

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Pneumatické vypružení tramvajového podvozku

Autor: **Bc. Tomáš Míčka**

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

Akademický rok 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš MÍČKA**

Osobní číslo: **S16N0074P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**

Název tématu: **Pneumatické vypružení tramvajového podvozku**

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:

Škoda Transportation a.s. poskytne podklady k adaptaci stávajícího podvozku na podvozek vzduchem vypružený.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Rešerše podvozků s přihlédnutím k pneumatickému vypružení. Základní funkce a přínosy pneumatického vypružení.
2. Posoudit možnost adaptace stávajícího tramvajového otočného nebo neotočného podvozku s pružinovým vypružením na vypružení vzduchové, včetně zástavby do skříně.
3. V případě pozitivního výsledku možné adaptace, tuto adaptaci provést, v opačném případě navrhnout nové řešení včetně zástavby do skříně.
4. Výpočet vybrané části sekundárního vypružení.
5. Výrobní výkres vybrané části podvozku.

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

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


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

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Vokoun**
Škoda Transportation a.s.

Datum zadání diplomové práce: **19. září 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 19. září 2017

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

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském, č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Petru Hellerovi, CSc. za cenné rady a poskytnuté materiály. Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině a všem blízkým za jejich podporu během studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Bc. Míčka	Tomáš	
STUDIJNÍ OBOR	2301T001 „Dopravní a manipulační technika“		
VEDOUcí PRÁCE	Doc. Ing. Heller, CSc.	Petr	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Pneumatické vypružení tramvajového vozidla		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	89	TEXTOVÁ ČÁST	73	GRAFICKÁ ČÁST	16
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce obsahuje návrh vzduchem vypruženého tramvajové podvozku. Úkolem bylo modifikovat stávající konvenčně vypružený podvozek 26T. Úpravy byly zkontrolovány pomocí MKP výpočtů. Výsledkem práce je upravený podvozek 26T včetně návrhu na jeho vestavění do skříně tramvaje.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Tramvaj, vzduchové vypružení, nízkopodlažní, rám podvozku, výpočet.</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Bc. Míčka	Tomáš	
FIELD OF STUDY	2301T001 “Transport and handling machinery“		
SUPERVISOR	Doc. Ing. Heller, CSc.	Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Air suspension of the tram bogie		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2018
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	89	TEXT PART	73	GRAPHICAL PART	16
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis contains a design of air-suspended tram bogie. The task was to modify the existing bogie 26T with traditional coil springs. Modifications were checked using FEM calculations. The result of the work is a modified bogie 26T, including a design for its connection with a tram body.
KEY WORDS	Tram, air suspension, low floor, bogie frame, calculations.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	4
1 ÚVOD.....	5
2 REŠERŠE PODVOZKŮ	6
2.1 Podvozek 35T	6
2.2 Podvozek Eurotram	7
2.3 Podvozek GT6N.....	8
2.4 Podvozek CL 606	11
2.5 Podvozek SF 1000	13
2.6 EV09.....	14
3 PNEUMATICKÉ VYPRUŽENÍ.....	16
3.1 Pneumatický systém	16
3.1.1. Regulace tlaku v pružinách.....	16
3.1.2. Uložení podvozků v rámci vzduchových pružin	17
3.2 Vzduchové pružiny.....	18
3.2.1. Vlnovcová pružina (convoluted air spring).....	19
3.2.2. Vaková pružina (rolling lobe air spring)	20
3.2.3. Nouzová pružina.....	22
3.3 Namáhání vzduchových pružin	23
4 UVAŽOVANÉ KONSTRUKČNÍ VARIANTY.....	25
4.1 Varianta se čtyřma pružinami (A)	25
4.2 Varianta s jednou pružinou (B)	26
4.3 Varianta s dvěma pružinami na místě původních (C)	27
4.4 Varianta s dvěma pružinami vně rámu podvozku na balkónech (D).....	28
4.5 Zhodnocení variant	28
5 VOLBA PRUŽINY	29
5.1 Zatížení podvozku a jeho pohyby.....	29
5.2 Volba pružiny	29
5.2.1. Tuhosti vzduchové pružiny	30
5.3 Zvolená pružina	32
5.4 Určení zástavbového prostoru pro pružiny.....	33
6 ÚPRAVY STÁVAJÍCÍ KONSTRUKCE.....	34
6.1 Modifikace podvozku	34

6.1.1. Ložná plocha pružin	35
6.1.2. Uložení vzduchové pružiny	35
6.1.3. Modifikace příčných narážek	37
6.2 Modifikace spodní části skříně	38
6.3 Kontrola kolizí	42
6.3.1. Vyšetření pohybů skříně vůči podvozku v horizontální rovině.....	42
6.3.2. Aplikace pohybů na sestavu	42
6.4 Vliv provedených úprav	43
6.4.1. Změna tuhosti pružin	43
7 ZATÍŽENÍ RÁMU PODVOZKU	46
7.1 Hmotnostní rozbor	46
7.2 Mimořádné zátěžné stavy	47
7.2.1. Svislé zatížení	48
7.2.2. Příčné zatížení.....	49
7.2.3. Podélné zrychlení – náraz.....	50
7.2.4. Kosení podvozku	50
7.2.5. Křížový propad 1%.....	51
7.2.6. Křížový propad - 100% odlehčení kola	52
7.2.7. Kombinace zatížení	53
8 PEVNOSTNÍ VÝPOČET RÁMU PODVOZKU.....	54
8.1 Úvod k řešení pevnostního výpočtu pomocí MKP.....	54
8.2 Materiál rámu	54
8.3 Síť modelu	54
8.4 Výpočet jednotlivých zátěžných stavů	55
8.4.1. Svislé zatížení	55
8.4.2. Podélné zrychlení - náraz	55
8.4.3. Kosení podvozku	56
8.4.4. Příčné zatížení.....	57
8.4.5. Křížový propad - 100% odlehčení kola	57
8.4.6. Křížový propad 1%.....	58
8.5 Kombinace zátěžných stavů	59
8.5.1. Kombinace 1	59
8.5.2. Kombinace 2.....	61
8.5.3. Kombinace 3.....	62

8.5.4. Kombinace 4.....	63
8.6 Hodnocení pevnosti rámu zatíženého provozním zatížením.....	64
8.6.1. Kombinace statického zatěžování	64
8.7 Zhodnocení výpočtů	65
9 ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ.....	66
10 ZDROJE	67
11 SEZNAM OBRÁZKŮ	69
12 SEZNAM TABULEK	72
13 SEZNAM PŘÍLOH	73

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
V	objem	[m ³]
z	stlačení pružiny	[m]
D	průměr	[m]
n	polytropický exponent	[-]
p	tlak	[Pa]
S	obsah	[m ²]
k	součinitel bezpečnosti	[-]
F	síla	[N]
c	tuhost	[N · m ⁻¹]
σ	napětí	[Pa]
m	hmotnost	[kg]
y	příčný pohyb	[m]
g	gravitační zrychlení	[m · s ⁻²]
s	vzdálenost	[m]
α, β	součinitele kmitání	[-]
MKP	Metoda konečných prvků	[-]
EN	evropská norma	[-]

1 Úvod

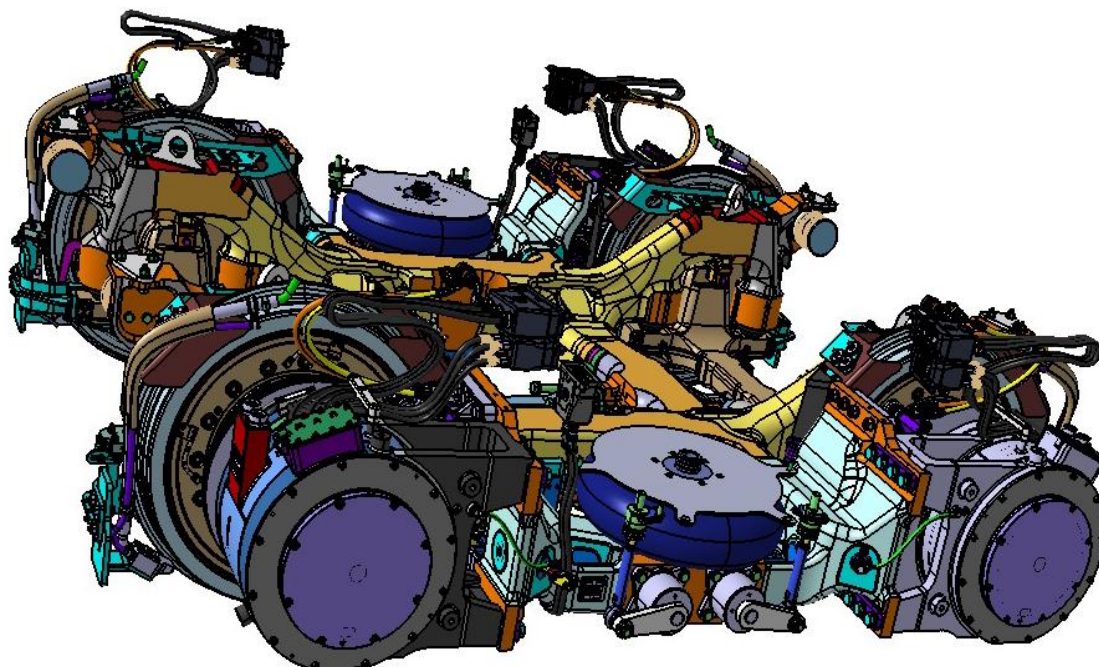
Zatímco u lehkých elektrických jednotek a vozidel metra je pneumatické vypružení jedním z nejpoužívanějších variant vypružení, řešení sekundárního vypružení u tramvajových vozidel pomocí vzduchových pružin je stále velmi nestandardní možností. Hlavním problémem při konstrukci pneumaticky vypruženého tramvajového podvozku je nedostatek zástavbového prostoru při snaze zachování 100% nízké podlahy.

Mezi nevýhody takových podvozků, oproti konvenčně vypružených podvozků pomocí vinutých pružin, je nutnost konstrukce kompletního pneumatického systému a jeho umístění ve vozidle. Z toho plyne jejich konstrukční složitost, náročnost na zástavbový prostor, údržba a vyšší riziko poruchy celého pneumatického systému.

Existují však požadavky zákazníků, na jejichž splnění se jeví pneumaticky vypružený podvozek jako nejvhodnější konstrukční řešení. Takový podvozek dokáže udržet konstantní výšku skříně nezávisle na jeho zatížení, popřípadě výšku měnit v určitém rozsahu. Tento systém pak zaručuje ideální polohu hrany podlahy vůči nástupnímu ostrůvku a umožňuje komfortní a bezbariérový nástup/výstup cestujících. Přesto že pneumatické pružiny bývají mnohem větších průměrů než pružiny vinuté, mohou být naopak nižší, což můžeme považovat také za výhodu.

2 Rešerše podvozků

2.1 Podvozek 35T



Obrázek 1 - Podvozek 35T

Parametr	Hodnota
Hmotnost	5500 [kg]
Rozvor	1800 [mm]
Rozchod	1435 [mm]
Průměr kol	670 [mm]
Určený pro vozidlo	Tramvaj
Trakční podvozek	Ano
Průměr vzduchové pružiny	515 [mm]

Tabulka 1 - Základní parametry podvozku 35T

Podvozek 35T je podvozek tramvaje, vyráběné pro německé město Chemnitz firmou Škoda Transportation. Jedná se o trakční neotočný dvounápravový podvozek.

Základ podvozku tvoří vnitřní tuhý otevřený rám, skládající se ze dvou podélníků, které jsou spojeny dvojicí příčníků. Z důvodu zachování nízké podlahy i v prostoru nad podvozkem, jsou kola uložena na nápravnicích. Každé kolo je tudíž volně otočné a vyžaduje vlastní pohon i brzdění. Z vnější strany kol jsou uchyceny brzdové kotouče.

Vně každého kola je umístěn elektromotor s převodovkou. Nápravnice je od rámu podvozku odpružena pomocí primárního vypružení, které je na každé straně řešeno dvojicí pryžových elementů. Vzhledem k požadavkům zákazníka, je sekundární vypružení řešeno pomocí dvojce vzduchových měčů, situovaných na středu rámu po vnějších stranách. V blízkosti každé vzduchové pružiny se nachází dvojice rotačních tlumičů.

Na koncích podélníku a na středu se nacházejí narážky, které definují krajní polohy podvozku vůči skříní a umožňují jeho pohyb vůči skříní v řádech několika stupňů, aby skříní nekopírovala směrové nerovnosti koleje. V rámci podvozku je zabudována kolejnicová brzda. Přenos příčných a podélných sil z podvozku na skříní vozidla je řešen pomocí táhla.

2.2 Podvozek Eurotram



Obrázek 2 - Podvozek Eurotram [1]

Parametr	Hodnota
Rozvor	1400 [mm]
Rozchod	1435 [mm]
Průměr kol	550 [mm]
Určený pro vozidlo	Tramvaj
Trakční podvozek	Ano
Průměr vzduchové pružiny (odhadem)	280 [mm]

Tabulka 2 - Základní parametry podvozku Eurotram [2]

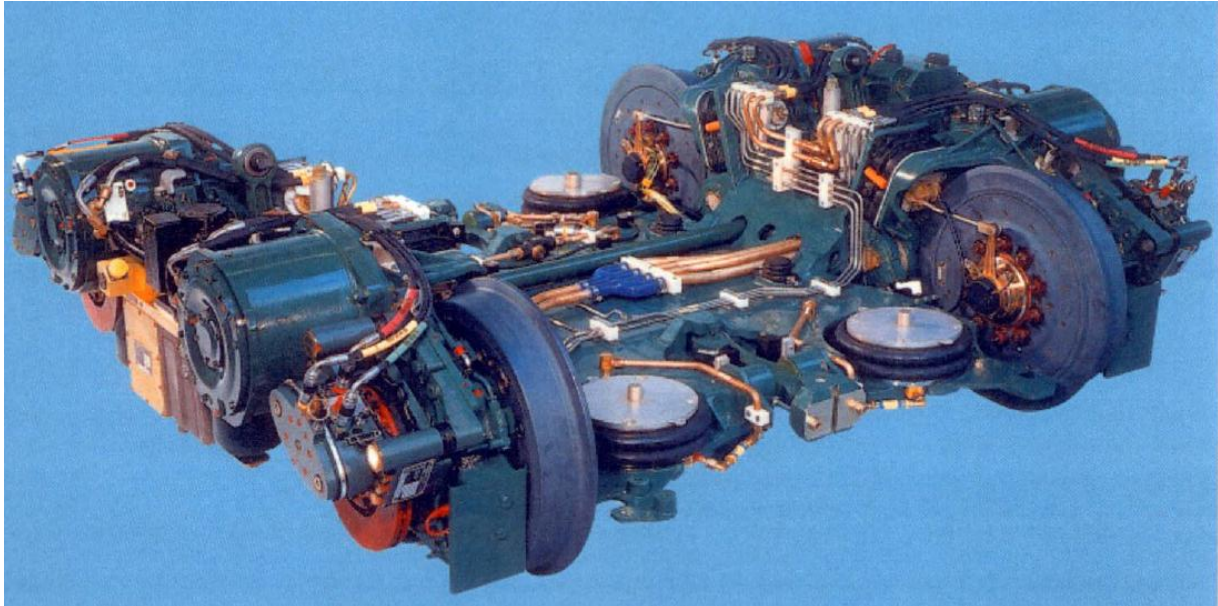
Tento podvozek, vyráběný firmou Bombardier, je určen pro nízkopodlažní tramvaje Eurotram, používané například ve francouzském Štrasburku nebo italském Miláně.

Konstrukce podvozku zaručuje 100% nízkopodlažní jednotky. Jedná se o dvounápravový podvozek trakční, neotočný.

Základ podvozku tvoří rám, který je poněkud atypický. Příčník je celistvý po celé délce podvozku. Na koncích onoho příčníku je umístěno sekundární vzduchové vypružení a také se přes něj přenáší příčné a podélné síly pomocí táhla. Zespod rámu po vnějších stranách jsou instalovány kolejnicové brzdy.

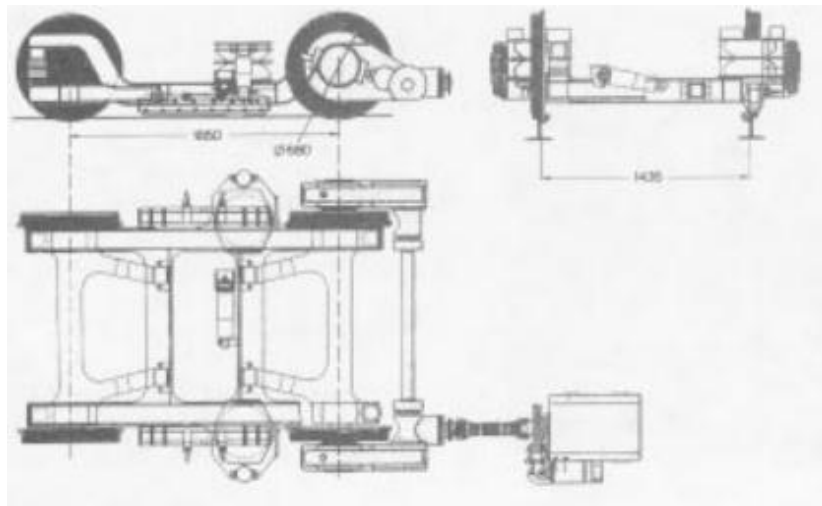
Po stranách jsou k pevné středové části rámu kyvně uchycena kola. Jako primární vypružení pak slouží pryžové bloky. Kola jsou volně otočná na čepích, proto má každé kolo svůj vlastní motor s převodovkou a také kotoučovou brzdou na vnější části.

Středem podvozku prochází zkrutná tyč torzního stabilizátoru.

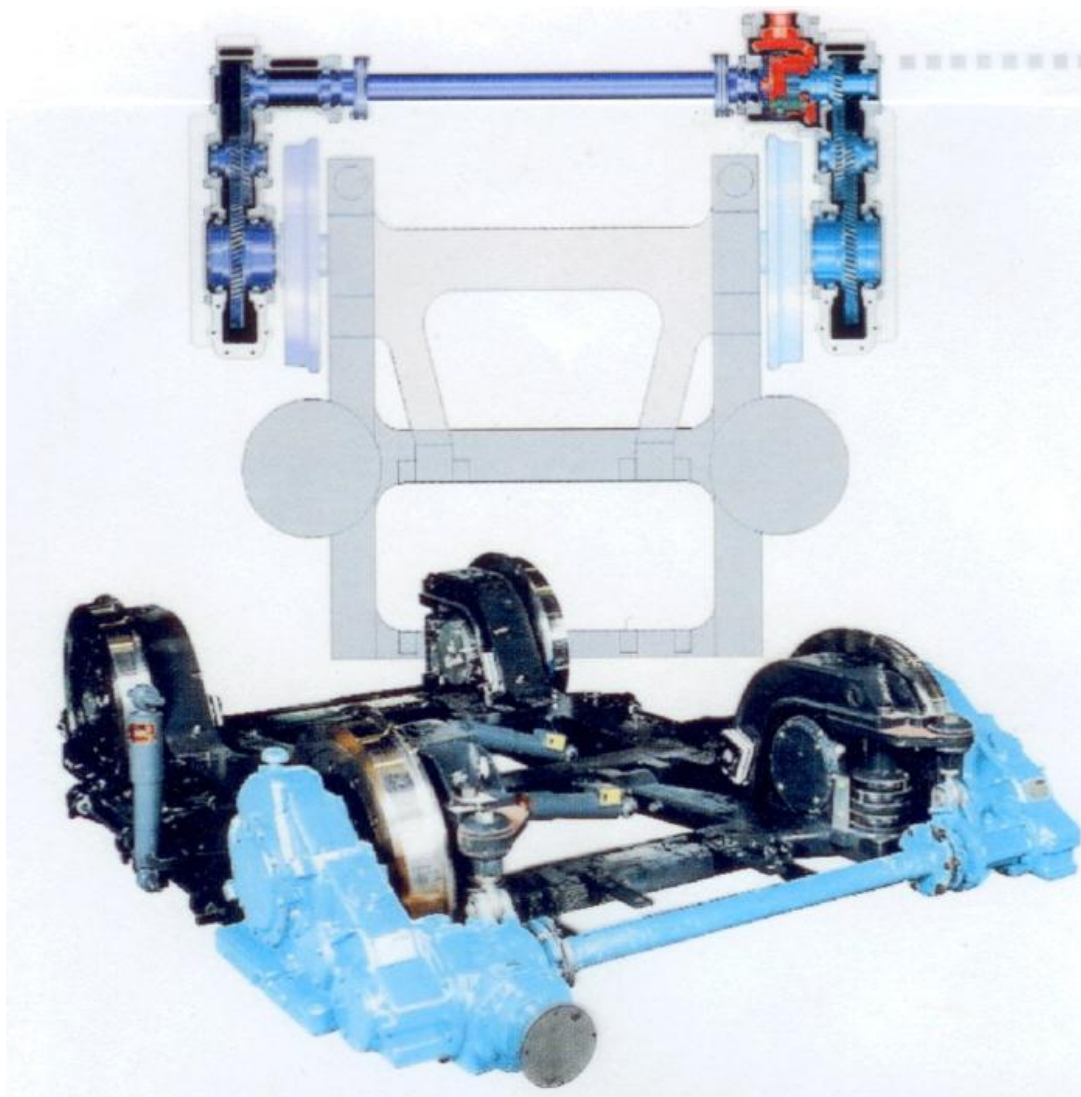


Obrázek 3 - Podvozek Eurotram [3]

2.3 Podvozek GT6N



Obrázek 4 - Podvozek GT6N [2]



Obrázek 5 - Podvozek GT6N [3]

Parametr	Hodnota
Rozvor	1850 [mm]
Rozchod	1435 [mm]
Průměr kol	680 [mm]
Určený pro vozidlo	Tramvaj
Trakční podvozek	Ano
Průměr vzduchové pružiny (odhadem)	400 [mm]

Tabulka 3 - Základní parametry podvozku GT6N [2]

Tento podvozek byl vyráběn pro tramvaj společnosti AEG, později firmou Adtranz, která byla nakonec v roce 2001 koupena firmou Bombardier. Tyto tramvaje vyrobené v 90. letech byly jedny z prvních 100% nízkopodlažních tramvají vůbec. [4]



Obrázek 6 - Podvozek GT6N/GT8N [7]

Jedná se o dvounápravový neotočný podvozek s dvěma poháněnými koly. Základ podvozku tvoří jednoduchý rám, tvořený jedním příčnickem a dvěma podélníky.

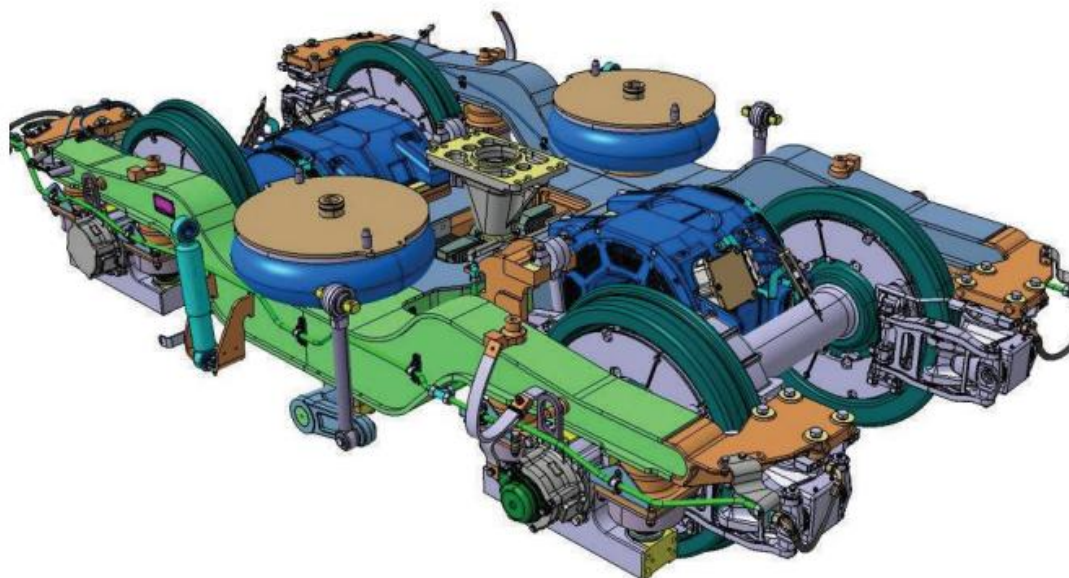
Volně otočná kola jsou uložena na nápravnicích, které jsou kyvně uloženy v příčnicku. Od rámu je nápravnice s koly odpružena pomocí pryžových elementů.

Zvláštností tohoto konstrukčního řešení je způsob pohonu kol. Motor je uložen mimo podvozek na skříni tramvaje a výkon z něj je přenášen kloubovou hřídelí na rozvodovku a odtud rozváděcí hřídelí na jednotlivé převodovky kol. Celý tento převodový systém je na dvou místech uchycen k rámu podvozku pomocí závěsek. Kola jsou tak mechanicky pevně spojena stejně, jakoby se jednalo o klasické dvojkolí s nápravou.

Kotoučová brzda je umístěna hned za motorem před kloubovou hřídelí. Zbylá dvě kola se volně otáčejí a nejsou ani poháněna ani bržděna. Podvozek je opatřen vertikálními a příčnými tlumiči.

Primární vzduchové vypružení není umístěno na středu podvozku, nýbrž blíže k hnacím kolům.

