMENTU	
NÁZEV <b>PŘÍČNÍK</b>			ISO 16016		
			ČÍSLO VÝKRESU PS-01-01-1		
					LIST/LISTŮ 1/1