2.4 Podvozek CL 606



Obrázek 6 - Podvozek CL606 [5]

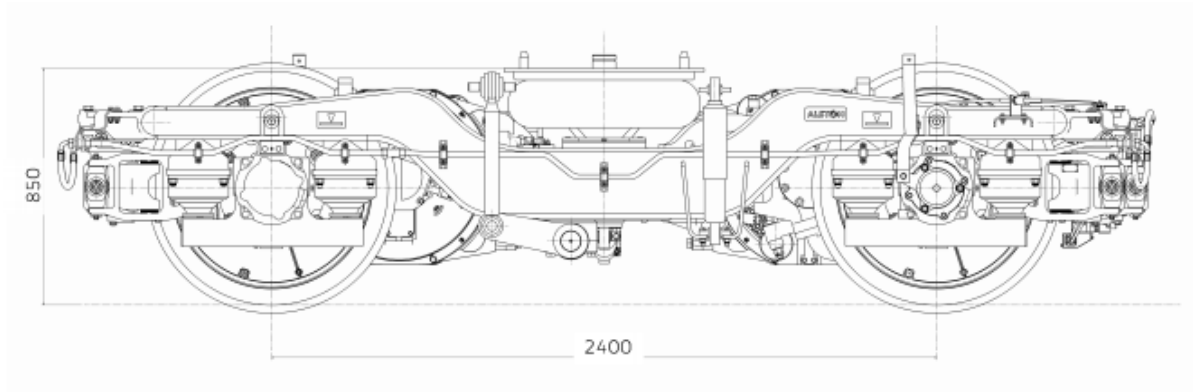
Parametr	Hodnota
Rozvor	2400 [mm]
Rozchod	1067 [mm]
Průměr kol	840 [mm]
Hmotnost	7800 [kg]
Určený pro vozidlo	Lehká elektrická jednotka
Trakční podvozek	Ano
Průměr vzduchové pružiny (odhadem)	700 [mm]

Tabulka 4 - Základní parametry podvozku CL606 [5]

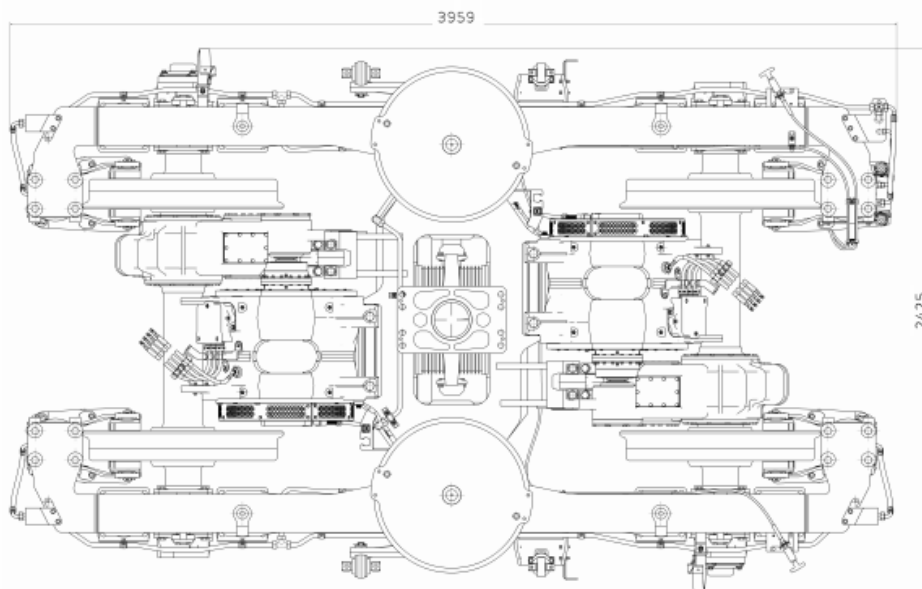
Z důvodu nedostatku dohledatelných informací o vzduchem vypružených tramvajových podvozcích, zařazují do přehledu také podvozek pro lehké elektrické jednotky, svými rozměry a parametry alespoň přibližujícími se podvozkům tramvajovým.

Tento trakční dvounápravový podvozek od firmy Alstom je určen pro lehké regionální vozy. Maximální zatížení na nápravu je 17 tun. Provozní rychlost tohoto podvozku může být až 120km/h. [5]

Otevřený rám podvozku je tvořen dvěma podélníky spojených příčnicí. Uprostřed příčnice se nachází čep ve tvaru „T“, který zajišťuje spojení podvozku se skříní vozidla. Podvozek je vybaven klasickým dvojkolím s nápravou. Z důvodu úzkého rozchodu a z toho plynoucího nedostatku místa mezi koly jsou brzdové kotouče integrovány do kol. Primární vypružení je řešeno pomocí pryžových elementů, sekundární pomocí vzduchových pružin.



Obrázek 7 - Podvozek CL 606 [5]



Obrázek 8 - Podvozek CL 606 [5]

Pohon dvojkolí zajišťuje dvojice motorů s dutým rotorem, uchycených k rámu podvozku. Dutým rotorem pak prochází kloubová hřídel, která pohání nápravovou převodovku zavěšenou na závěsce. Na vnějších stranách rámu jsou umístěny tlumiče a uprostřed podvozku se nachází torzní stabilizátor.

2.5 Podvozek SF 1000



Obrázek 9 - Podvozek SF 1000 [6]

Parametr	Hodnota
Rozvor	2100 [mm]
Rozchod	1435 [mm]
Průměr kol	850 [mm]
Hmotnost	6700 [kg]
Určený pro vozidlo	Metro
Trakční podvozek	Ano
Průměr vzduchové pružiny (odhadem)	720 [mm]

Tabulka 5 - Základní parametry podvozku SF 1000 [6]

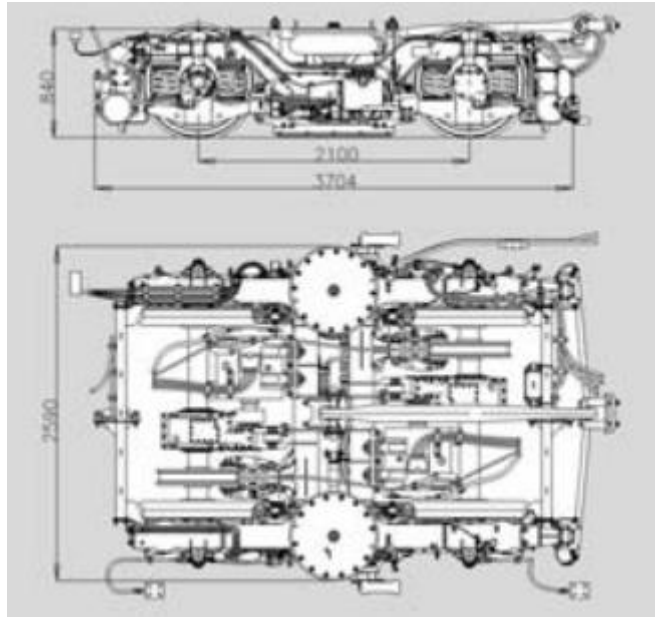
Z výše zmíněných důvodů zařazují do přehledu také jeden podvozek pro lehká vozidla metra. Podvozky metra jsou rozměrově nejpodobnější tramvajovým. Hlavním rozdílem je nutnost umístění sběrače na straně podvozku.

Parametry podvozku se oproti podvozkům lehkých regionálních jednotek přibližují těm tramvajovým daleko víc (viz tabulka základních parametrů).

Rám podvozku je tvořen dvojicí podélníků spojenými příčnickem. Na obou kocích podvozku se nachází poměrně drobné čelníky kruhového profilu, jedná se tudíž o uzavřený rám. Každé dvojkolí má jeden brzdový kotouč a je poháněno motorem s dutým rotorem přes nápravovou převodovku, podobně jako již zmiňovaný podvozek CL 606.

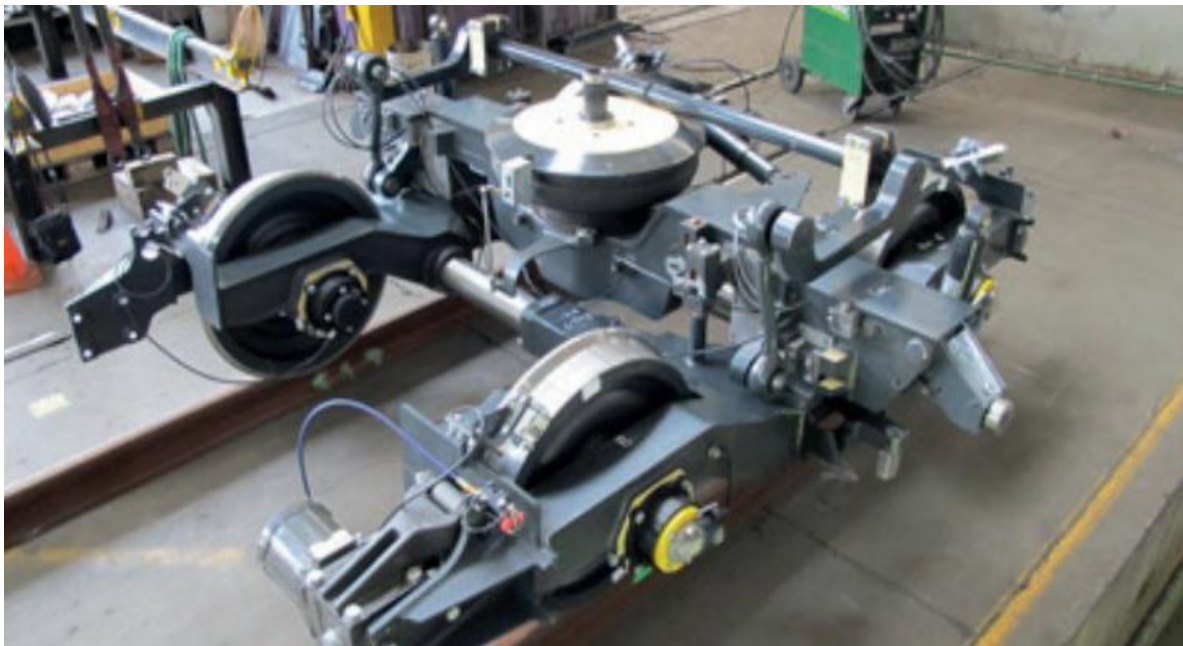
Primární vypružení obstarává dvojice vinutých pružin po každé straně dvojkolí. Sekundární vypružení je řešeno vzduchovými měchy umístěnými na středu podélníků. Podvozek je rovněž vybaven kolejnicovou brzdou.

Přenos sil z podvozku na skříň je realizován tlačně tažnou tyčí.



Obrázek 10 - Podvozek SF 1000 [6]

2.6 EV09



Obrázek 11 - Podvozek EV09 [7]

Poslední v pořadí je tento atypický podvozek od firmy Prose. Je určen pro švýcarského dopravce Montreux-Berner Oberland-Bahn, speciálně pro linku mezi městy Montreux a Interlaken zvanou Golden-Pass. Na této trase se rozchod mění z klasického 1435mm na úzký 1000mm a právě tato skutečnost se odráží v netradiční konstrukci tohoto podvozku, který je schopen svůj rozchod za provozu adaptovat. Tato schopnost podvozku odstraňuje potřebu přestupování cestujících, což výrazně zvyšuje komfort cestování.

Parametr	Hodnota
Rozvor	1800 [mm]
Rozchod	1435/1000 [mm]
Průměr kol (odhadem)	800 [mm]
Určený pro vozidlo	Osobní vůz
Trakční podvozek	Ne
Průměr vzduchové pružiny (odha-	800 [mm]
Max. zatížení na nápravu	8 [t]

Tabulka 6 - Základní parametry podvozku EV09 [7]

Rám podvozku je složen ze dvou podélníků, které jsou vůči sobě posuvné o 435mm. Podélníky spojuje pevný příčnick, na kterém je uprostřed umístěna vzduchová pružina jako sekundární vypružení. Celý příčnick se při změně rozchodu nadzvedne společně se skříň, podélníky se vůči sobě přestaví a poté se příčnick opět zamkne s podélníky. Celý tento proces je umožněn díky speciálnímu zařízení na trati. Přes příčnick se také přenáší veškeré síly z podvozku na skříň.

Kola jsou volně uložena na čepch v podélnících, brzděna špalíkovými brzdami. Tlumiče sekundárního vypružení jsou umístěny stejně jako torzní stabilizátor, uprostřed podvozku po vnějších stranách příčnicku.



Obrázek 12 - Podvozek EV09 s úzkým (vlevo) a širokém rozchodu [8]

3 Pneumatické vypružení

3.1 Pneumatický systém

Použití vzduchových pružin vyžaduje celý systém pro generaci, regulaci a rozvod tlakového vzduchu.

Hlavní částí vzduchového systému je kompresor generující tlakový vzduch (8 až 10bar), následuje vysoušeč vzduchu a regulátor tlaku. Tlakovým vzduchem je plněn vzdušník, který slouží jako zásoba vzduchu pro pružiny. Celý systém je opatřen pojistnými a přetlakovými ventily. Důležitým prvkem je regulační ventil, který řídí tlak v pružinách.

3.1.1. Regulace tlaku v pružinách

Aby byla zaručena konstantní výška skříně vozidla, musí být při změně zatížení podvozku regulován tlak v pružinách. K tomu slouží regulační ventil.

Nejrozšířenější je přímé mechanické ovládání regulačního ventilu, kdy je ventil umístěn na skříně vozidla a táhlem je spojen s podvozkem. Vlivem zatížení nebo odlehčení vozidla, se změní vzdálenost mezi skříní a podvozkem a táhlo tak přímo působí na řídicí páku regulačního ventilu, čímž ovládá plnění nebo vyprazdňování pružin.

Regulační ventil má určitou citlivost, tudíž při malých pohybech skříně při jízdě nepracuje.

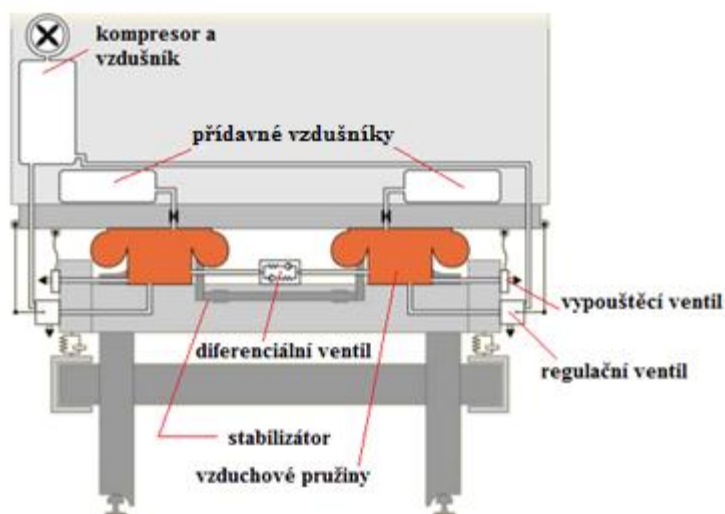


Obrázek 13 - Regulační ventil [9]

Další možnost regulace tlaku je pomocí řídicí jednotky a ventilové jednotky. Kdy řídicí jednotka, dle informací od snímače polohy skříně, ovládá ventily a reguluje tak tlak v pružinách.

3.1.2. Uložení podvozků v rámci vzduchových pružin

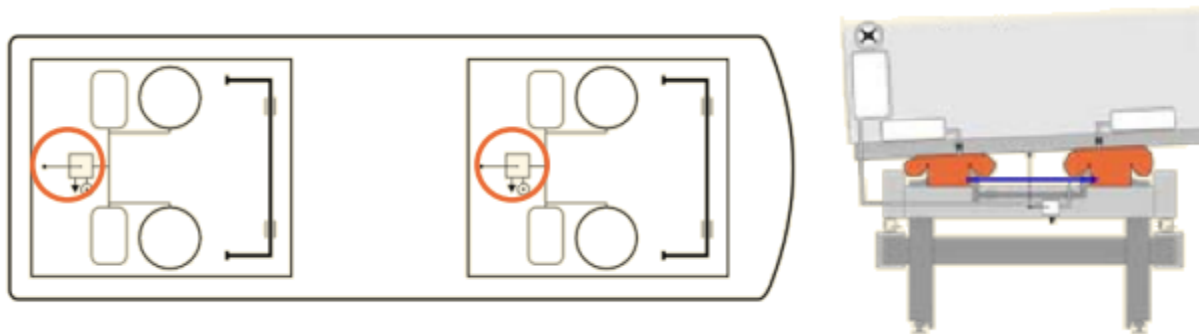
Důležitým aspektem vzduchového vypružení, je počet regulačních ventilů v rámci jednoho podvozku. Je tím udána výsledná podoba celého vzduchového systému.



Obrázek 14 - Obecné schéma soustavy vzduchového vypružení [10]

- **1-bodové uložení**

Jednobodové uložení, při klasickém použití dvou pružin na jednom podvozku, chápeme tak, že je jeden regulační ventil společný pro dvě vzduchové pružiny. Při tomto jednodušším způsobu uložení je nutné použití klasického torzního stabilizátoru, protože systém vzduchového vypružení není schopen reagovat na kolébání skříně.

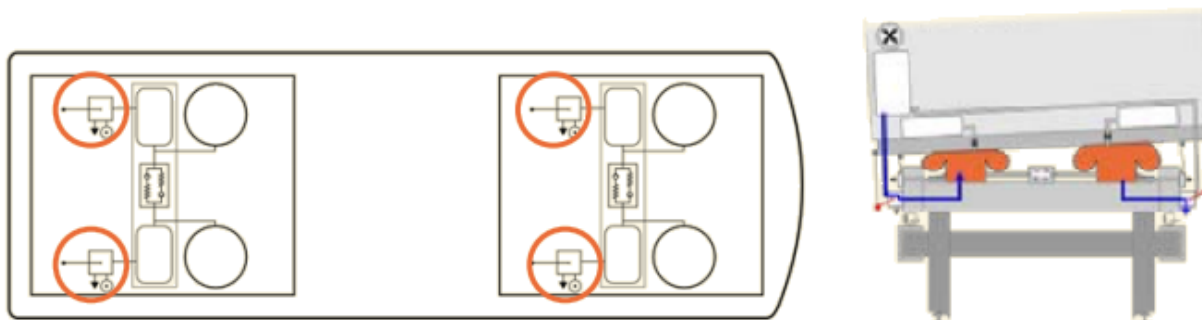


Obrázek 15 - 1-bodové uložení [10]

Z obrázku 15 je patrné umístění regulačního ventilu a jednotlivé prvky vzduchového systému. Regulační ventil je umístěn na středu podvozku a reguluje přívod vzduchu pro obě pružiny současně, které jsou propojeny bez použití diferenciálního ventilu. Každý takto uložený podvozek je opatřen torzním stabilizátorem.

- **2-bodové uložení**

Při dvoubodovém uložení má každá vzduchová pružina svůj regulační ventil.

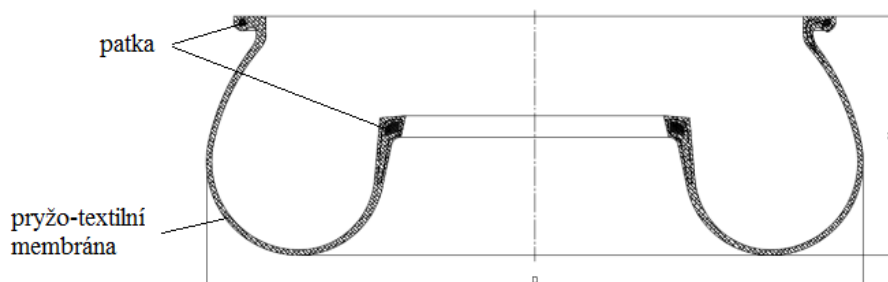


Obrázek 16 - 2-bodové uložení [10]

Jak lze vidět na obrázku 16, při dvoubodovém uložení je přísun vzduchu z hlavního vzdušníku regulován pro každou pružiny samostatně. Vzduchové pružiny jsou také vzájemně propojeny, avšak za použití diferenciálního ventilu. Takto zapojené pružiny jsou schopny reagovat na kolébání skříňe a odpadá tak nutnost použití torzního stabilizátoru.

3.2 Vzduchové pružiny

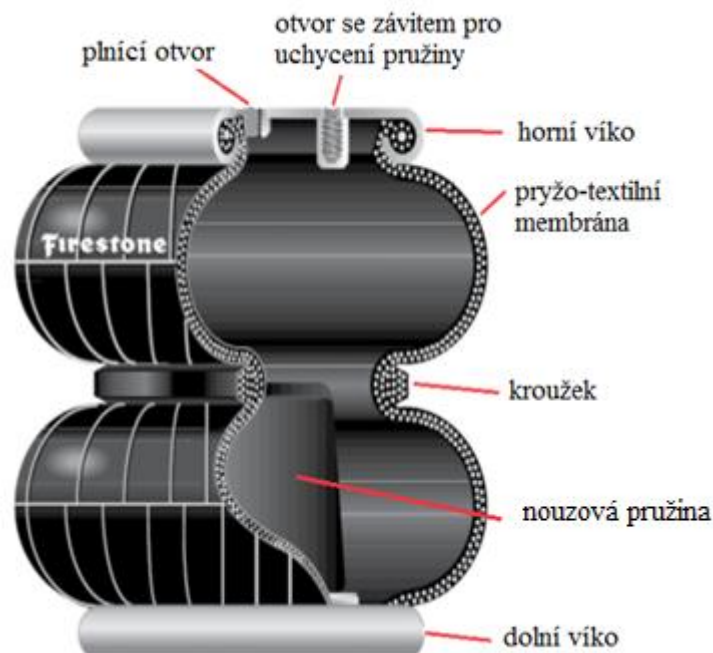
Jak už název napovídá, vzduchové pružiny využívají jako pracovní médium stlačený vzduch. Základ těchto pružin tvoří pryžo-textilní měch, který je zpravidla z obou stran upnut do vík (místo druhého víka, může být měch upnut přímo k ploše vypruženého zařízení). Víka slouží také k upevnění pružiny k vypružené/nevypružené části zařízení. Jedno z vík je opatřeno plnicím otvorem, kudy je přiváděno pracovní médium. Součástí vzduchové pružiny bývá nouzová pružina, který v případě poruchy a ztráty tlaku v pružinách přebere funkci sekundárního vypružení pro nouzové dojetí. Zároveň se nouzová pružina, v některých provedeních pružin, podílí na vypružení i za normálního provozu, případně pouze při velkém okamžitém vypružení. [11]



Obrázek 17 - Základní části měchu [12]

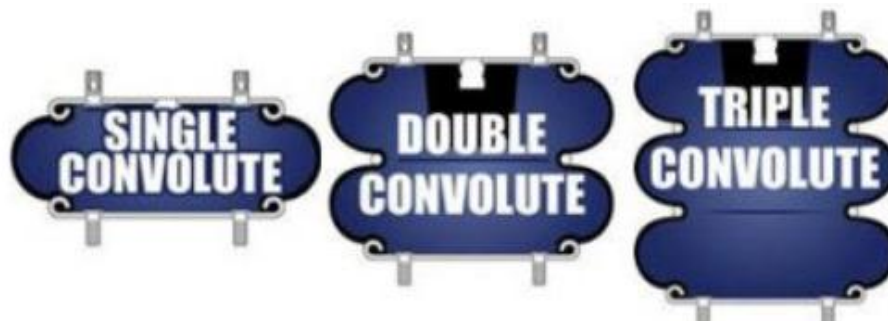
Dle tvaru měchu a způsobu jeho deformace při zatížení, se pružiny dělí na několik typů. K účelům sekundárního vypružení se používají zejména pružiny typu *rolling lobe* (membránové) popřípadě pružiny typu *convoluted* (vlnovcové). [11]

3.2.1. Vlncová pružina (convoluted air spring)



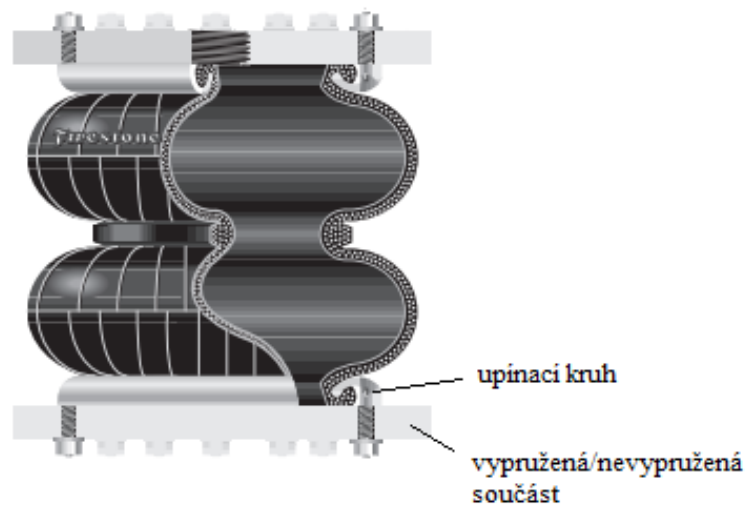
Obrázek 18 - Vlncová pružina [11]

Jednoduchá pružina s jednou vlnou je tvořena pryžo-textilní membránou upnutou do vík. Pro pružiny větších průměrů je běžné upnutí patek membrány přímo k součásti pomocí upínacích kruhů (viz. Obrázek 20).



Obrázek 19 – Výškové varianty vlncových pružin [13]

Zvyšováním počtu vln, získáváme dvojitou a trojitou vlnovcovou pružinu. Pružiny s větším počtem vln se běžně nevyrábějí. Jednotlivé vlny jsou od sebe odděleny ocelovými nebo hliníkovými kroužky, které jsou buďto na membránu navlečeny nebo jsou již z výroby zalisovány přímo do membrány. Význam kroužků je ve zvýšení boční tuhosti pružiny, která s rostoucí výškou pružiny klesá. [14]

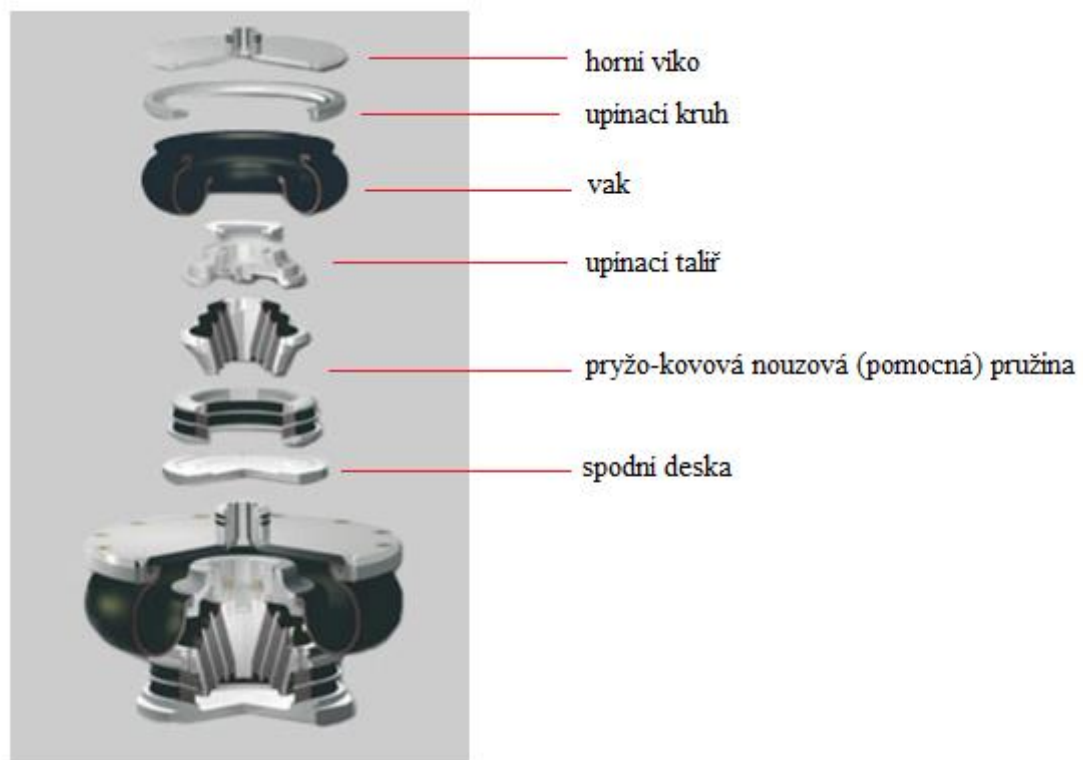


Obrázek 20 - Varianta upnutí membrány vlnovcové pružiny [14]

Vlnovcové pružiny nejsou vhodné k namáhání v radiálním směru a proto se jako sekundární vypružení kolejových vozidel nepoužívají.

3.2.2. Vaková pružina (rolling lobe air spring)

Tento typ pružin je nejpoužívanější pro vypružení kolejových vozidel. U tohoto typu pružiny je jedno z vík nahrazeno pístem, který se do měchu při jejím stlačení vtláčuje a membrána se na píst nabaluje. U většiny moderních vzduchových pružin pro kolejová vozidla je však klasický píst nahrazen tvarem nouzové pružiny.

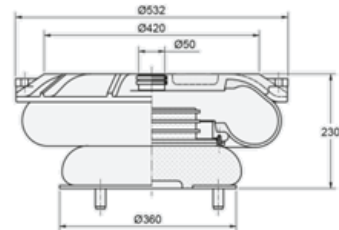


Obrázek 21 - Pružina typu Rolling lobe [15]

Každý výrobce nabízí pružinu v několika variantách, lišících se ve tvaru pístu (respektive tvaru kolem kterého se nabaluje vak), ve tvaru horního víka, v použité nouzové pružině nebo je membrána například přepásána. Tím mění výslednou charakteristiku celé vzduchové pružiny.



Obrázek 23 - Pružina (Contitech) [15]

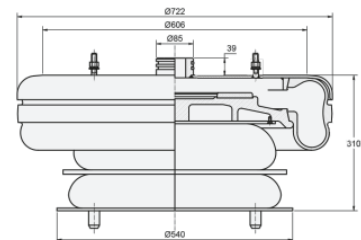


Obrázek 22 - Pružina (výrobce Trelleborg) [15]

Na obrázcích 22 a 23 jsou znázorněny vzduchové pružiny typu rolling lobe od různých výrobců. Jsou vybaveny podobnými nouzovými pryžo-kovovými pružinami. Jsou určeny pro bezkolébkové podvozky a svými rozměry jsou vhodné pro aplikaci právě na nízkopodlažní tramvaje, kde je nedostatek prostoru.



Obrázek 25 - Pružina s vedením (Contitech) [15]



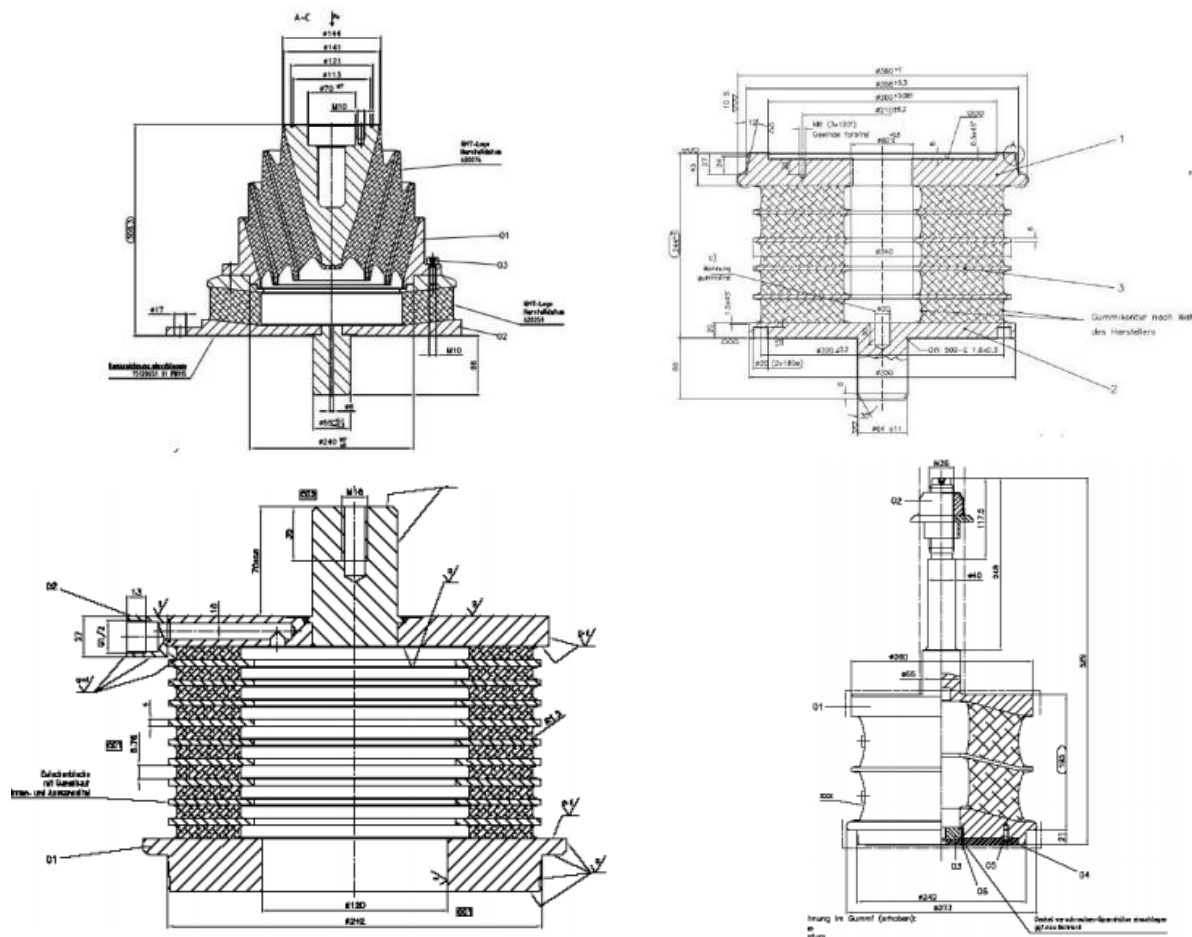
Obrázek 24 - Přepásaná pružina (Trelleborg) [18]

Zvýšení maximálního možného axiálního zatížení pružiny lze dosáhnout například opatřením vaku vnějším vedením, viz obrázek 25. Vnější vedení má také vliv na radiální tuhost a chrání pryžo-textilní membránu proti okolním vlivům. Tato konstrukční varianta je vhodná pro nízkopodlažní podvozky tramvají. [15]

Podobné řešení od firmy Trelleborg je na obrázku 24, kde je částečné vnější vedení, doplněno přepásáním.

3.2.3. Nouzová pružina

V současnosti je nouzová pružina stále častěji nazývána pružinou pomocnou. Nepracuje totiž pouze v případě poruchy, nýbrž se podílí na výsledné celkové charakteristice primárního vypružení za normálního provozu. Nouzová pružina je v takovýchto případech řazena se vzduchovým vakem sériově.



Obrázek 26 - Nouzové pružiny vyráběné firmou GMT [12]

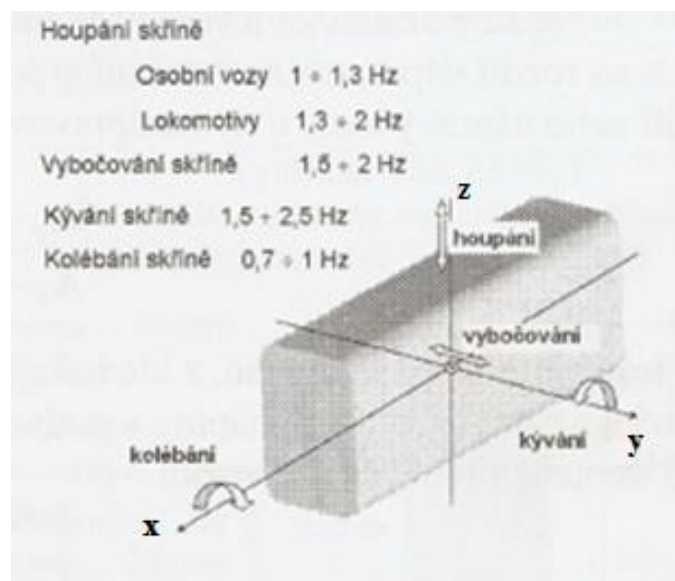
Kromě specifikace tuhosti v příslušných směrech pro celou pružinu se tyto vlastnosti uvádějí také pouze pro nouzovou pružinu, aby bylo možné odvodit chování vozidla v případě poruchy a z toho například určit maximální dovolenou rychlost pro nouzové dojetí.

Například vzduchová pružina, která má v normálním stavu axiální tuhost 666 N/mm a radiální 150 N/mm, bude mít v případě poruchy při práci pouze nouzové pružiny axiální tuhost 4243 N/mm a radiální 600 N/mm. Nouzové pružiny jsou tedy několikanásobně tužší než celková funkční vzduchová pružina. Přesto jsou schopny při snížené rychlosti absolvovat nouzové dojetí v plné zátěži s cestujícími.

3.3 Namáhání vzduchových pružin

Vzduchové pružiny zajišťují axiální a radiální vypružení, umožňují natáčení podvozku vůči skříně a tlumí kmitavé pohyby skříně vůči podvozku. Tyto pohyby skříně lze definovat jako:

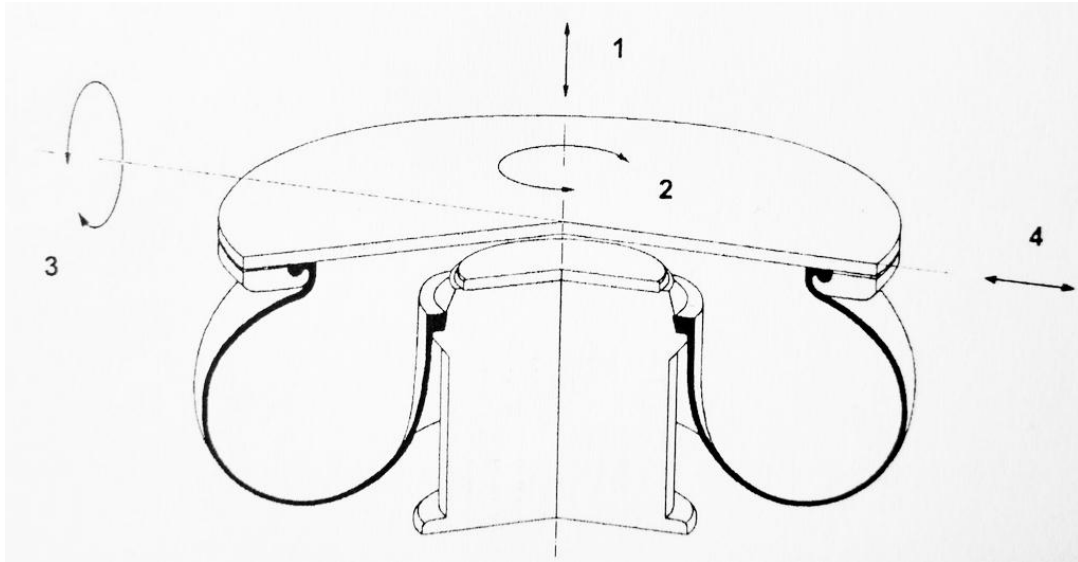
- Houpání – jedná se o kmitavý pohyb ve směru osy z (viz Obrázek 27). Při jízdě se vyskytuje neustále, vlivem nerovností trati. Pro osobní vozy se frekvence houpání musí pohybovat v rozmezí 1 až 1,3 Hz.
- Vybočování – je pohyb skříně ve směru osy y (viz Obrázek 27). Je generováno například odstředivou silou při průjezdu obloukem. Frekvence vybočování se musí pohybovat v rozsahu 1,5 až 2 Hz.
- Kolébání – jde o naklápění skříně kolem osy x (viz Obrázek 27). Frekvence kolébání se musí pohybovat v rozsahu 0,7 až 1 Hz.
- Kývání – jedná se o naklápění skříně kolem osy y (viz Obrázek 27). Vyskytuje se společně s houpáním a může být generováno například nerovnoměrným rozložením nákladu ve skříně nebo prudší decelerací. Frekvence kývání se musí pohybovat v rozsahu 1,5 až 2 Hz.



Obrázek 27 - Kmitavé pohyby skříně [16]

Nejsledovanější funkční charakteristikou vzduchových pružin je jejich tuhost. Existují tři základní tuhosti vzduchové pružiny: axiální tuhost, radiální tuhost a rotační tuhost. Každá z tuhostí je definována jednak při konstantní rychlosti a poté při sinusovém pohybu. Může být také kuželovitá tuhost, měřená kolem každé radiální osy membrány, ta se však v běžné praxi neuvádí. [17]

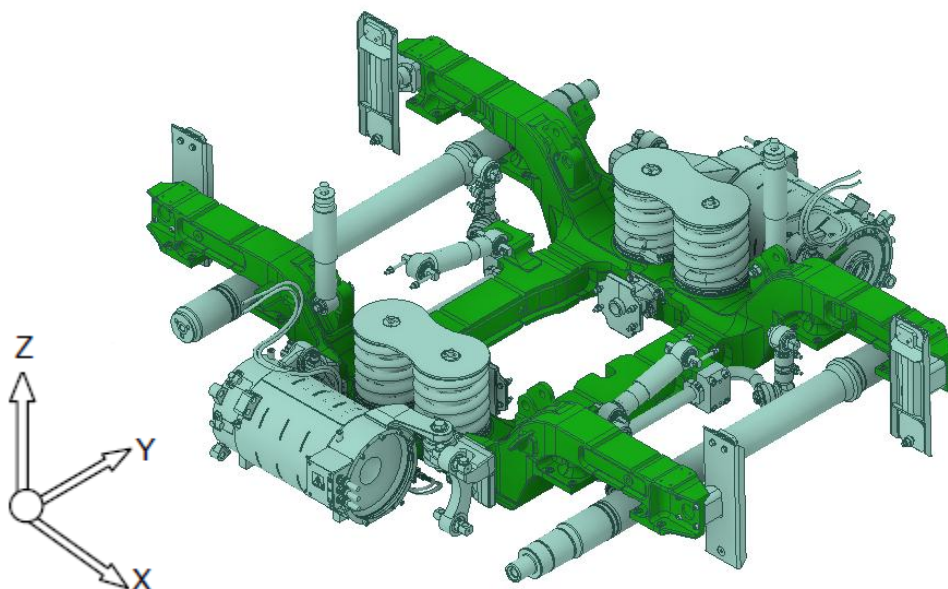
Na obrázku níže jsou znázorněny tuhosti - axiální (1), rotační (2), kuželová (3) a tuhost radiální (4).



Obrázek 28 - Definované tuhosti membrány [17]

4 Uvažované konstrukční varianty

V úvahu připadá několik konstrukčních variant adaptace podvozku 26T, lišících se zejména v počtu a umístění vzduchových pružin. Jednotlivé varianty jsou zhodnoceny a obodovány z hlediska zachování nízké podlahy, rozsahu konstrukčních změn při modifikaci podvozku a spodní části skříně, z ekonomického hlediska a jízdních vlastností (zejména kolébání skříně).



Obrázek 29 - Podvozek s původním konvenčním vypružením

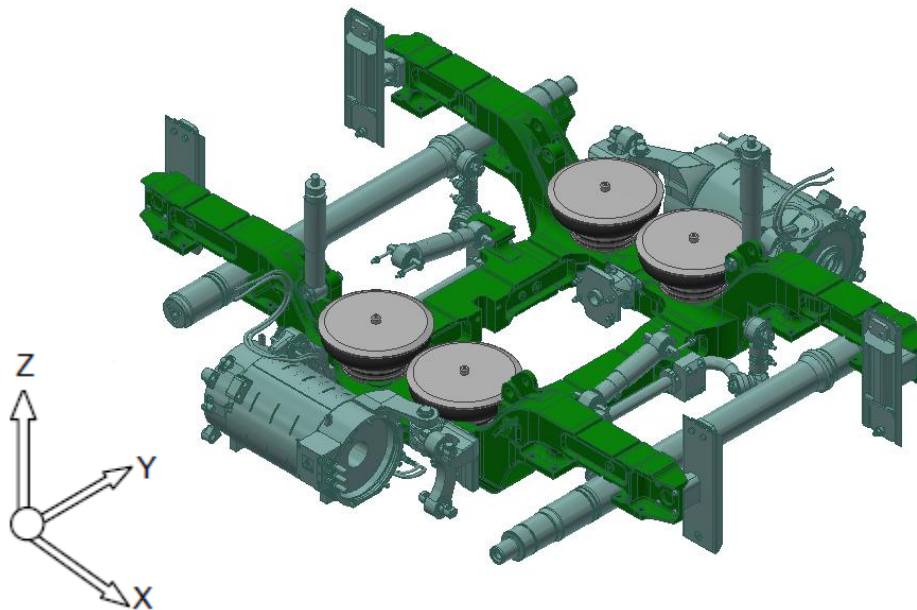
4.1 Varianta se čtyřma pružinami (A)

U varianty A zůstal zachován koncept dvou paralelních pružin na každém podélníku. Takovéto uspořádání vzduchových pružin se používá na jakobsových podvozcích. Pro vypružení klasického podvozku ztrácí nahrazení jedné pružiny dvěma paralelními význam. Použitím dvou pružin menšího průměru sice uspoříme místo v příčném směru, ale o to narostou nároky na prostor ve směru podélném a potřebný zástavbový prostor je ve výsledku větší.

Pro zadané zatížení není v katalogích výrobců odpovídající velikost vakové pružiny. Běžně nebývají konstruovány na tak malé zatížení a i nejmenší sériově vyráběná pružina je značně předimenzovaná. Přesný rozměr pružin by bylo nutné poptat u výrobce. Pro potřeby posouzení této konstrukční varianty jsem odhadl přibližnou velikost vzduchových pružin. I přes velice optimistickou úvahu ohledně velikosti pružin, by se zástavbový prostor v podélném směru musel zvětšit min. o 150 mm.

Takový zásah do podvozku by znamenal zvětšení rozvoru, ovlivnil by uchycení a polohu motoru i převodovek a také posunutí vertikálních tlumičů. Větším úpravám by se nevyhnulo ani nadpodvozkové hnízdo, kde by bylo nutné vytvořit pro vzduchové pružiny prostor jak v příčném, tak podélném směru.

Jako výhodou tohoto konstrukčního řešení je možné uvažovat větší stabilitu skříně díky větší ložné ploše na pružinách v podélném směru. Tím se teoreticky zmenšuje tendence skříně k jejímu kývání.

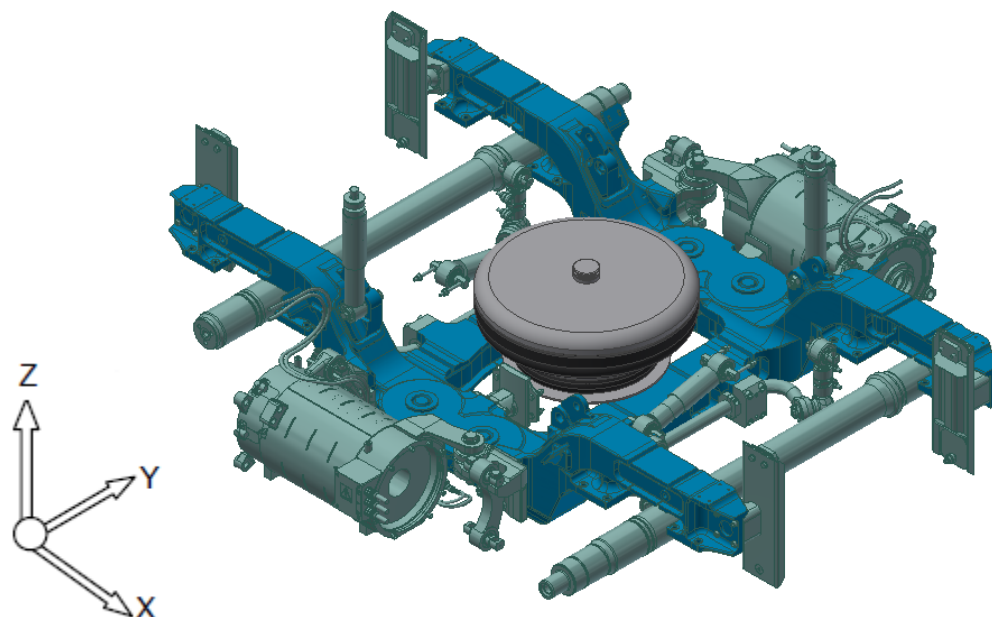


Obrázek 30 - Schéma varianty A

4.2 Varianta s jednou pružinou (B)

Varianta B se opírá o myšlenku použití pouze jedné pružiny na středu podvozku. Realizace této varianty by vyžadovala kompletní úpravu příčnicku podvozku a tím i změnu způsobu přenosu podélných sil mezi podvozkem a skříní tramvaje. Přenos svislých sil pouze středem podlahy také není ideální řešení z hlediska jejího dimenzování.

Použití jedné pružiny se navíc kompletně vylučuje se zachováním nízké podlahy. Samotná výška vzduchových pružin schopných přenést dané zatížení totiž začíná na 315 mm. Toto konstrukční provedení má také negativní vliv na stabilitu skříně z hlediska jejího kolébání a současné stabilizační prvky by nemohly zůstat zachovány.

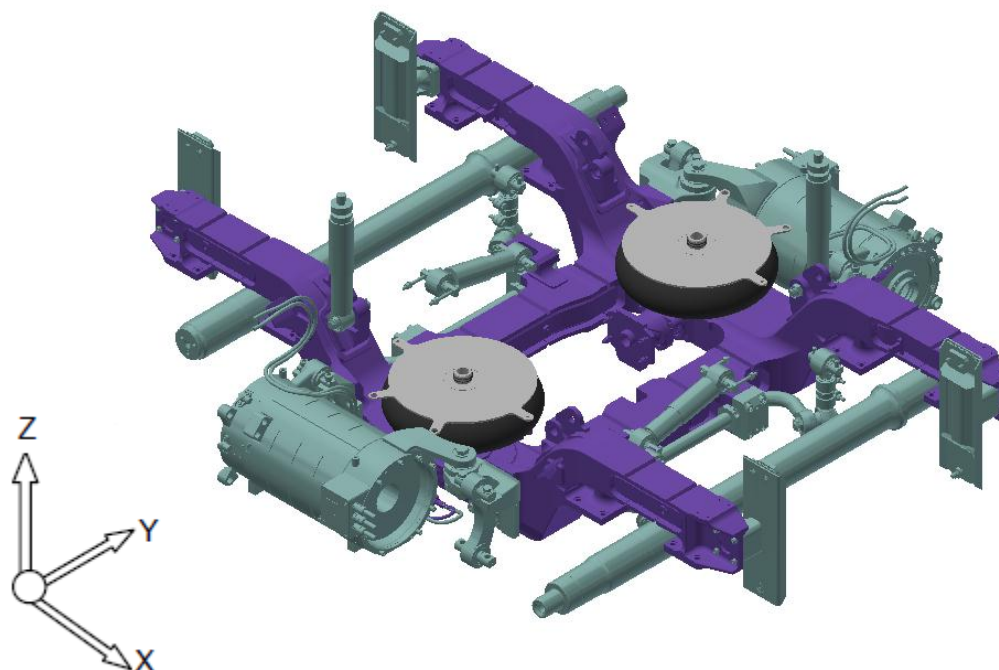


Obrázek 31 - Schéma varianty B

4.3 Varianta s dvěma pružinami na místě původních (C)

U varianty C jsou použity dvě vzduchové pružiny umístěné na podélnících. Pro takto umístěné pružiny je třeba vytvořit dostatek prostoru v příčném směru, v podélném je prostoru dostatek. Tato varianta nevyžaduje větší zásahy do rámu podvozku a je možné zachovat přenos podélných sil z podvozku na skříň tramvaje táhlem. Větší úpravy je potřeba udělat zejména u nadpodvozkového hnízda.

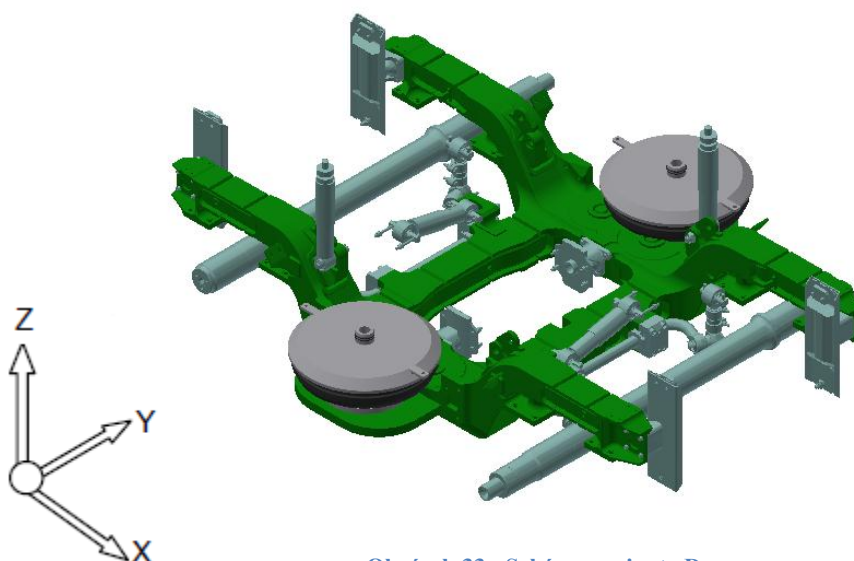
Tato záměna konvenčních pružin za vzduchové nemá výrazný vliv na stabilitu skříně, tudíž mohou být současné stabilizační prvky zachovány.



Obrázek 32 - Schéma varianty C

4.4 Varianta s dvěma pružinami vně rámu podvozku na balkónech (D)

U varianty D je umístění dvojice vzduchových pružin uvažováno vně podvozku na balkónech. Rozměr pružin by byl pak limitován pouze vztahnou linií obrysu vozidla. Vytvořením těchto balkónů se však kompletně změní konstrukce celého podvozku. Bylo by nutné kompletně změnit způsob pohonu. Vzhledem ke snaze o zachování nízké podlahy a využití vnější části podélníků balkony, se prakticky nabízí pouze individuální pohon každého kola. Zásahy do konstrukce rámu i skříně u této varianty by byly rozsáhlé a neekonomické. Navíc by se konstrukce velmi podobala podvozku 35T, což je v rozporu s požadavky zadavatele.



Obrázek 33 - Schéma varianty D

4.5 Zhodnocení variant

Z uvedených variant je třeba vybrat tu nejvhodnější, která bude v další části práce rozpracována. Pro hodnocení jsou stanoveny konstrukční požadavky, které mohou být jednotlivými variantami ovlivněny. Míra splnění těchto požadavků je vyjádřena bodovým ohodnocením od jedné do pěti, přičemž 5 je nejlepší. Varianta s největším počtem bodů bude dále rozpracována. Hodnocené konstrukční požadavky byly zvoleny po konzultaci se zadavatelem a vedoucím práce.

Konstrukční požadavky	Varianty			
	A	B	C	D
Nízká podlaha	4	1	4	5
Zachování původních komponent podvozku	3	2	4	1
Ekonomická náročnost	2	1	3	1
Jízdní vlastnosti	3	1	4	5
Celkem	12	5	15	12

Tabulka 7- Zhodnocení variant

Nejvyšší počet bodů získala varianta C, tudíž bude dále v práci rozpracována.

5 Volba pružiny

5.1 Zatížení podvozku a jeho pohyby

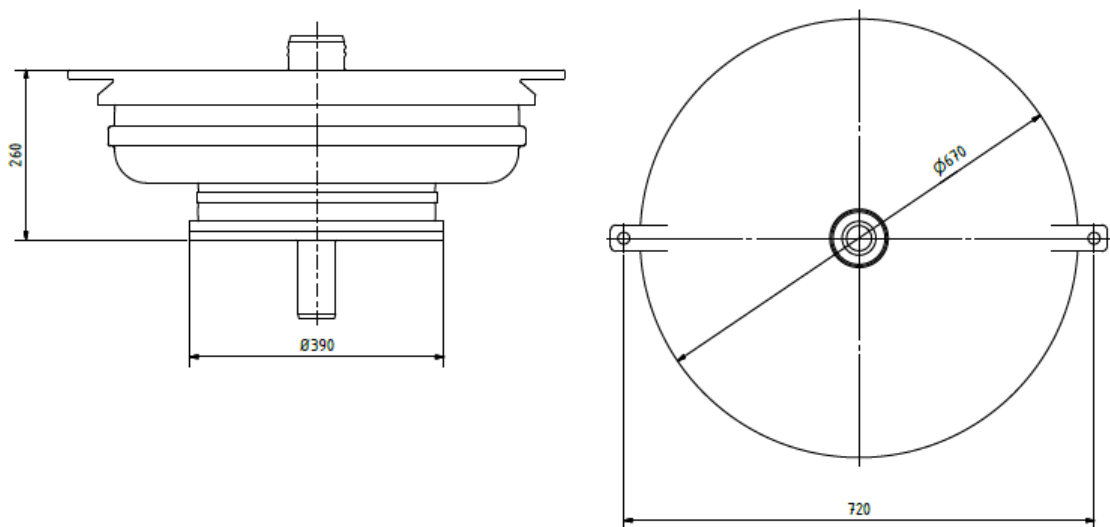
K určení pružiny je nezbytné znát maximální zatížení na nápravu a mimo jiné také pohyby podvozku vůči skříni. Níže uvedené parametry jsou z konvenčně vypruženého neotočného podvozku 26T, který mám ve své diplomové práci posoudit z hlediska vhodnosti jeho adaptace pro vypružení vzduchové. Níže uvedené vůle a pohyby jsou dány konstrukcí rámu podvozku a jeho spojením se skříní.

Parametr	Hodnota
Maximální zatížení na nápravu	12,5 [t]
Uvažované axiální zatížení pružiny (po odečtení nevypružených a jednou vypružených hmotností)	10,5 [t]
Příčná vůle na nárážkách na středu podvozku	15 [mm]
Příčná vůle na nárážkách na koncích podvozku	26 [mm]
Podélný pohyb podvozku	3 [mm]

Tabulka 8 - Parametry podvozku 26T

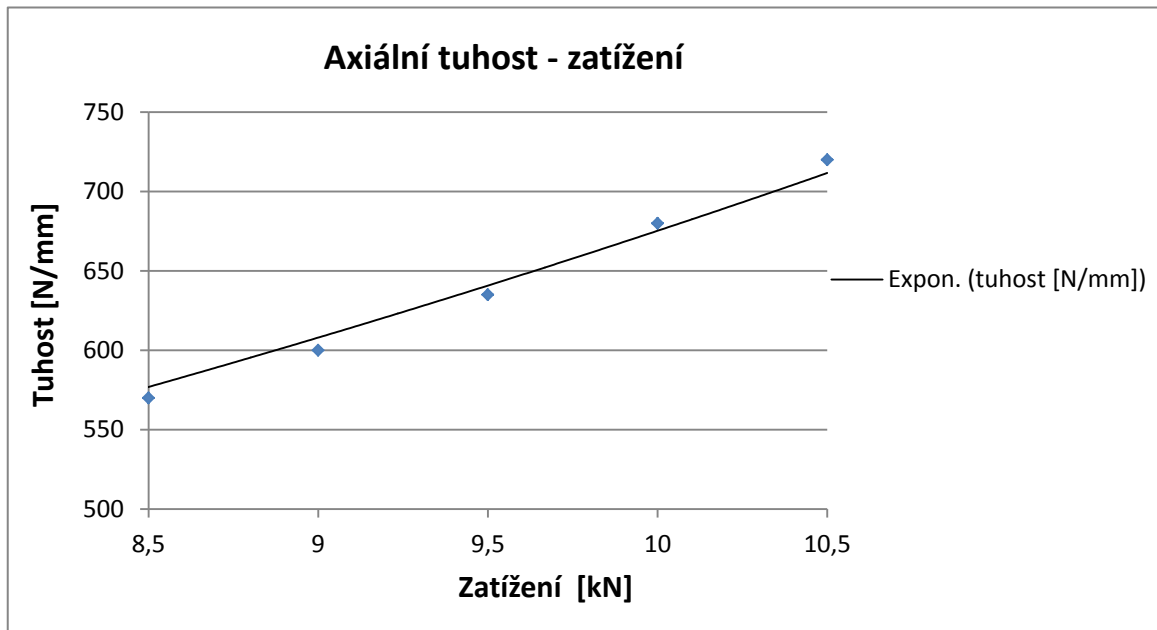
5.2 Volba pružiny

Návrh vzduchového vypružení je velice složitá a komplexní záležitost. Pro potřeby mé práce mi byly poskytnuty podklady od výrobců vzduchových pružin, které firma získala při návrhu podvozku 35T. Díky těmto podkladům jsem byl schopen určit přibližný tvar a velikost vzduchových pružin vyhovujících mému zadání. Stejně tak bylo možné odvodit očekávané charakteristiky vypružení.



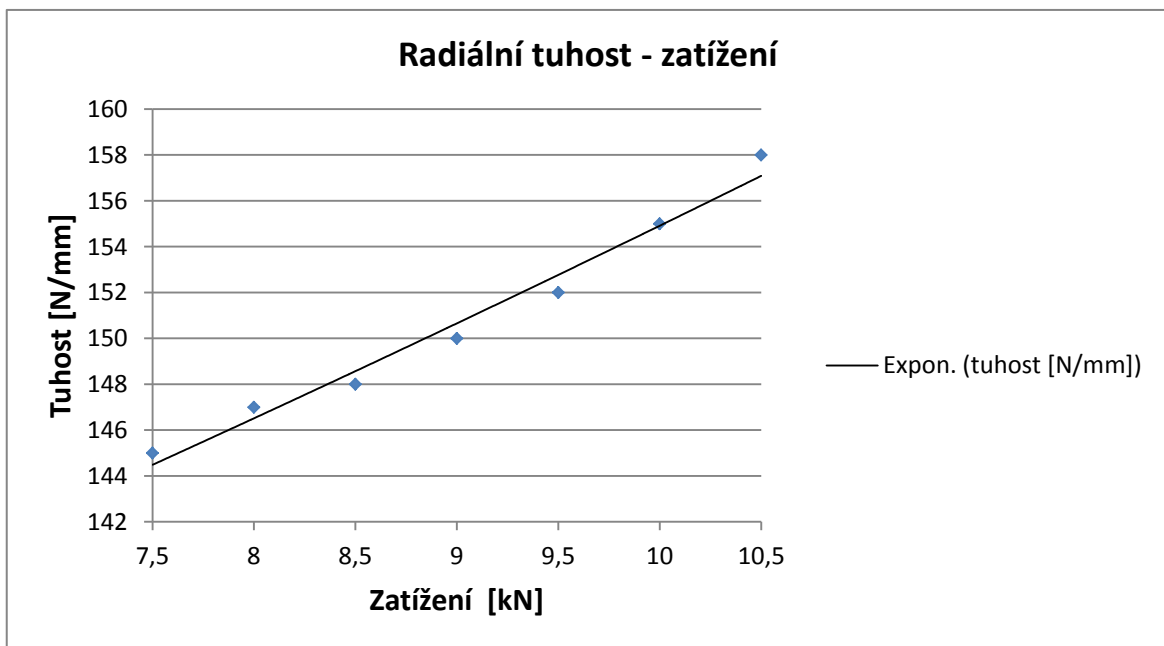
Obrázek 34 - Základní rozměry vzduchové pružiny pro 10,5 tuny

5.2.1. Tuhosti vzduchové pružiny



Graf 1 - Závislost axiální tuhosti na zatížení

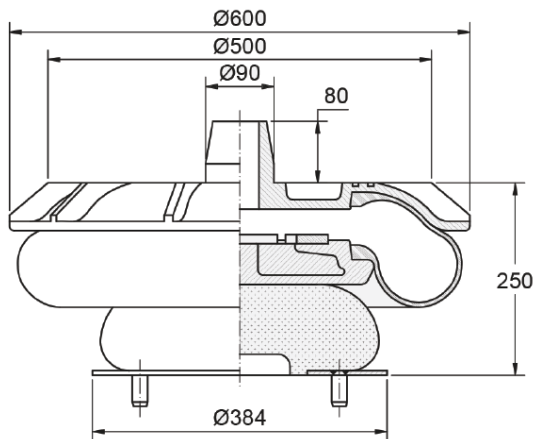
Grafem 1 je proložena exponenciální spojnice trendu, která znázorňuje očekávané hodnoty tuhosti při různém zatížení. Při změně statického zatížení zůstává výška vzduchové pružiny, díky regulaci tlaku, konstantní. Vzduchové pružiny mají tedy pro každé zatížení vlastní charakteristiku (závislost síly působící na pružinu a její deformaci), která popisuje chování pružin při dynamickém propružení.



Graf 2 - Závislost radiální tuhosti na zatížení

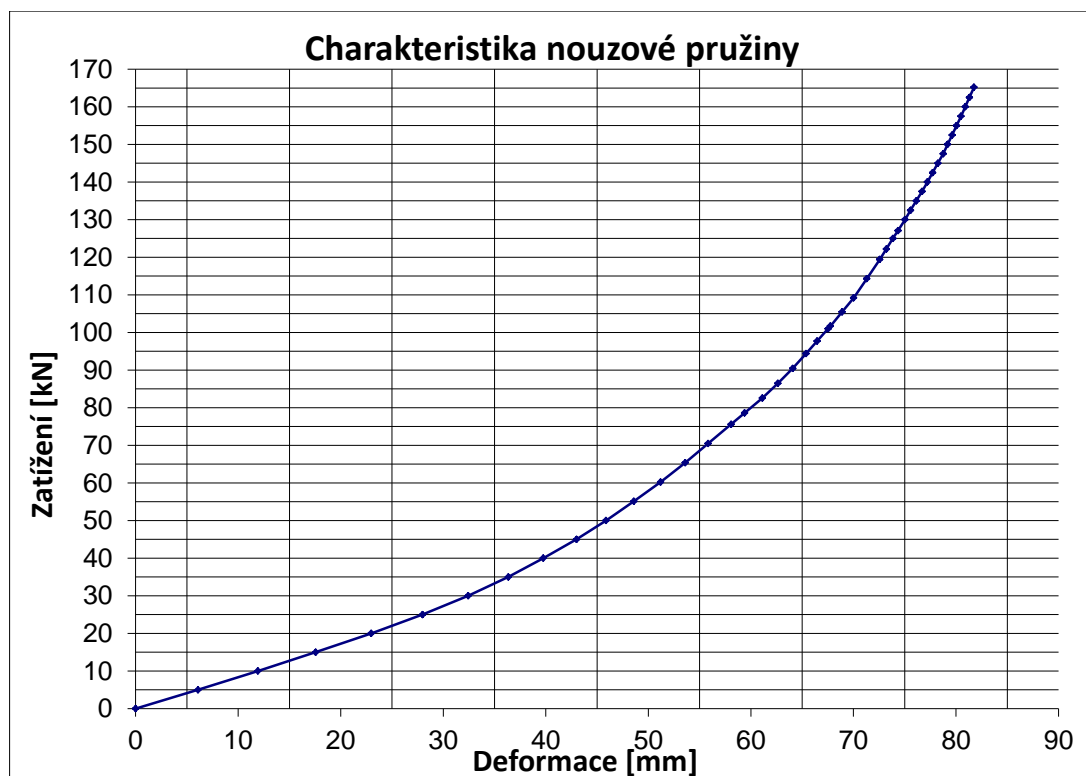
Stejně jako axiální tuhost, i radiální tuhost je závislá na zatížení. Z grafu 2 je však patrné, že tyto změny jsou velmi malé.

Podobných rozměrů, jako mnou navržená pružina, dosahuje také katalogová pružina od firmy Trelleborg (viz. následující obrázek). Tato pružina nabývá menších rozměrů než výše navržená, ale pro splnění všech uvedených parametrů je potřeba k pružině přiřadit přídavný vzdušník o objemu 20l a to vzhledem k zástavbovému prostoru není reálné.



Air Spring Assembly	45/1039
Vertical Load Capacity	105 kN
Vertical Frequency	<1.5 Hz
(Airspring System plus 20 litre added volume)	
Maximum Horizontal Displacement	± 120 mm
Working Height	250 mm
Air Pressure (at maximum load)	6.0 bar
Air-bag Ref.	LM9263 A
Series Spring Ref.	LM9373

Obrázek 35 - Pružina Trelleborg [18]



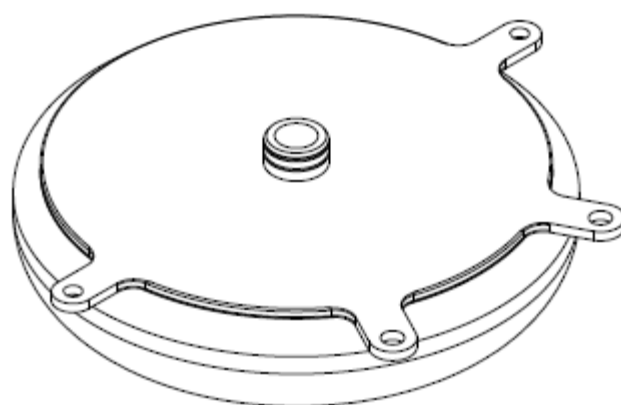
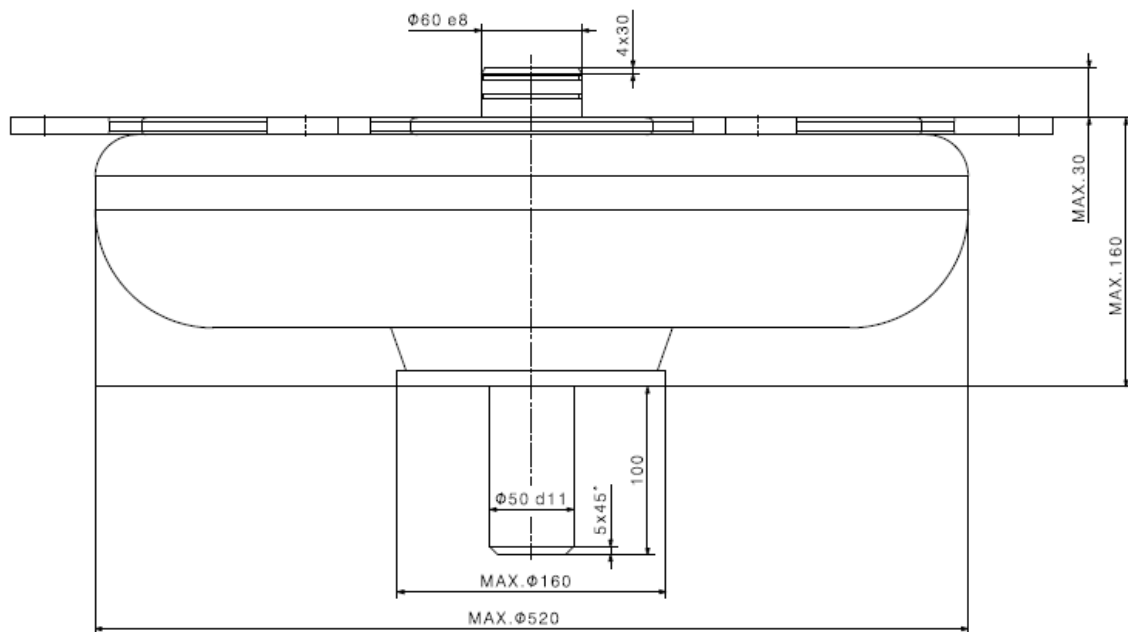
Graf 3 - Charakteristika nouzové pružiny

Na grafu 3 je znázorněna charakteristika nouzové pružiny. Pryžo-kovové elementy lze popsat klasickou závislostí zatížení na deformaci.

5.3 Zvolená pružina

Při hledání vhodné pružiny pro zvolenou variantu jsem vždy narazil na nedostatek potřebného prostoru pro její zástavbu. Katalogové pružiny byly příliš vysoké a vzhledem k jejich původnímu účelu (použití pro vlaky) také předimenzované.

Pružina použitá pro tramvaj 35T svými rozměry přesně vyhovovala dostupnému prostoru, avšak její maximální dovolené zatížení je pouze 9,4 [t], což je o 1,1 [t] méně než původně zadané. Nicméně po konzultaci se zadavatelem bylo původní uvažované zatížení sníženo tak, aby pružina z tramvaje 35T mohla být pro úpravu použita.

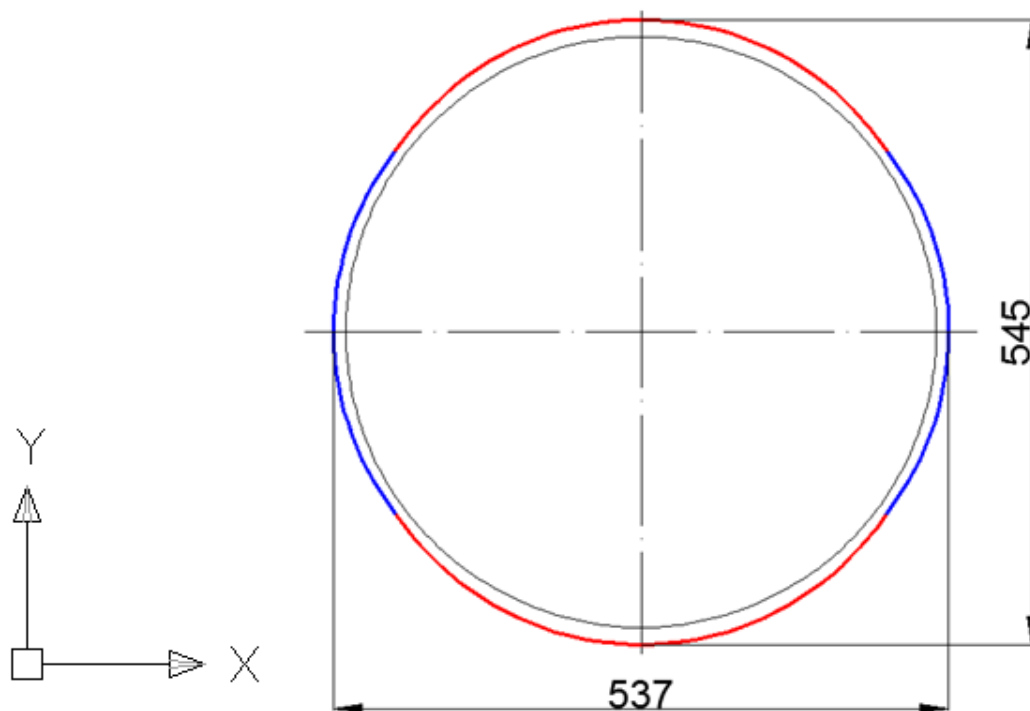


Obrázek 36 - Pružina z tramvaje 35T použitá pro přestavbu

5.4 Určení zástavbového prostoru pro pružiny

Vzhledem k výše uvedeným podélným a příčným pohybům, musí mít sekundární vypružení dostatek prostoru pro jejich uskutečnění. Jednoduchým kinematickým vyšetřením určíme půdorys potřebného prostoru pro pohyby pružiny. Umístění vzduchových pružin bylo uvažováno symetricky na středu podvozku a jejich osy jsou od sebe vzdáleny 1040 [mm].

Na obrázku níže je znázorněn rozsah pohybu pružiny při pohybu skříně vůči podvozku. Tenká černá kružnice představuje pružinu o průměru 515 [mm] v klidovém stavu. Červeně jsou znázorněny krajní polohy pružiny po vyčerpání příčné vůle a modře polohy pružiny po vyčerpání vůle v natočení skříně na koncových narážkách.

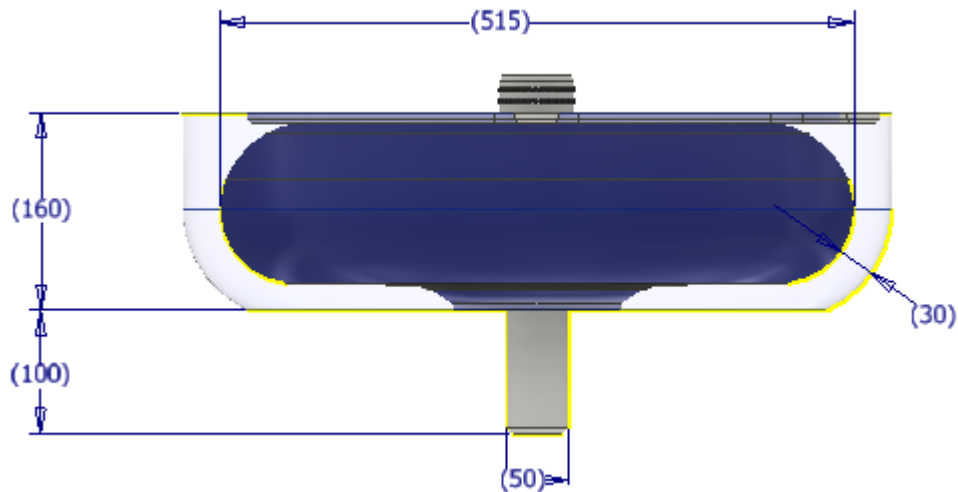


Obrázek 37 - Pohyby pružiny v horizontální rovině

6 Úpravy stávající konstrukce

Veškeré úpravy byly prováděny s maximální snahou o zachování původních částí rámu podvozku i skříně tramvaje, komponent k nim připojených a systémů jejich uchycení.

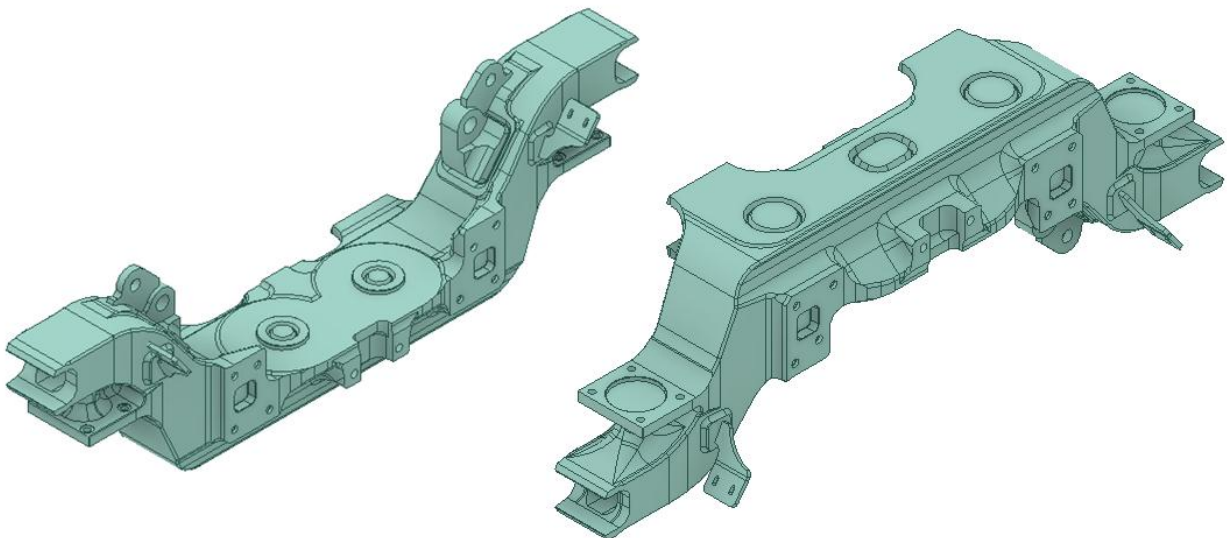
Úpravy byly prováděny pro zástavbu vzduchové pružiny z tramvaje 35T. Ve specifikaci pružiny byl uveden minimální zástavbový prostor pro pružinu (+30 [mm] na poloměru), se kterým jsem při návrhu pracoval.



Obrázek 38 - Zástavbový prostor potřebný pro pružinu

6.1 Modifikace podvozku

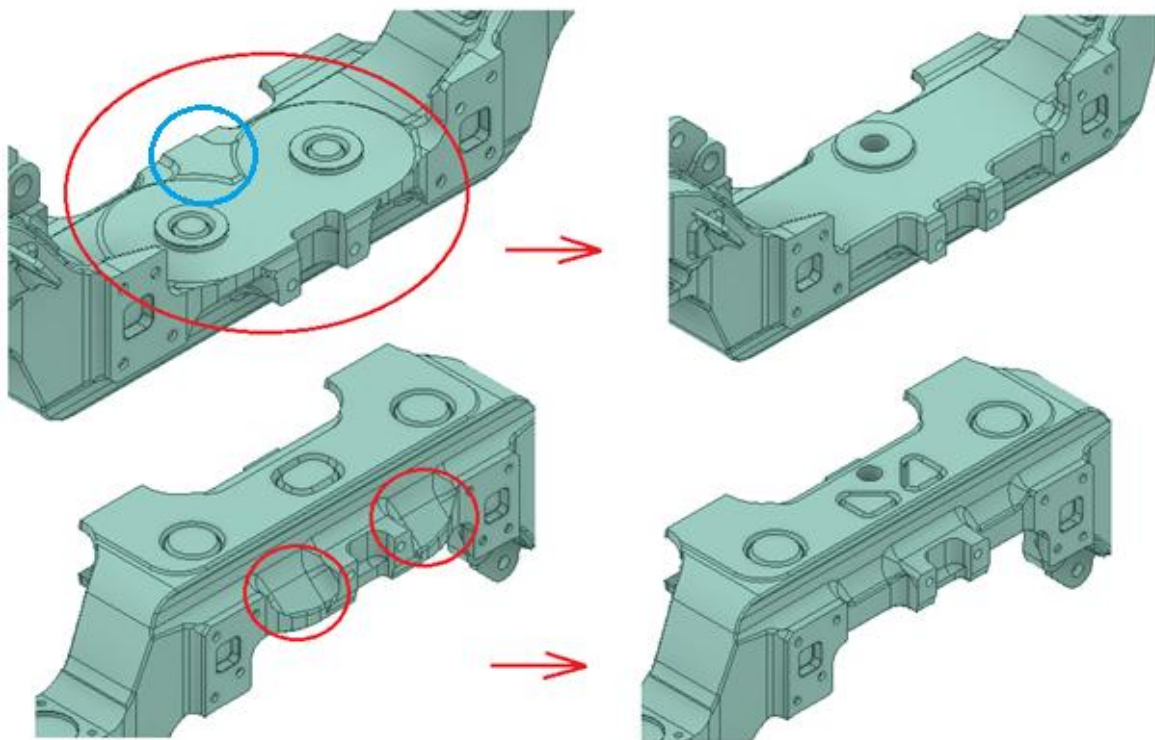
Bylo nutné vytvořit dostatek prostoru pro vzduchové pružiny a umožnit jejich uložení. Současně byl podélník odlehčen o již nepotřebné prvky.



Obrázek 39 - Původní část podélníku

6.1.1. Ložná plocha pružin

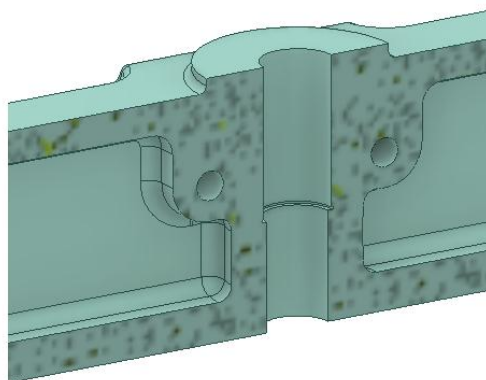
Ložná plocha pro pružiny byla zjednodušena a její rozšíření v horní části pro původní sekundární vypružení bylo odstraněno. Styková plocha s pružinou je vyvýšena o 10 [mm] a to z důvodu snížení možnosti styku pružinového měchu s podélníkem při malém propružení a současně se tím kompenzuje výškový rozdíl oproti původnímu vypružení. Odstraněna byla také plocha pro vertikální narážku (modře označena na Obrázku 39). Vertikální narážka také byla kompletně odstraněna, jelikož tuto funkci zastává sama vzduchová pružina.



Obrázek 40 - Změny na ložné ploše podélníků (vlevo původní)

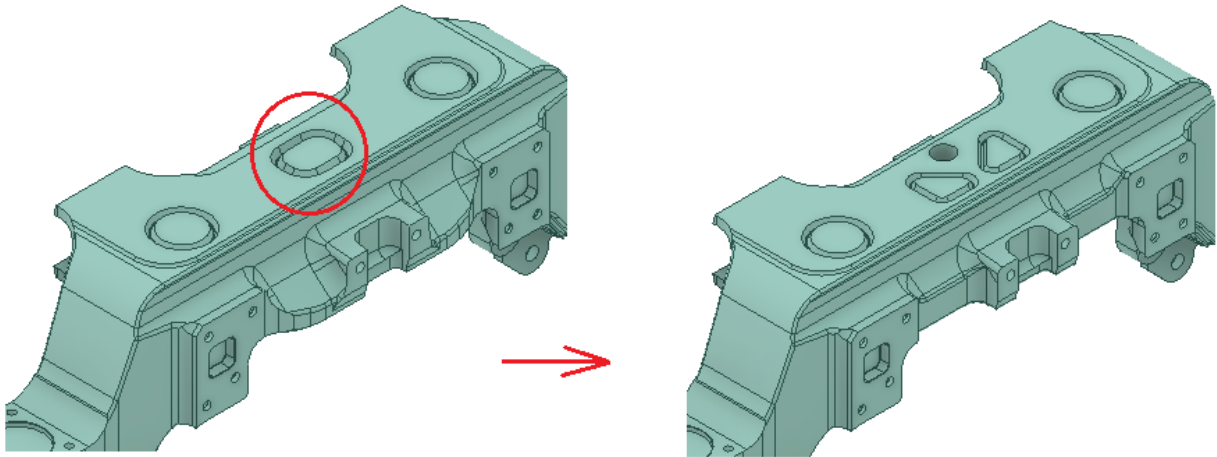
6.1.2. Uložení vzduchové pružiny

V podélníku bylo třeba vytvořit otvor pro čep vzduchové pružiny. Čep pružiny má průměr 50d11 [mm] a otvor pro něj je $\varnothing 50H11$ [mm] do hloubky 105 [mm]. Přestože se jedná o uložení s vůlí, je vhodné udělat otvor průchozí, aby byla usnadněna demontáž při případné korozi čepu.



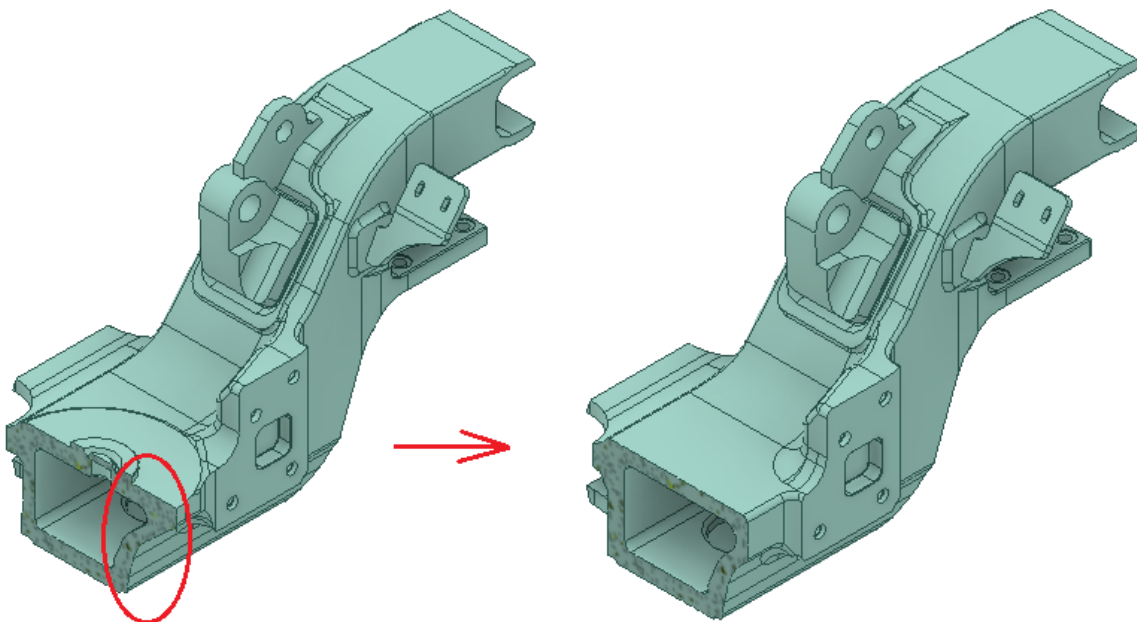
Obrázek 41 - Otvor pro čep pružiny

Otvor je vytvořen již v odlitku s průměrem 46 [mm]. V důsledku úpravy podélníku pro čep byla nutná také úprava umístění „patek jádra“ vytvářejícího dutinu v podélníku při jeho odlévání. Původní prostřední obdélníková patka na spodní straně podélníku byla nahrazena dvojicí trojúhelníkových patek. Otvory po nich jsou rovněž zavařeny.



Obrázek 42 - Úprava patek pro jádro odlitku

Adekvátně k výše zmíněným změnám byla také upravena tloušťka stěn podélníku se snahou o zachování konstantní tloušťky po celém průřezu.

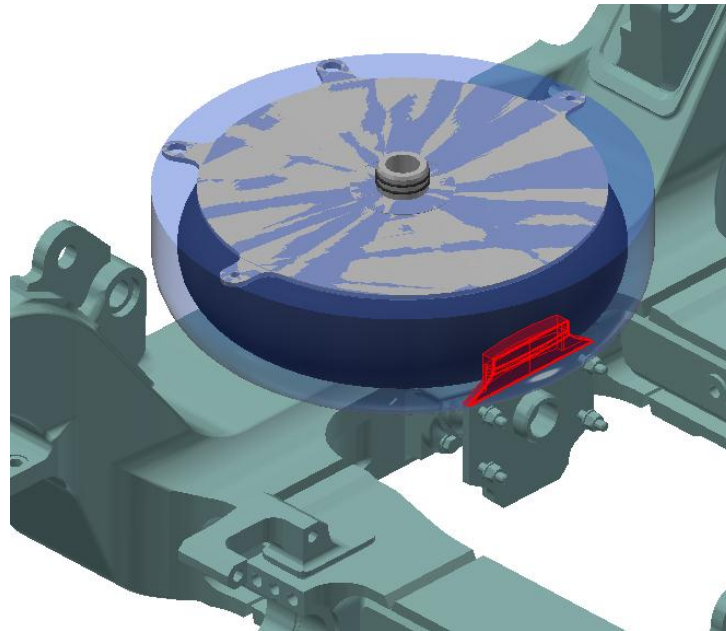


Obrázek 43 - Tloušťka podélníku

V příloze se nachází výkres odlitku podélníku, kde jsou změny patrné a okótované.

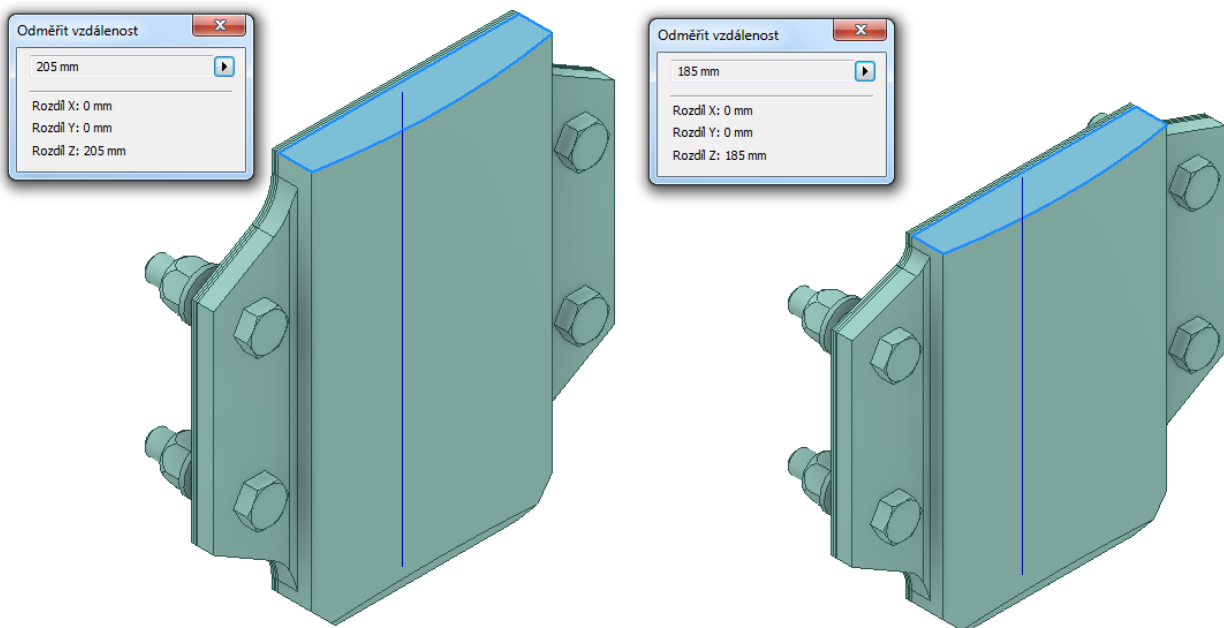
6.1.3. Modifikace příčných nárážek

V důsledku kolize vzduchové pružiny se systémem příčných nárážek musely být také náležitě upraveny.



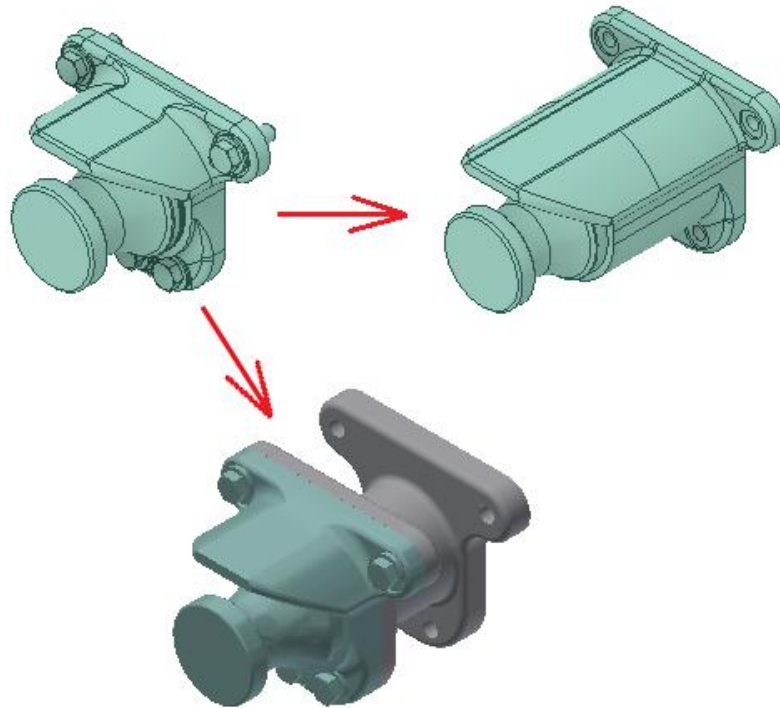
Obrázek 44 - Kolize příčné nárážky s pružinou a jejím zástavbovým prostorem

Část systému příčných nárážek na straně skříně vozidla byla snížena o 20 [mm]. O tuto hodnotu se totiž snížilo maximální možné propružení skříně vůči podvozku (z původních 55 [mm] na současných 35 [mm]). Horní část nárážky by proto zůstala nevyužita a jejím zkrácením se vytvořil prostor pro pružinu.



Obrázek 45 - Zkrácení příčných nárážek na straně skříně

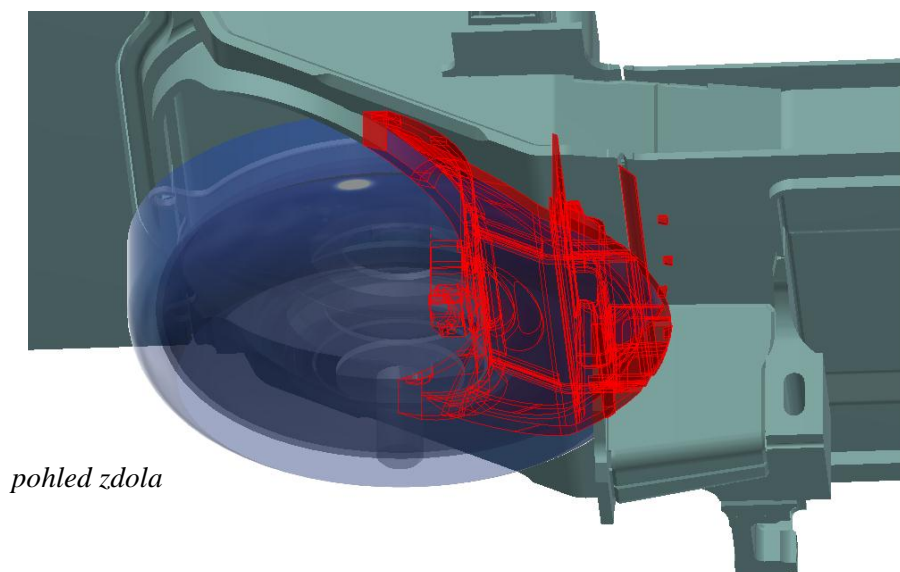
Současně byly narážky na straně podvozku prodlouženy o 90 [mm] směrem do středu podvozku, čímž se zaručil dostatek prostoru pro pružinu v příčném směru. Nabízejí se dvě varianty této úpravy. Vyrobením nové prodloužené varianty narážky nebo může být úprava provedena pomocí distanční vsuvky spojené pomocí šroubů se stávající narážkou, jak je znázorněno na obrázku níže.



Obrázek 46 - Možnosti úpravy příčné narážky

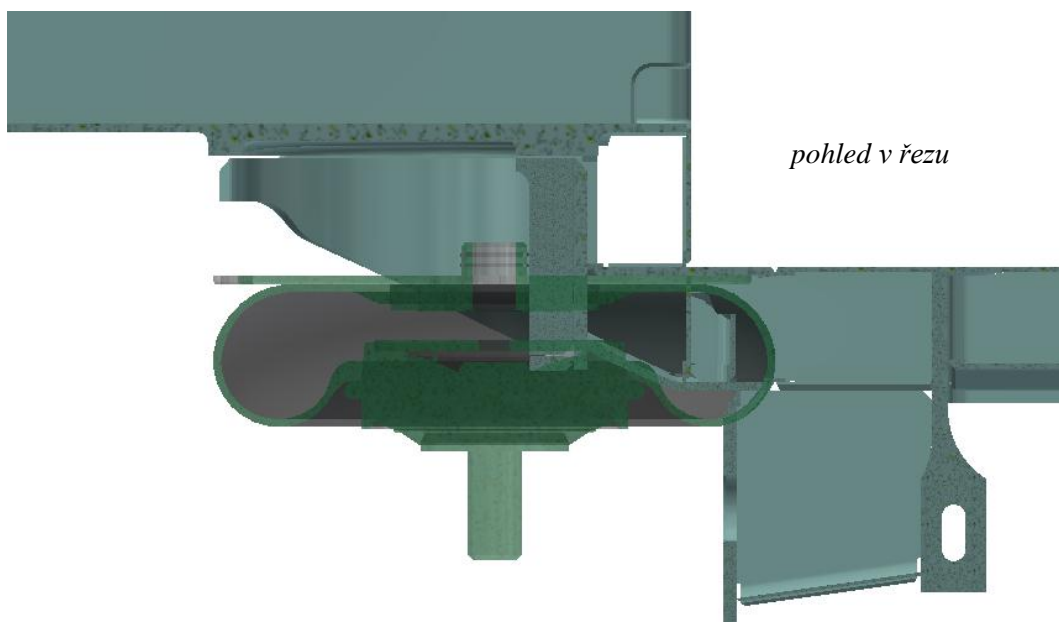
6.2 Modifikace spodní části skříně

Vzhledem k množství kolizí s původní konstrukcí skříně, zde byly úpravy poněkud rozsáhlejší.



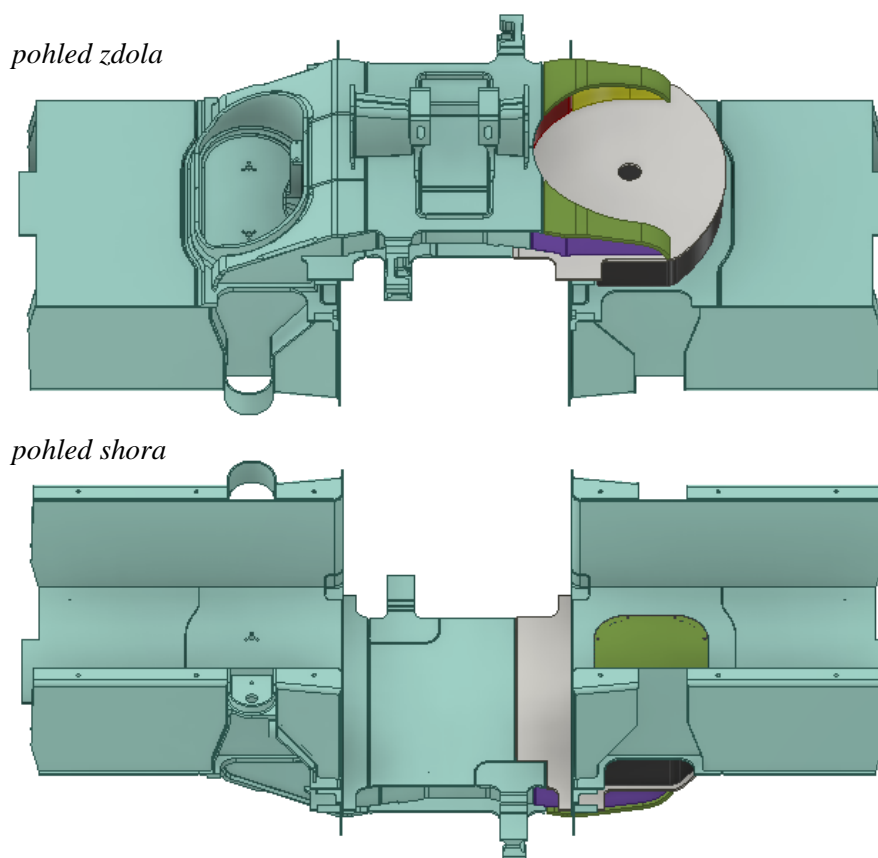
pohled zdola

Obrázek 47 - Kolize pružiny s původní skříní



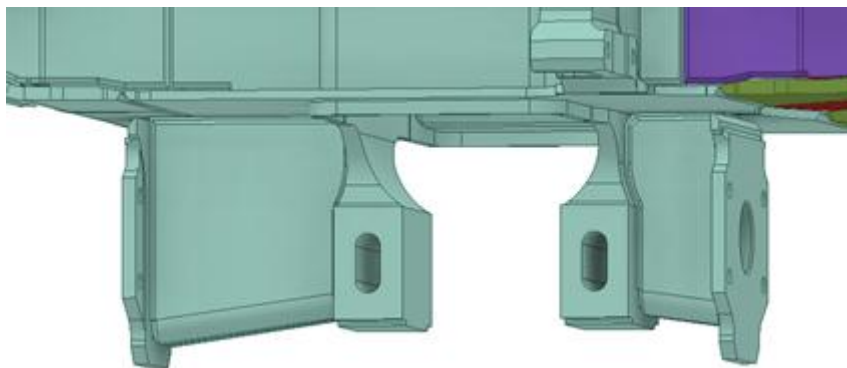
Obrázek 48 - Řez pružinou a původní skříní

Na obrázku výše je patrná pozice pružiny vůči podlaze. Výška pružiny je naštěstí dostatečně malá a vejde se pod podlahu. To bylo klíčové pro uskutečnění této varianty.



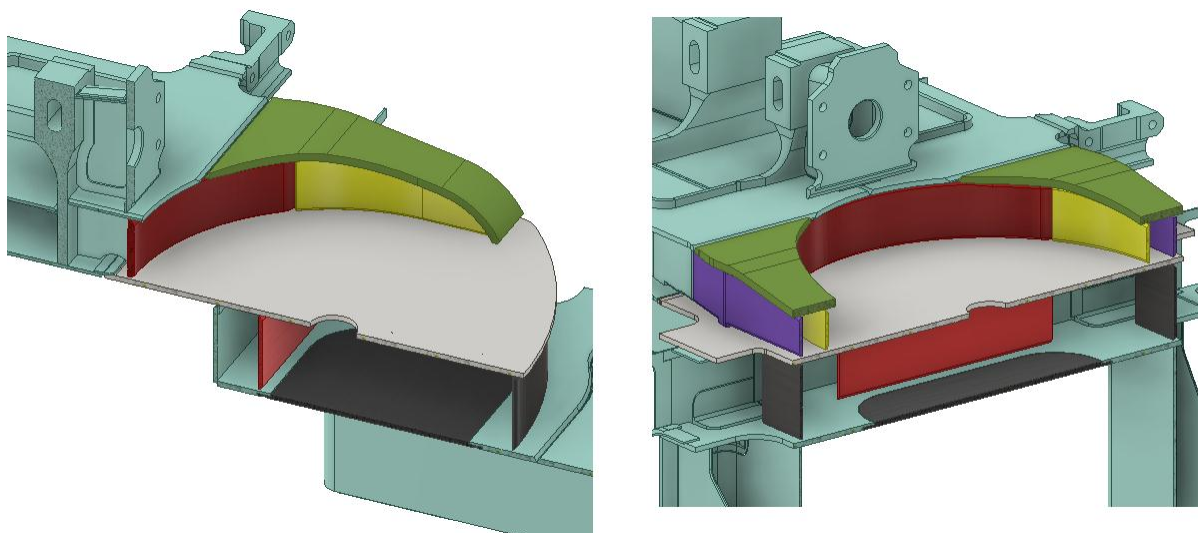
Obrázek 49 - Část skříně nad podvozkem (levá část původní, pravá modifikovaná)

Na předešlém obrázku je zobrazena část skříně nad podvozkem, jenž byla modifikována. Pro názornost je upravena pouze pravá polovina.



Obrázek 50 - Úprava konzole pro nárážku (vlevo původní)

V souladu s úpravami středové příčné nárážky, musela být také zkrácena její konzole. Ložná plocha pro pružinu byla kompletně upravena. Původní ložná plocha tvořená odlitkem byla nahrazena svařovanými plechy. Při úpravách bylo dbáno na technologičnost. Plechy jsou modelovány s úpravami pro svary ve stylu původní konstrukce.

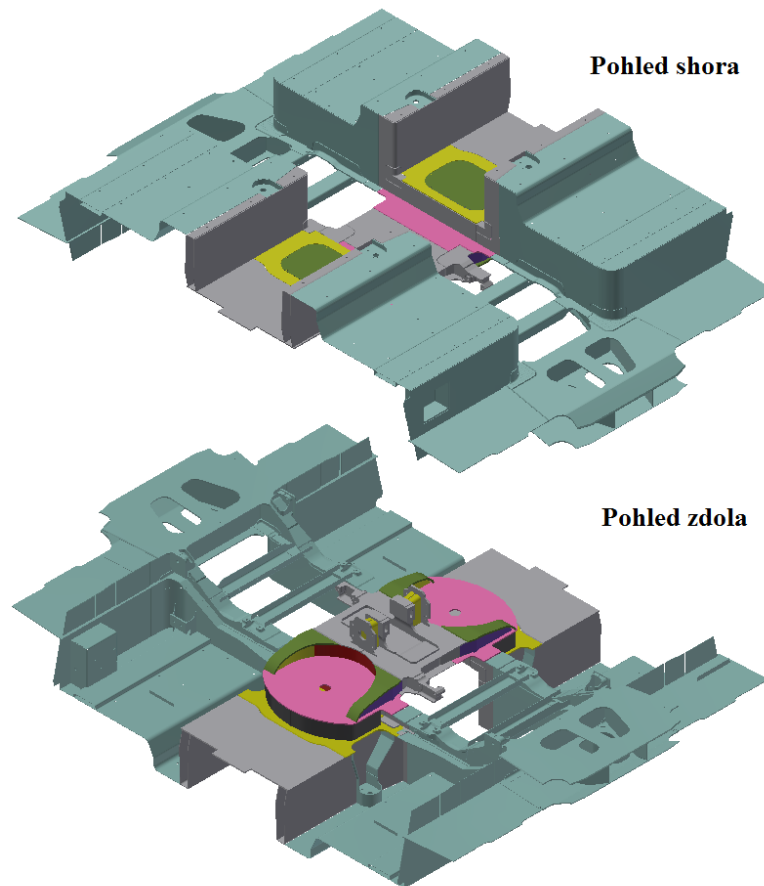


Obrázek 51 - Řezy upravenou částí skříně (pohled zdola)

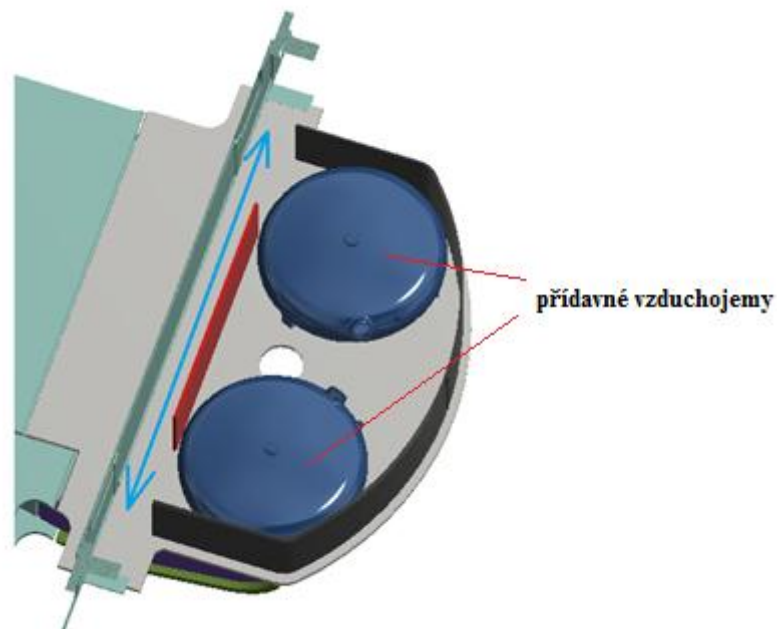
V části mezi ložnou plochou pružin a podlahou vznikl prostor pro umístění pomocných vzduchojemů. Prostor postačil na dvojici tlakových nádob typu „pancake“. V podélném směru skříně jsou ponechány uličky pro kabeláž a tlakové potrubí (znázorněno modrou šipkou na dalším obrázku).

Upravená část nadpodvozkového hnízda je stále 100% kompatibilní s původní skříní, jak je patrné na dalším obrázku.

Regulační ventil tlaku ve vzduchových pružinách je uvažován jeden pro obě vzduchové pružiny a jeho upevnění na skříní a rámu není v práci řešeno.



Obrázek 52 - Úpravy ve vztahu s původní skříní



Obrázek 53 - Prostor pro pomocné vzduchojemy (pohled shora skrz podlahu)

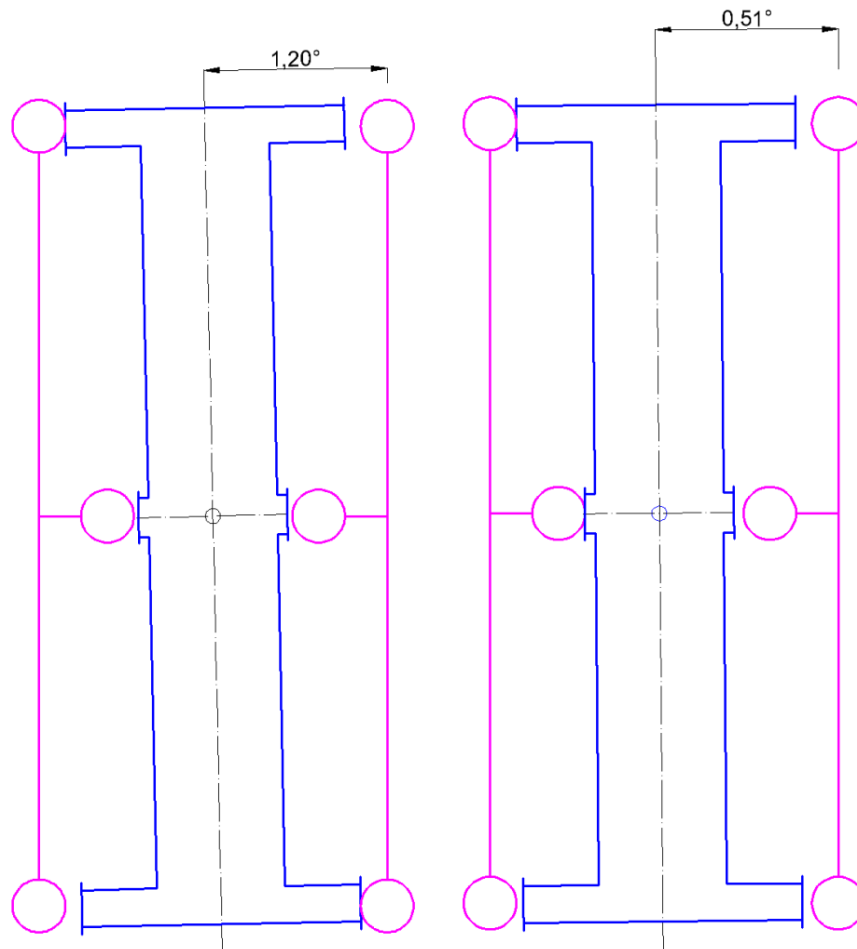
Zbývající komponenty pneumatického okruhu jako je kompresor a hlavní vzduchojem, budou umístěny s ostatní výzbrojí na střeše vozidla.

6.3 Kontrola kolizí

V sestavě spodní části skříně a podvozku byly simulovány jejich vzájemné pohyby a následná kontrola kolizí.

6.3.1. Vyšetření pohybů skříně vůči podvozku v horizontální rovině

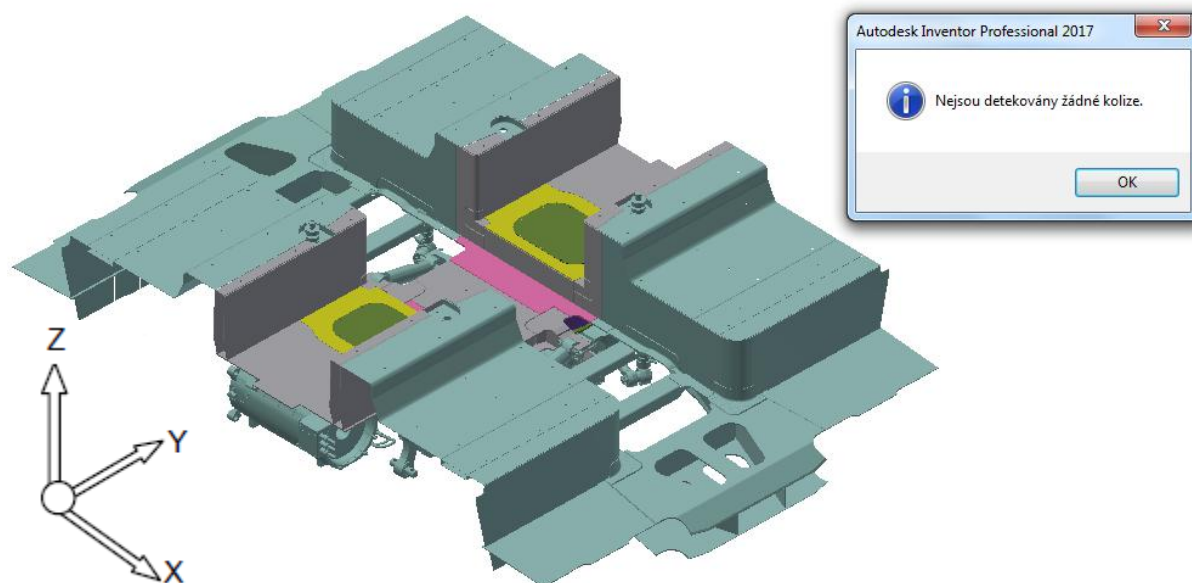
Na schématu níže jsou naznačeny pohyby skříně vůči podvozku. Vlevo je uvažováno natočení skříně až do vyčerpání vůle na narážkách na koncích podvozku. Vpravo je situace, kdy se nejprve vyčerpá vůle na středové narážce a natočení skříně je tím omezeno.



Obrázek 54 - Vyšetření pohybů skříně vůči podvozku (modrá skříně)

6.3.2. Aplikace pohybů na sestavu

Výše zjištěné úhly natočení skříně byly aplikovány na sestavu při maximálním propružení (výška pružiny pouze 125 [mm]) a také s kombinací vyčerpání podélné vůle v obou . Při těchto krajních polohách bylo zkontrolováno zda skřín s podvozkem nekoliduje.



Obrázek 55 - Natočená skříň vůči podvozku v jedné z krajních poloh

6.4 Vliv provedených úprav

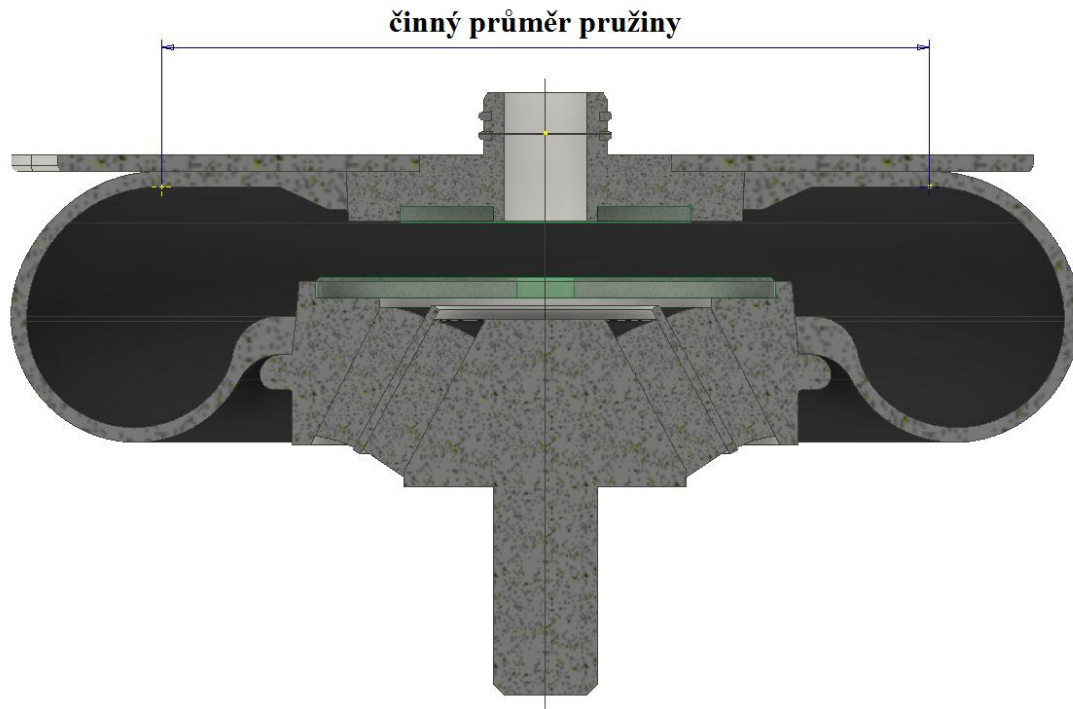
Úpravy provedené na rámu podvozku jsou v další kapitole ověřeny MKP výpočty. Očekává se, že se v okolí otvoru pro čep pružiny bude koncentrovat napětí.

Modifikované nadpodvozkové hnízdo je stále kompatibilní se zbytkem skříňe tramvaje. Nedostatek prostoru pro pomocné vzduchojemy, které se musejí nacházet v těsné blízkosti vzduchových pružin, umožnil použití pouze dvou malých vzduchojemů o celkovém objemu 10 [dm³]. Uvažované pružiny z tramvaje 35T však původně pracují s pomocnými vzdušníky o objemu 20 [dm³]. Výše uvedené skutečnosti zapříčiní zvýšení tuhosti pružení.

6.4.1. Změna tuhosti pružin

Níže uvedené vztahy pro výpočet mi byly poskytnuty vedoucím práce. Výpočet je idealizovaný a mohou do něj být vneseny nepřesnosti při určování objemů vzduchu v pružině a činných ploch.

Při stlačování pružiny se v ní zmenšuje objem vzduchu a zároveň se zvětšuje činná plocha pružiny tím jak se její měch deformuje. Tyto hodnoty byly zjištěny z modelu, kdy jsem si vytvořil model pružiny ve statické poloze a poté model stlačené o 10 [mm]. Pomocí programu Autodesk Inventor 2017 jsem odměřil objemy uvnitř měchu pružiny a jednotlivé činné průměry.



Obrázek 56 - Model pružiny v řezu s naznačeným činným průměrem

Hodnoty potřebné pro výpočet tuhosti:

Objem vzduchu v nestlačené pružině:	$V_0 = 0,015 [m^3]$
Objem vzduchu v stlačené pružině:	$V = 0,0138 [m^3]$
Objem vzduchu v pomocném vzduchojemu:	$V_{vz} = 0,01 [m^3]$
Stlačení pružiny:	$z = 10 [mm]$
Činný průměr nestlačené pružiny:	$D_0 = 370 [mm]$
Činný průměr stlačené pružiny:	$D = 378 [mm]$
Polytropický exponent:	$n = 1,3 [-]$
Normální atmosférický tlak:	$p_0 = 101325 [Pa]$
Vnitřní přetlak při maximálním zatížení:	$p = 760000 [Pa]$

Při stlačení pružiny o hodnotu "z", se původní činná plocha " S_0 ", zvětší na " S " a objem se zmenší z " V_0 " na " V ". Předpokládají se malé změny, které lze považovat za lineární:

$$S = S_0 + k_1 \cdot z \quad (1.1)$$

$$V = V_0 - k_2 \cdot z \quad (1.2)$$

Kde proměnné " k_1 " a " k_2 " lze určit jako:

$$k_1 = \frac{S - S_0}{z} \quad (1.3)$$

$$k_2 = \frac{V_0 - V}{z} \quad (1.4)$$

Při absolutním tlaku uvnitř měchu "p" a vnějším atmosférickém tlaku "p₀" je vnitřní přetlak: $\Delta p = p - p_0$. Tuhost pružiny je:

$$c = \frac{dF}{dz} = \frac{d(\Delta p \cdot S)}{dz} = \frac{d(\Delta p)}{dz} \cdot S + \frac{dS}{dz} \cdot \Delta p = \frac{dp}{dz} \cdot S + (p - p_0) \cdot \frac{dS}{dz} \rightarrow$$

$$\rightarrow c = \frac{dp}{dV} \cdot \frac{dV}{dS} \cdot S + (p - p_0) \cdot \frac{dS}{dz} \quad (1.5)$$

Při polytropické kompresi vzduchu ve vaku platí:

$$p \cdot V^n = p_0 \cdot V_0^n = konst. \rightarrow dp \cdot V^n + n \cdot p \cdot V^{n-1} \cdot dV = 0 \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{dp}{dV} = -n \cdot \frac{p}{V} \quad (1.6)$$

Rovnice (1.1), (1.2) a (1.6) dosazeny do (1.5):

$$c = -n \cdot \frac{p}{V} \cdot (-k_2) \cdot S + (p - p_0) \cdot k_1$$

$$c = S \cdot \frac{n \cdot p}{(V + V_{vz})} \cdot k_2 \cdot S + (p - p_0) \cdot k_1 \quad (1.7)$$

Vertikální tuhost pružiny je dána dosazením(1.3) a (1.4) do (1.7):

$$c = S \cdot \frac{n \cdot p}{(V + V_{vz})} \cdot \frac{V_0 - V}{z} \cdot S + (p - p_0) \cdot \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}}{z}$$

$$c = 0,11222 \cdot \frac{1,3 \cdot 760000}{(0,015 + 0,01)} \cdot \frac{0,015 - 0,0138}{0,01} \cdot 0,1122 + (760000 - 101325) \cdot$$

$$\cdot \frac{\frac{\pi \cdot 0,378^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,370^2}{4}}{0,01}$$

$$c \cong 818883,16 [N \cdot m^{-1}] \cong \mathbf{819[N \cdot mm^{-1}]}$$

Tento orientační výpočet byl aplikován i na pružinu s původním objemem přidavného vzduchojemu 20 [dm³]. Výsledkem byla zjištěna tuhost **673[N · mm⁻¹]** a výrobcem udávaná je **650[N · mm⁻¹]**. Výpočet tedy lze považovat dostatečně přesný a použitelný pro přibližnou představu o změně chování pružiny, při změně objemu přidavných vzduchojemů.

7 Zatížení rámu podvozku

Různé případy zatížení rámu podvozku lze obecně rozdělit na vnější (externí) a vnitřní (interní).

Vnější (externí) zatížení - je zatížení vyvolané samotnou jízdou vozidla po trati. Podvozek je zatížen hmotností neseného vozidla včetně užitečné zátěže, nerovnostmi koleje, jízdou v obloucích, zrychlováním a bržděním, nárazem vozu a drobným vykolejením.

Vnitřní (interní) zatížení – je zatížení způsobené přítomností a činností komponent na podvozku jako jsou motory, brzdy, tlumiče, torzní stabilizátory apod.

Interní zatížení je důležité zejména při návrhu konzol pro uchycení výše uvedených komponent. Jelikož se v tomto případě jedná o existující podvozek, kde je tato problematika již vyřešena, bude v práci počítáno pouze s externím zatížením. V některých zátěžných stavech jsou zanedbané komponenty podvozku nahrazeny součiniteli.

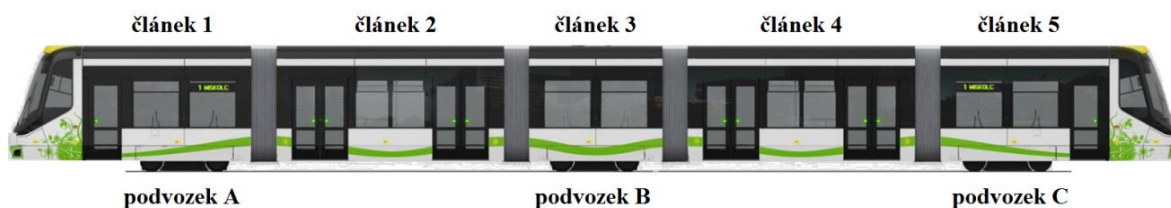
Síly působící na rám podvozku byly definovány pomocí normy prEN 13749, jež byla poskytnuta zadavatelem práce. Podvozky kolejových vozidel jsou zde řazeny do kategorií, dle kterých se pak určuje zatížení na ně působící. Tramvajové podvozky jsou zařazeny do kategorie B-IV.

Zátěžné síly jsou dále dělené na normální a výjimečné (mimořádné). Výjimečným zatížením je podvozek tramvaje zatížen jen několikrát za dobu jeho provozu. Napětí v těchto zátěžných stavech se může teoreticky přiblížit až k mezi kluzu materiálu, nesmí dojít k žádným trvalým deformacím po odlehčení a během zatížení nesmí být deformace tak velké, aby omezili funkci podvozku nebo některé jeho části.

Naopak normálnímu zatížení je podvozek vystaven po celou dobu provozu (zpravidla plánovaná na 30let). Pomocí těchto zatížení se prověřuje schopnost podvozku splnit svou funkci po plánovanou dobu bez únavové poruchy.

7.1 Hmotnostní rozbor

Zátěžné síly na rám vycházejí, mimo jiné, z hmotností na něj působících. Původní uvedené hmotnosti pocházejí z hmotnostního rozboru 5ti článkové (tří podvozkové) varianty tramvaje 26T, který mi firma dala k nahlédnutí.



Obrázek 57 - Schéma tramvaje 26T [19]

Největší podíl hmotnosti (37%) při výjimečném zatížení (plně obsazené vozidlo) připadá na prostřední podvozek B. Podvozek B je běžný, nicméně základní konstrukce rámu je totožná jako u podvozků trakčních.

	Prázdné vozidlo			Výjimečně zatížené vozidlo		
Hmotnost celého vozu [kg]	44730			69585		
Hmotnost bez podvozků [kg]	30993			55848		
Samotné výjimečné zatížení[kg]	-			24855		
Podvozek	A	B	C	A	B	C
Hmotnost podvozku [kg]	4983	3771	4983	4983	3771	4983
Hmotnost na podvozek [kg]	10796	9190	11006	17430	20736	17684
Hmotnost na jednu pružinu sekundárního vypružení [kg]	5398	4595	5503	8715	10368	8842

Tabulka 9 - Původní hmotnostní rozbor tramvaje 26T

Jak je patrné z tabulky 1, hmotnost na jednu pružinu sekundárního vypružení při výjimečném zatížení dosahuje u podvozku B hodnoty 10,368 [t], přičemž uvažované vzduchové pružiny z tramvaje 35T jsou konstruovány na maximální zatížení 9,4[t].

Při případné realizaci by tedy bylo potřeba snížit hodnotu výjimečného zatížení na podvozek B o 1936 [kg]. Toho lze dosáhnout snížením hmotnosti skříně (použitím jiných materiálů, zkrácením článků 2 a 4, apod.) nebo snížením výjimečného zatížení (snížit maximální počet cestujících).

Pro účely pevnostní analýzy rámu podvozku, je s ohledem na použité vzduchové pružiny, uvažována již snížená výjimečná hmotnost na podvozek a to $m_{vyj} = 18800$ [kg].

7.2 Mimořádné zátěžné stavy

Níže uvedené hodnoty tuhostí a hmotností jsou čerpány z podkladů poskytnutých zadavatelem práce.

Hodnoty potřebné pro výpočet zatížení:

Výjimečné zatížení na podvozek B:	$m_{vyj} = 18800$ [kg]
Hmotnost podvozku B:	$m_p = 3771$ [kg]
Počet podvozků:	$n_{pod} = 3$ [-]
Počet náprav na podvozek:	$n_n = 2$ [-]
Boční tuhost sekundárního vypružení:	$c_{ysek} = 255$ [N · mm ⁻¹]
Max. příčný pohyb sekundárního vypružení:	$y_{sek} = 15$ [mm]
Počet pružin sekundárního vypružení:	$n_p = 2$ [-]
Tuhost pružné části příčné narážky:	$c_{ynar} = 1156$ [N · mm ⁻¹]
Max. pohyb pružné části příčné narážky:	$y_{nar} = 9$ [mm]

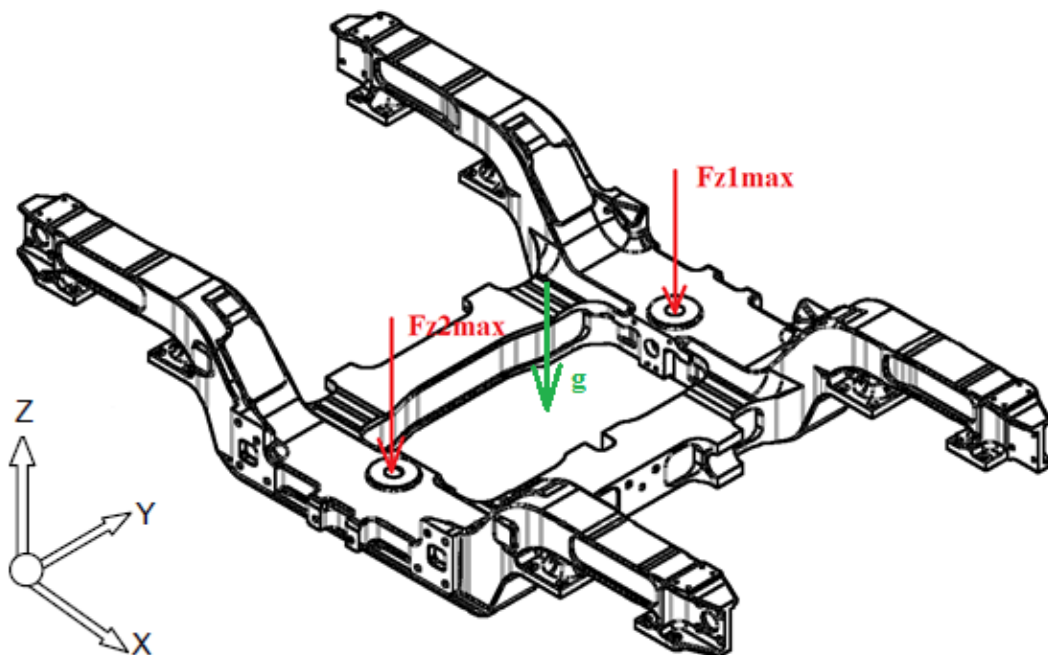
Příčná vzdálenost os primárního vypružení:	$s_p = 1150 [mm]$
Vzdálenost styčných kružnic kol:	$s = 1150 [mm]$
Rozvor podvozku:	$p = 1800 [mm]$
Tuhost primární pružiny ve svislém směru:	$c_{z,prim} = 2110 [N \cdot mm^{-1}]$
Hmotnost na podvozek C při prázdném vozidle:	$m_{prazd} = 11006 [kg]$
Gravitační zrychlení:	$g = 9,81 [m \cdot s^{-2}]$
Hmotnost rámu výpočtového modelu:	$m_{výp} = 913 [kg]$
Hmotnost rámu včetně zanedbaných komponent:	$m_{celk} = 1699 [kg]$

7.2.1. Svislé zatížení

Rám je zatížen dvojicí sil, působících na plochy uložení vzduchových pružin a gravitačním zrychlením.

Velikost těchto sil:

$$F_{z1max} = F_{z2max} = \frac{F_{zmax}}{2} = \frac{1,4 \cdot g \cdot m_{vyj}}{2} = \frac{1,4 \cdot 9,81 \cdot 18800}{2} \cong 129100 [N]$$



Obrázek 58 - Schéma svislého zatížení

7.2.2. Příčné zatížení

Příčná síla se na rám podvozku přenáší částečně přes sekundární vypružení a po vyčerpání příčné vůle pak přes příčné narážky na středu podvozku.

$$F_{y_{max}} = 2 \cdot \left(10^4 + \frac{(m_{vyj} + m_p) \cdot g}{n_{pod} \cdot n_n} \right)$$

$$F_{y_{max}} = 2 \cdot \left(10^4 + \frac{(18800+3771) \cdot 9,81}{3 \cdot 2} \right) \cong \mathbf{93807 [N]}$$

Část příčného zatížení, přeneseného sekundárním vypružením:

$$F_{y1} = F_{y2} = \frac{c_{ysek}}{n_p} \cdot y_{sek} = \frac{255}{2} \cdot 15 \cong \mathbf{1913 [N]}$$

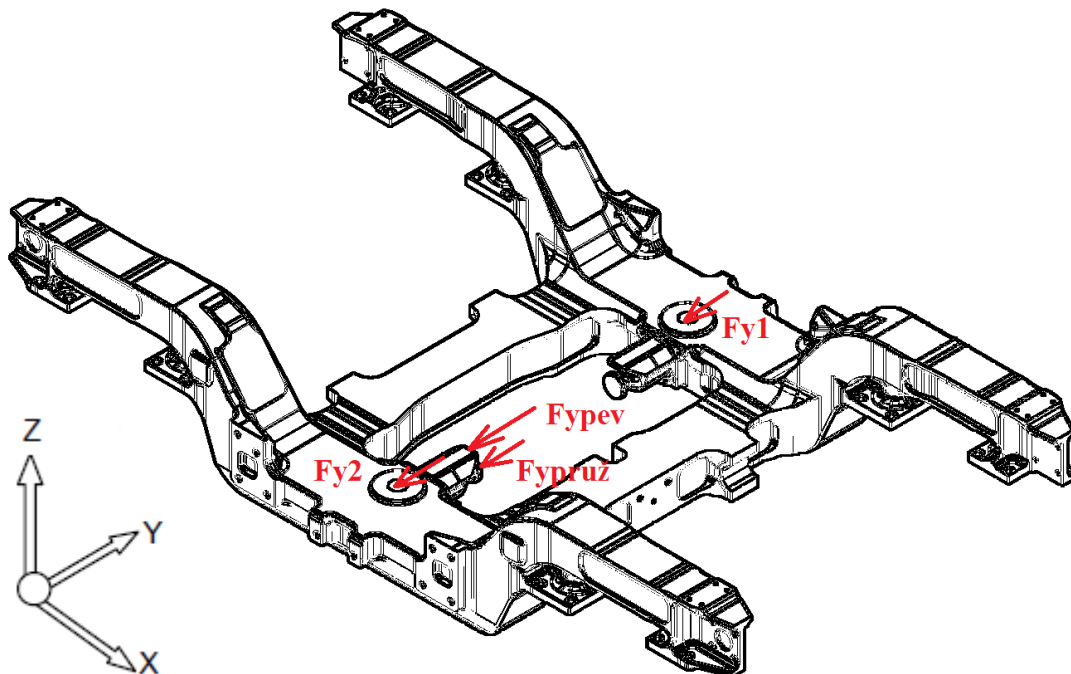
Na pružnou část příčné narážky působí síla:

$$F_{ypruž} = c_{ynar} \cdot y_{nar} = 1156 \cdot 9 = \mathbf{10404 [N]}$$

Na pevnou část příčné narážky pak působí síla:

$$F_{ynar} = F_{y_{max}} - (F_{y1} + F_{y2} + F_{ypruž})$$

$$F_{ynar} = 93807 - (1913 + 1913 + 10404) = \mathbf{79577 [N]}$$



Obrázek 59 - Schéma příčného zatížení

7.2.3. Podélné zrychlení – náraz

Na rám podvozku působí síla v místě uchycení táhla, spojujícího podvozek se skříní, určená z hmotnosti podvozku a podélného zrychlení.

Podélné zrychlení:

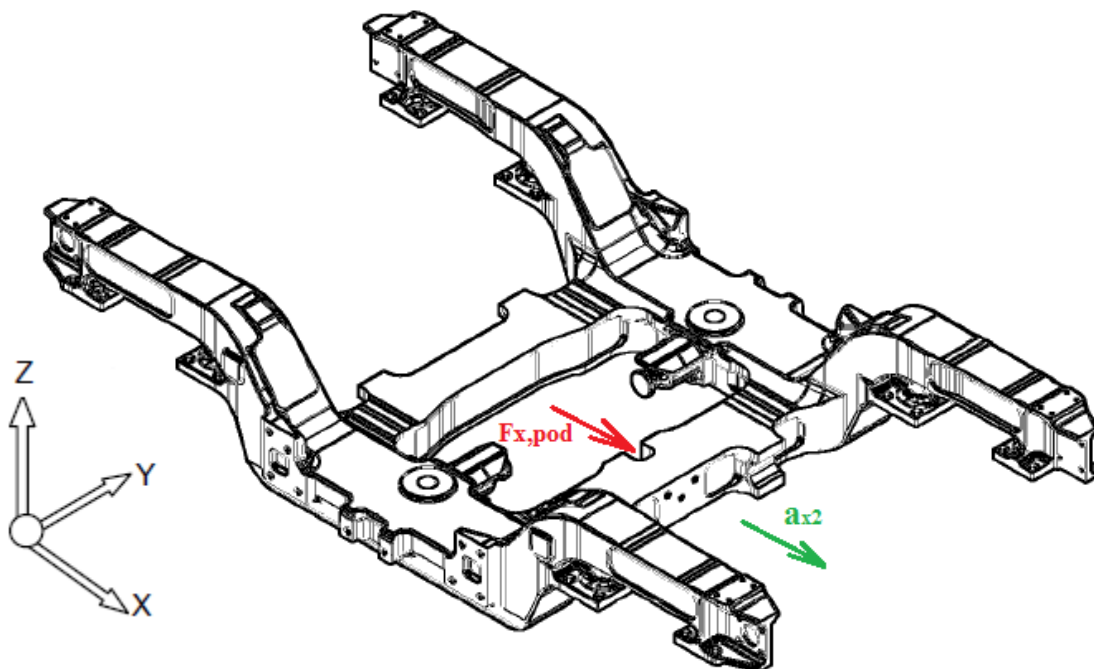
$$a_x = 3 \cdot g = 3 \cdot 9,81 = 29,43 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{]}$$

Podélná síla:

$$F_{x,pod} = m_p \cdot a_x = 3771 \cdot 29,43 \cong 110981 \text{ [N]}$$

Ostatní části podvozku a komponenty, chybějící na výpočtovém modelu jsou zjednodušeně nahrazeny zvětšeným podélným zrychlením:

$$a_{x2} = \frac{m_{celk}}{m_{výp}} \cdot a_x = \frac{1699}{913} \cdot 29,43 \cong 54,77 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{]}$$



Obrázek 60 - Schéma zatížení při podélném zrychlení – nárazu

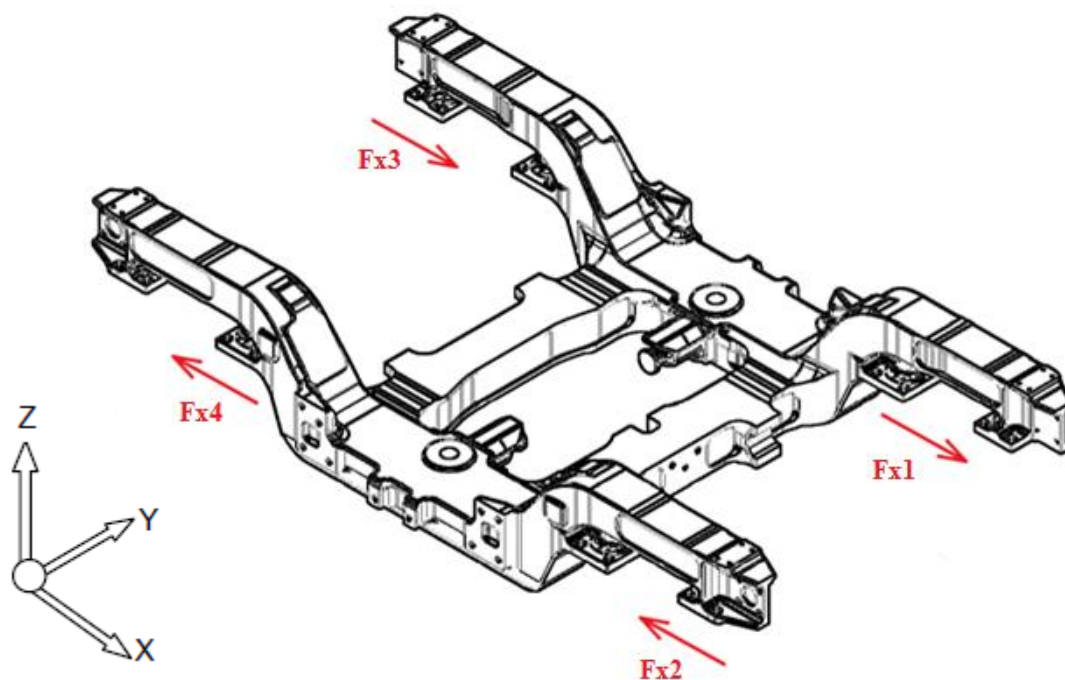
7.2.4. Kosení podvozku

Na místa primárního vypružení působí podélné síly, přičemž na každý podélník v jiném směru. To zapříčiní kosení podvozku. Podélné síly jsou normou definovány v místě styku kola s kolejnici. Podélné síly v místě primárního vypružení jsou pak určeny z momentové podmínky. Velikost těchto podélných sil:

$$F_{x1} = F_{x2} = F_{x3} = F_{x4}$$

$$F_{x1} = 0,1 \cdot (2 \cdot F_{z1max} + m_p \cdot g) \cdot \frac{S}{S_p}$$

$$F_{x1} = 0,1 \cdot (2 \cdot 129100 + 3771 \cdot 9,81) \cdot \frac{1500}{1150} \cong 38504 \text{ [mm]}$$



Obrázek 61 - Schéma zatížení při kosení podvozku

7.2.5. Křížový propad 1%

Toto zatížení vzniká při přejezdu propadu v místě spojení dvou kolejnic. Tím dojde k vychýlení jednoho kola z roviny ostatních tří kol. Nedojde však k jeho odlehnutí od temene kolejnice. Velikost propadu je definována jako 1% z rozvoru podvozku. Jelikož je velikost propadu definována v místě kola, musí být přepočtena z podobnosti trojúhelníků do místa primárního vypružení. Pro výpočet zátěžných sil je předpokládáno rovnoměrné rozdělení vychýlení na podélnicích rámu (vychýlení je děleno čtyřmi). Velikost vychýlení na jedno místě primárního vypružení je tedy:

$$z_{pr} = 0,01 \cdot p \cdot \frac{s_p}{s} \cdot \frac{1}{4} = 0,01 \cdot 1800 \cdot \frac{1150}{1500} \cdot \frac{1}{4} = 3,45 \text{ [mm]}$$

Dále je třeba určit velikost sil, vyvolávajících takovou deformaci. K tomu je nutné znát tuhost rámu ve směru osy z v místě primárního vypružení. Tato hodnota mi byla společně s hmotnostním rozbohem tramvaje a tuhostmi vypružení poskytnuta zadavatelem. Zjištěna byla zatížením podvozku v místě primárního vypružení jednotkovou silou (např. 5000 [N]) a následným změřením deformace v místě primárního vypružení. Tuhost rámu ve směru osy z tedy nabývá hodnoty:

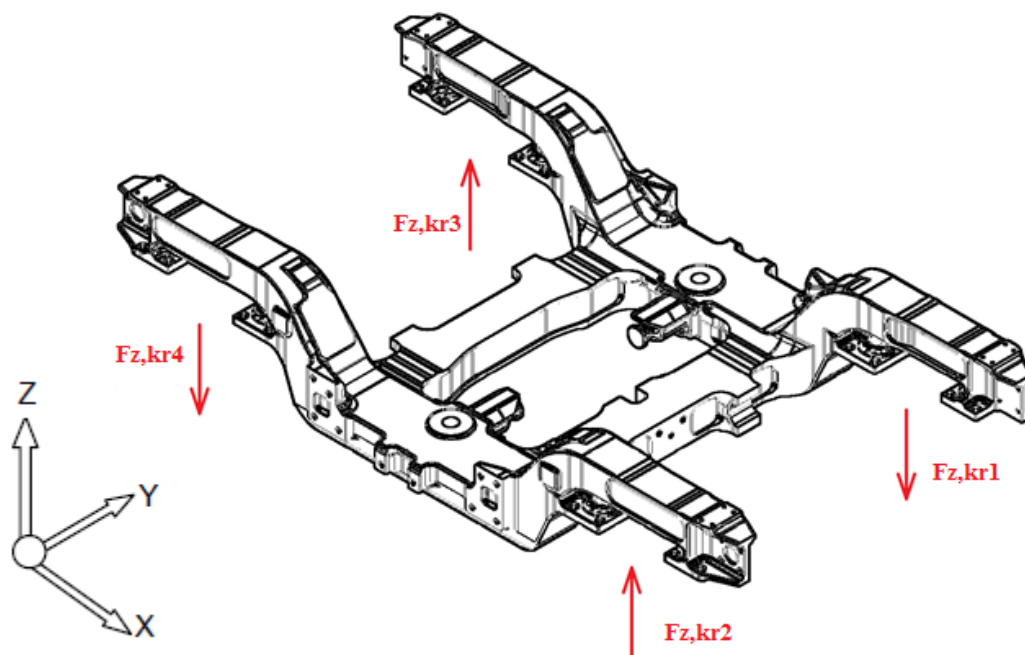
$$c_{z,ram} = 11019 \text{ [N/mm]}$$

Výsledná tuhost primárního vypružení a rámu podvozku je určena ze vztahu pro sériově zařazené pružiny:

$$c_z = \frac{c_{z,ram} \cdot 2 \cdot c_{z,prim}}{c_{z,ram} + 2 \cdot c_{z,prim}} = \frac{11019 \cdot 2 \cdot 2110}{11019 + 2 \cdot 2110} \cong 3051 \text{ [N/mm]}$$

Síla působící na jedno místo primárního vypružení je tedy:

$$F_{z,kr1} = F_{z,kr2} = F_{z,kr3} = F_{z,kr4} = c_z \cdot z_{pr} = 3051 \cdot 3,45 \cong 10526 \text{ [N/mm]}$$



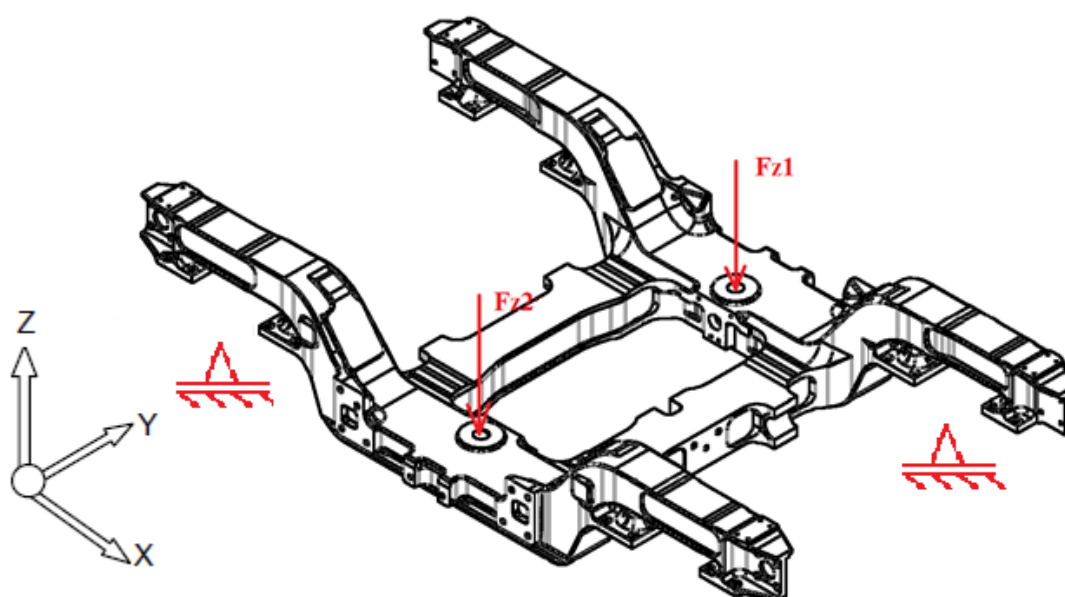
Obrázek 62 - Schéma zatížení při křížovém propadu 1%

7.2.6. Křížový propad - 100% odlehčení kola

Při tomto způsobu zatěžování je simulováno vykolejení vozidla při velmi nízké rychlosti (např. při pojíždění v depu). Podvozek je zatížen pouze hmotnostní prázdného vozidla. Dvě křížem umístěná kola jsou ve vzduchu, tudíž se reakce přenáším jen přes dvě místa pro primární vypružení.

Síly působící na podvozek:

$$F_{z1} = F_{z2} = \frac{m_{prazd} \cdot g}{2} = \frac{11006 \cdot 9,81}{2} \cong 53984 \text{ [N/mm]}$$



Obrázek 63 - Schéma zatížení při křížovém propadu – 100% odlehčení kola

7.2.7. Kombinace zatížení

Kombinace	Svislé zatížení	Příčné zatížení	Křížový propad 1%	Podélné zrychlení	Zatížení od kosení	Křížový propad 100%
1	●	●			●	
2	●		●			
3	●			●		
4						●

Tabulka 10 - Kombinace zatížení

Kombinace jednotlivých zátěžných stavů jsou dány příslušnou normou.

8 Pevnostní výpočet rámu podvozku

8.1 Úvod k řešení pevnostního výpočtu pomocí MKP

Cílem pevnostních výpočtů je zkontrolovat změny provedené na rámu podvozku. Tím že se oproti původnímu rámu zmenšily plochy přes které se přenáší svislé síly a také se působiště těchto sil posunuly na střed podélníků, může mít za následek změny v rozložení napětí. Očekává se, že v okolí vytvořeného otvoru v podélníku pro čep vzduchové pružiny se bude koncentrovat napětí a je nutné zkontrolovat zda nepřesáhne dovolené napětí. Výpočty byly provedeny v programu Siemens NX 11.

Z modelu byly odstraněny některé konzole pro uchycení komponent podvozku, ve snaze o snížení náročnosti výpočtu. Vzhledem k nesymetrickému zatěžování podvozku nebylo možné využít geometrické symetrie výpočtového modelu.

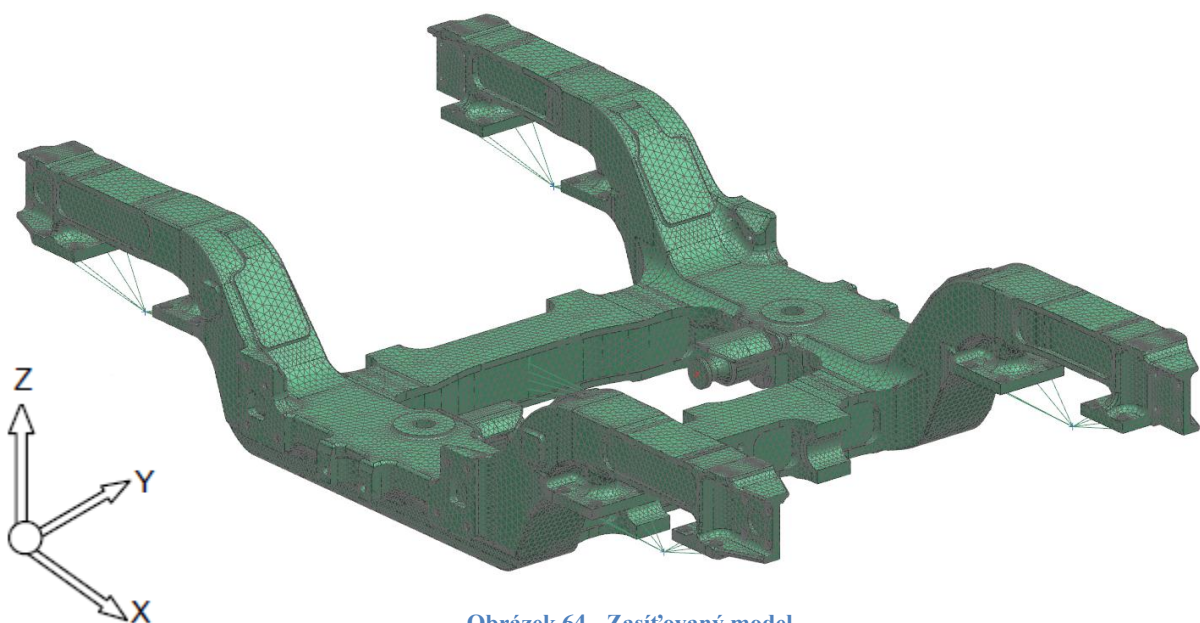
8.2 Materiál rámu

Odlévané části rámu jsou z lité oceli G20Mn6N s mezí kluzu $R_{p0,2} = 280 [MPa]$ a díly z plechů jsou z oceli S355NL s mezí kluzu pro použité tloušťky plechu $R_e = 355 [MPa]$.

V místě svarů jsou tyto hodnoty mezí kluzu sníženy součinitelem svaru $k_s = 0,9$.

8.3 Síť modelu

Síť modelu tvoří desetiuzlové prvky CTETRA(10) s velikostí 19 [mm]. Některá místa jsou lokálně zjemněna z důvodu eliminace chybných elementů, nebo v zájmu přesnějších výsledků v kritických místech (některé svary). Ložné plochy každého primárního vypružení jsou přes otvory pro šrouby spojeny pomocí RBE2 elementů do bodu ležícího v ose nápravy. Na tento bod jsou pak zadávány síly a okrajové podmínky.



Obrázek 64 - Zasíťovaný model

8.4 Výpočet jednotlivých zátěžných stavů

U jednotlivých zátěžných stavů budou popsány okrajové podmínky a následně ukázán deformovaný model. Napětí budou řešena až při kombinaci zátěžných stavů.

8.4.1. Svislé zatížení

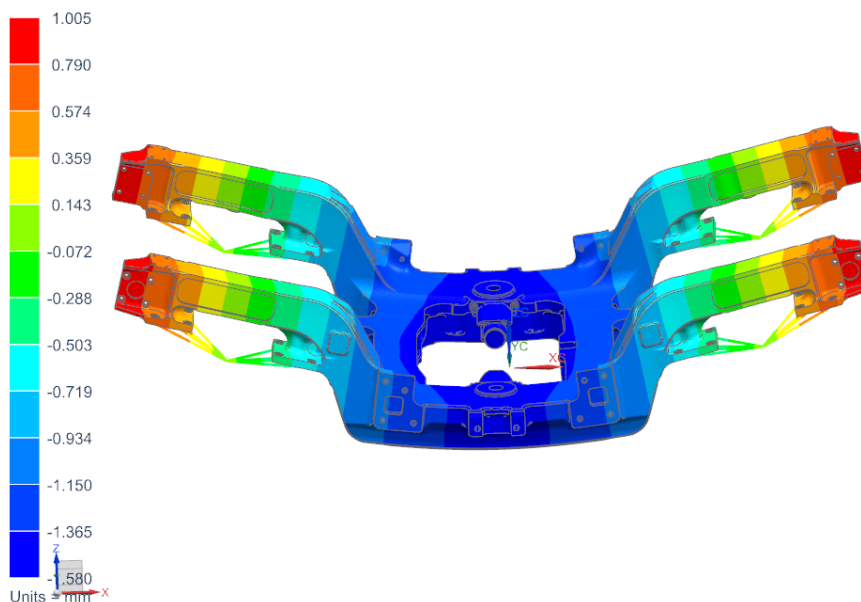
Zatížení modelu:

Při tomto zátěžném stavu na rám podvozku působí dvě síly v místě uložení pružin a také gravitační zrychlení ve směru osy (-z).

Okrajové podmínky:

V místech všech primárních uložení je odebrán pohyb ve směru osy z. Současně v těch místech na jedné straně podélníku je odebrán pohyb ve směru osy y a ve dvou naproti sobě je odebrán pohyb ve směru x.

sestava_vypocet_sim1 : liha Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Z
Min : -1.580, Max : 1.005, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 65 - Deformace pod svislým zatížením (ve směru osy z)

8.4.2. Podélné zrychlení - náraz

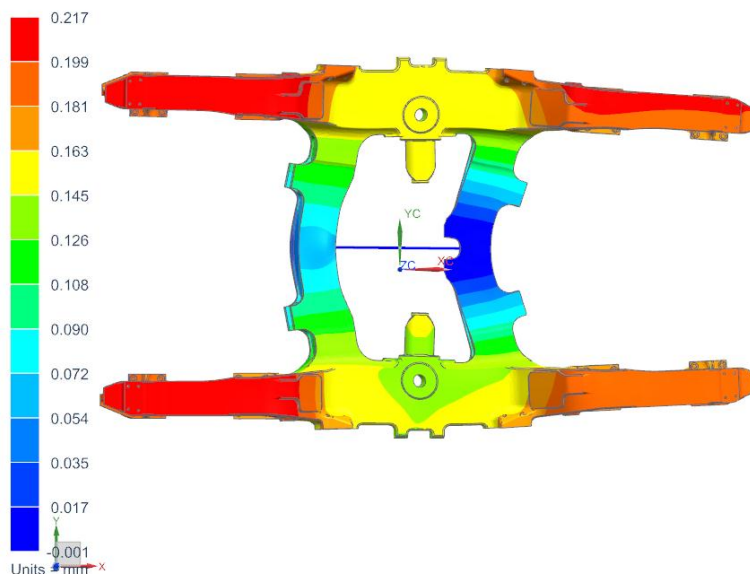
Zatížení modelu:

Při tomto zátěžném stavu je rám zatěžován opačně než je tomu v realitě. Ve skutečnosti působí síla na místo podélného táhla a v místě primárního uložení jsou odpovídající reakce. Zde je zátěžná síla aplikována na místa primárního uložení. Současně na podvozek působí gravitační zrychlení a_{x2} ve směru osy x.

Okrajové podmínky:

V místě podélného táhla je celé stykové ploše odebrán pohyb ve směru osy x. Ve směru osy y je odebrán pohyb v podélné ose souměrnosti podvozku a ve směru osy z je pohyb zakázán na ložných plochách sekundárního vypružení.

sestava_vypocet_sim1 : naraz Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, X
Min : -0.001, Max : 0.217, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 66 - Deformace při podélném zrychlení (v ose x)

8.4.3. Kosení podvozku

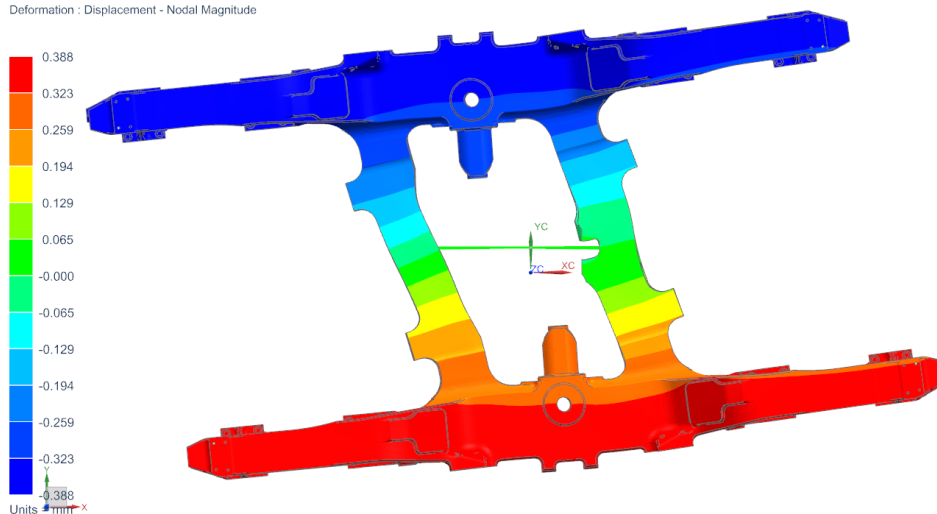
Zatížení modelu:

Při tomto zátěžném stavu jsou místa primárního vypružení zatížena podélnými silami ve směru osy x. Na každém podélníku však působí síly jiným směrem.

Okrajové podmínky:

Pohyb ve směru osy z je odebrán ve všech místech primárního vypružení, ve směru x pak opět za místo uložení podélného táhla. Ve směru y je pohyb odebrán v místech prim. vypružení na jednom z podélníků.

sestava_vypocet_sim1 : Krizení Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, X
Min : -0.388, Max : 0.388, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 67 - Deformace při kosení podvozku (ve směru osy x)

8.4.4. Příčné zatížení

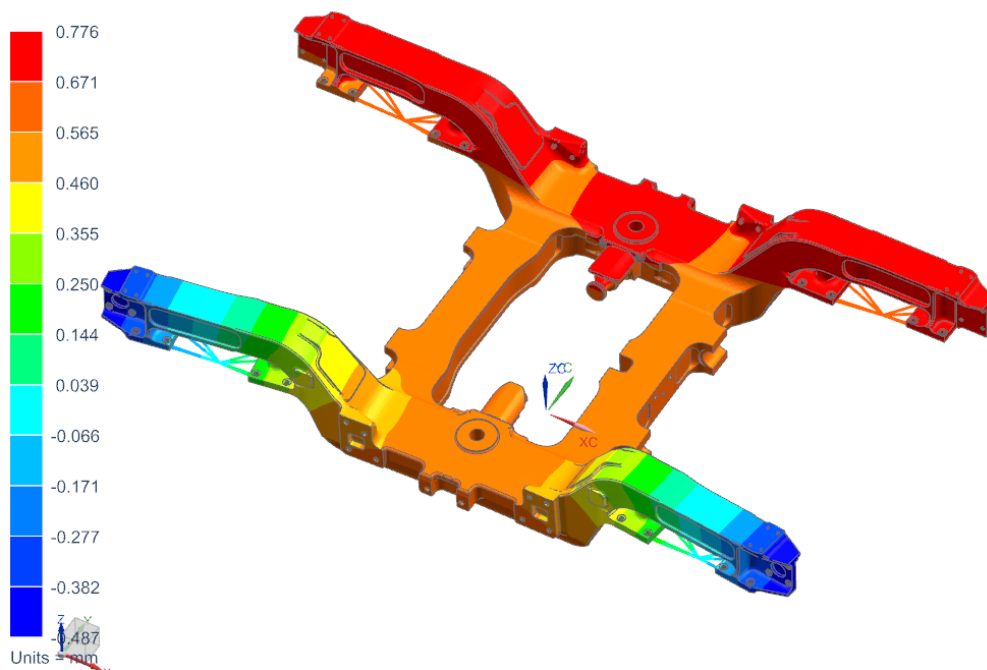
Zatížení modelu:

Model je zatížen ve směru osy y. Dvojice sil působí na plochy otvorů pro pružinové čepy, dále je rám zatížen v místě příčné narážky a to na její pevnou i pružnou část.

Okrajové podmínky:

Pohyb ve směru osy z je odebrán ve všech místech primárního vypružení. Pohyb ve směru osy x je zakázán ve dvou místech primárního vypružení naproti sobě a v ose y v místech primárního vypružení na jednom podélníku.

sestava_vypocet_sim1 : bocni Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Y
Min : -0.487, Max : 0.776, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 68 - Deformace při příčném zatížení (ve směru osy y)

8.4.5. Křížový propad - 100% odlehčení kola

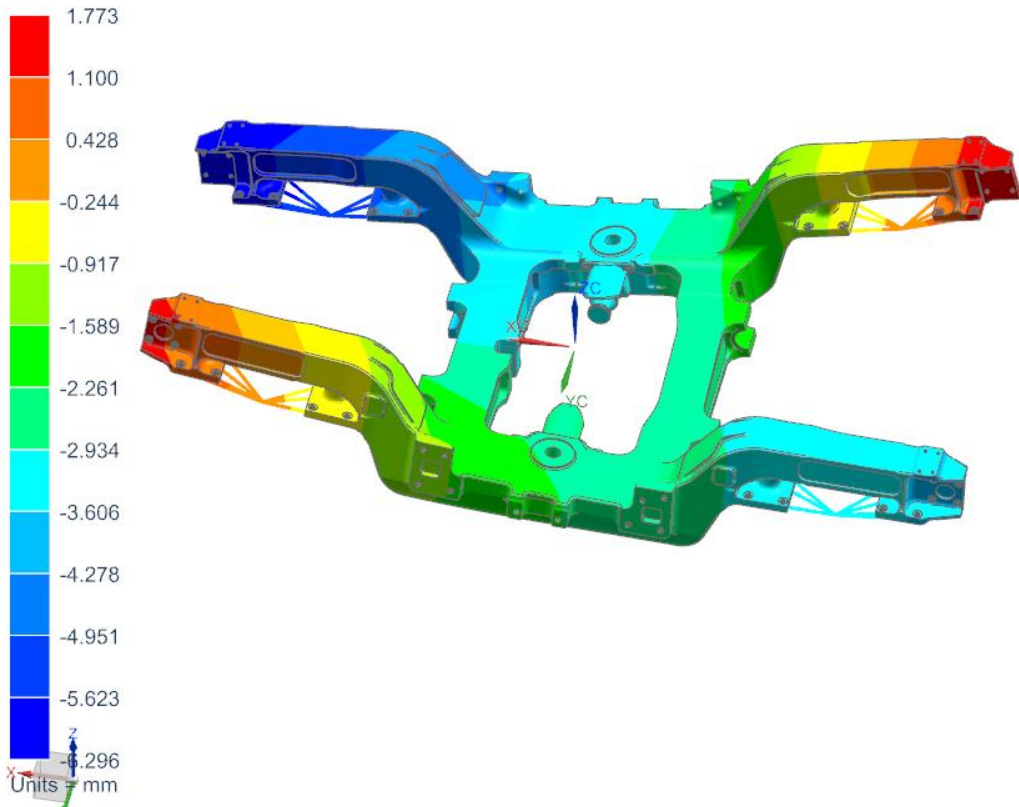
Zatížení modelu:

Při tomto zátěžném stavu je podvozek zatížen ve stejných místech jako při zatížení ve svislém směru, liší se jen velikost sil. Gravitační zrychlení působí ve směru osy (-z).

Okrajové podmínky:

Pohyb ve směru osy z je omezen ve dvou místech primárního vypružení křížem naproti sobě. Rovněž je v nich zakázán pohyb ve směru osy y. Pohyb ve směru osy x je zakázán v místě podélného táhla.

sestava_vypocet_sim1 : propad_100 Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Z
Min : -6.296, Max : 1.773, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 69 - Deformace při křížovém propadu 100% (ve směru osy z)

8.4.6. Křížový propad 1%

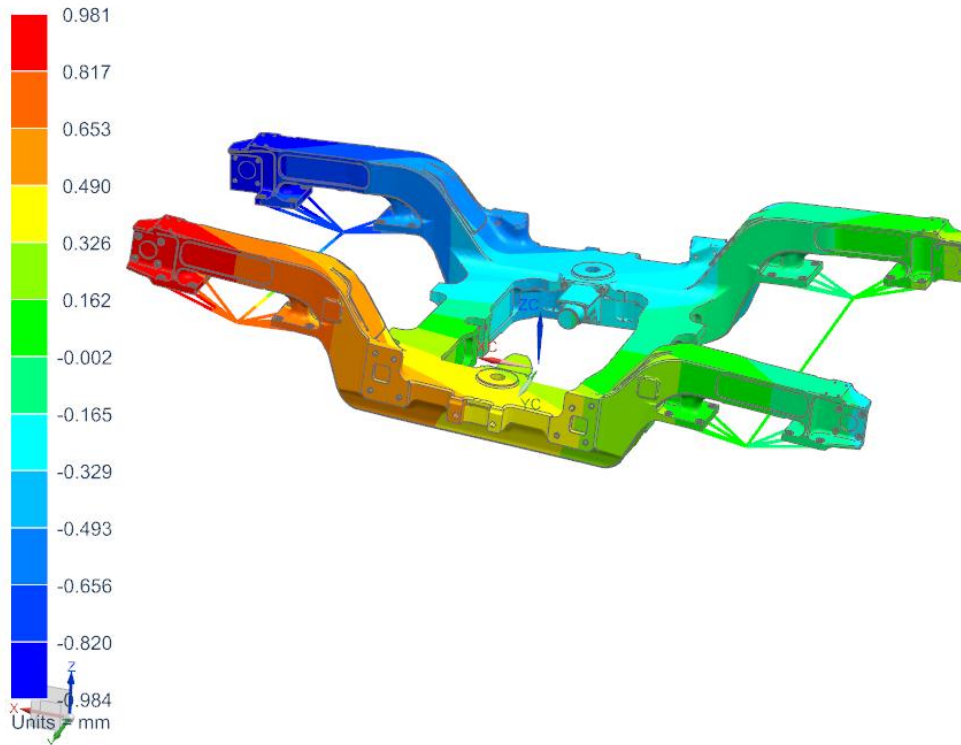
Zatížení modelu:

Síly působící v ose z v místech primárního vypružení, které mají křížem opačnou orientaci jsem přepočítal na moment. V těsné blízkosti dvojice uzlů symbolizující místa primárního vypružení, jsem vytvořil uzel. Tyto pomocné uzly pak byly spojeny pomocí RBE2 elementů do uzlu, jenž se nachází uprostřed nich (vždy dva protější). Na tento středový uzel pak působí moment kolem osy x.

Okrajové podmínky:

Zde byly všechny pohyby zakázány ve středových uzlech výše zmíněných. Pomocné uzly pak byly spojeny funkcí coupling, kde se nastavil vzájemný pohyb s uzly míst primárního vypružení.

sestava_vypocet_sim1 : propad_1 Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Z
Min : -0.984, Max : 0.981, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 70 - Deformace při křížovém propadu 1% (ve směru osy z)

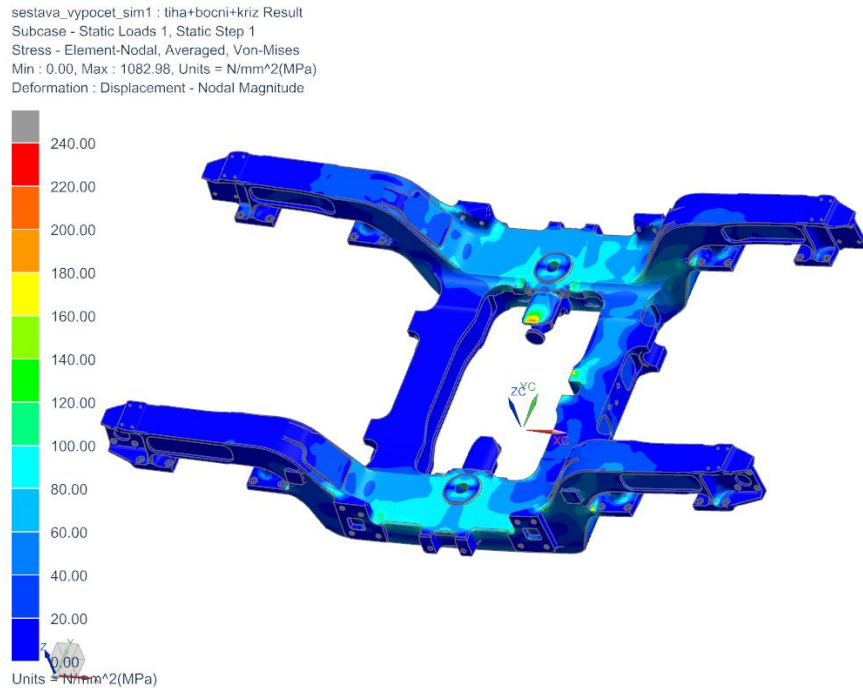
8.5 Kombinace zátěžných stavů

Při kombinování zátěžných stavů jsem narazil na problém, kdy se některé zátěžné stavy, vzhledem ke svým okrajovým podmínkám, navzájem omezují a není zaručeno reálné deformování modelu rámu podvozku. Výsledky proto mohou být v některých kombinacích zkreslené. Bylo by vhodné řešit rám jiným způsobem. Ideální by bylo řešit model kompletního podvozku postaveného na kolejnicích, to je však vzhledem k náročnosti takové úlohy na výpočetní výkon nereálné. Další možností by bylo, určit si předem velikost reakcí vznikajících při zatěžování podvozku. Rám by pak byl zatěžován současně zátěžnými silami i reakcemi a v prostoru by byl zavazben v místech, kde se v příslušných směrech neočekávají žádné pohyby. Při správném určení reakcí by pak v těchto místech s okrajovými podmínkami byly nulové reakce.

Zátěžné stavy v jednotlivých kombinacích jsou uvedeny v **tabulce 10**.

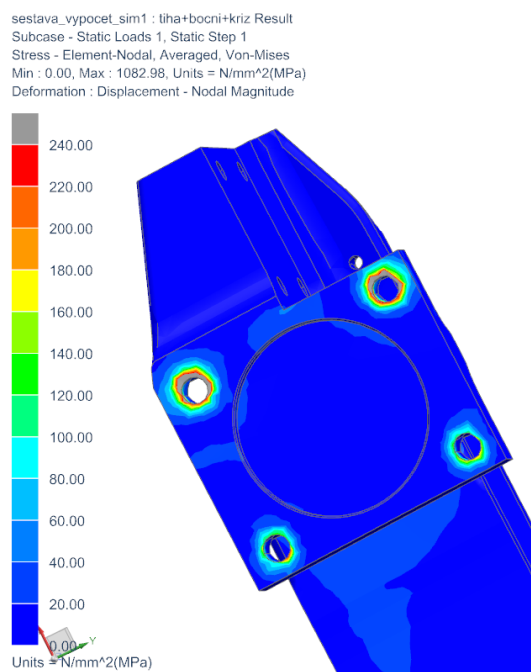
8.5.1. Kombinace 1

Jak bylo předpokládáno, tak se u otvoru na spodní straně podélníku koncentruje napětí. Po zaoblení hran, se však napětí snížilo na cca **235 [MPa]**.

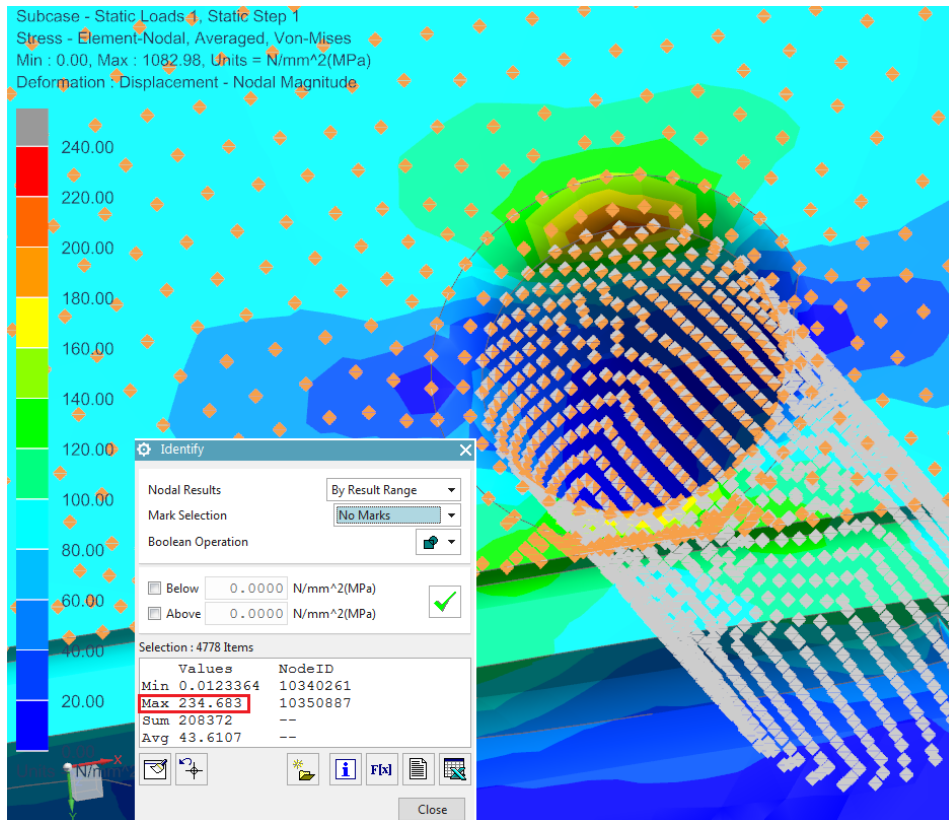


Obrázek 71 - Rozložení redukovaného napětí - kombinace 1

Vysoké maximální napětí je způsobené vazbením rámu za otvory šroubů v místě primárního vypružení, kde vznikají špičky napětí. Ty by šlo eliminovat například vymodelováním části primárního vypružení a jeho spojením s rámem pomocí předepnutých šroubů. Výpočet by se tím však podstatně prodloužil s ohledem na množství zátěžných stavů. Tyto špičky napětí jsou jednoduše zanedbány.



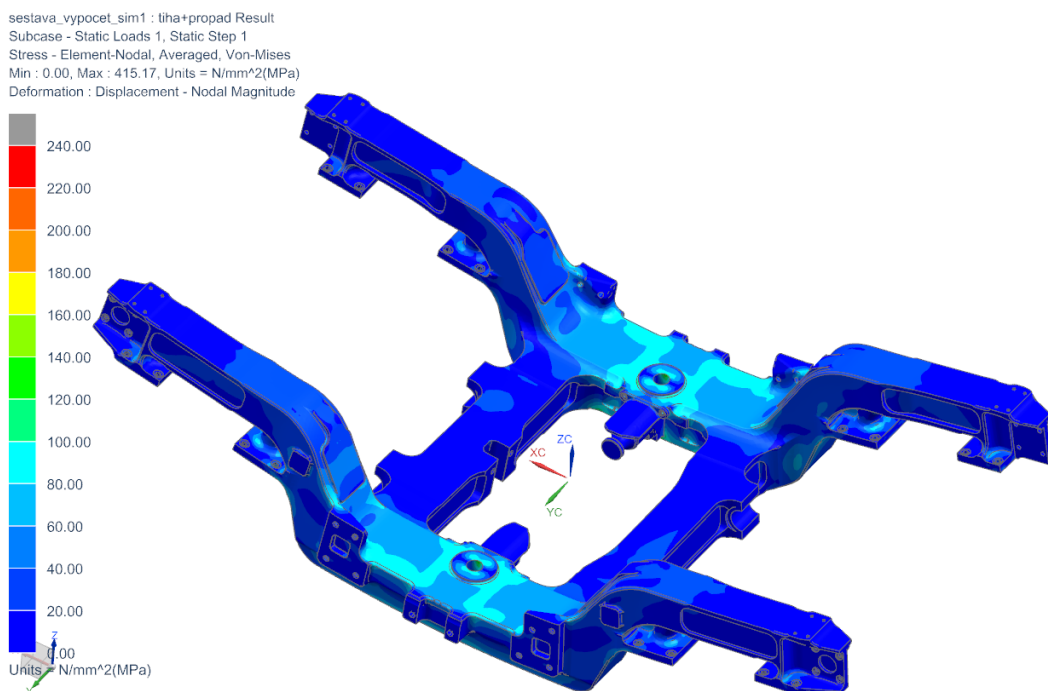
Obrázek 72 - Špičky napětí v otvorech pro šrouby



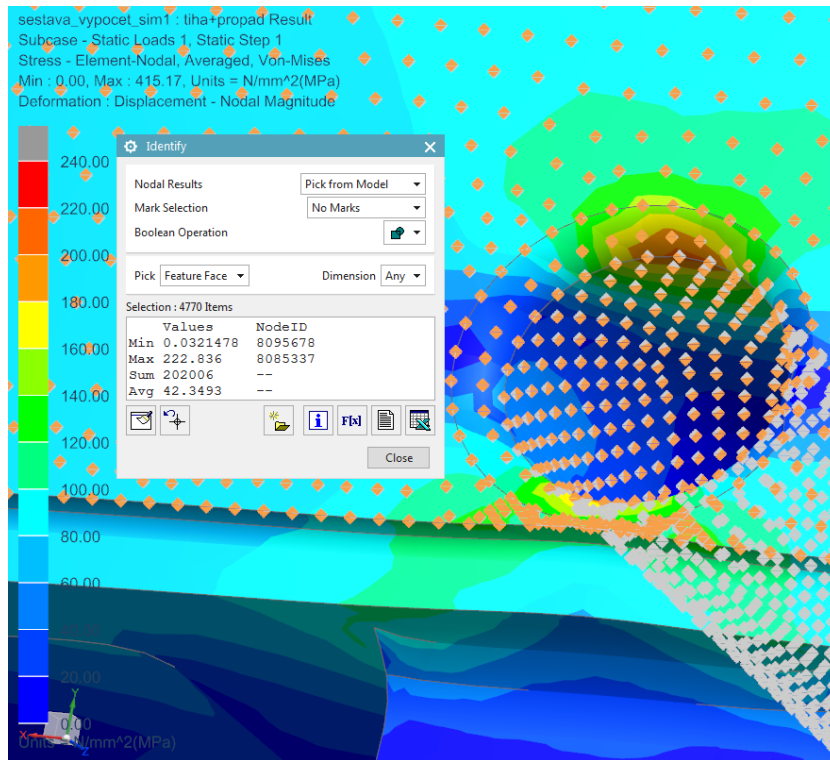
Obrázek 73 - Nejvyšší napětí (kritické místo) – kombinace 1

8.5.2. Kombinace 2

Jako kritické místo konstrukce se opět jeví okolí otvoru pro čep pružiny na spodní straně podélníku. Špičky napětí jsou opět způsobeny vazbením za otvory šroubů. Nejvyšší redukované napětí u této kombinace zatížení dosahuje hodnoty cca **223 [MPa]**.



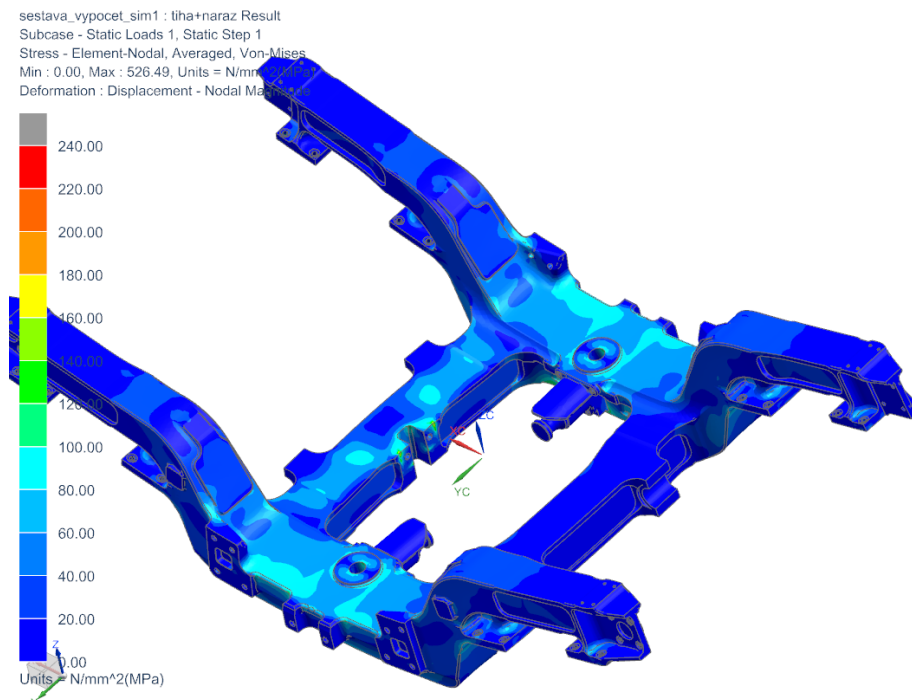
Obrázek 74 – Rozložení redukovaného napětí - kombinace 2



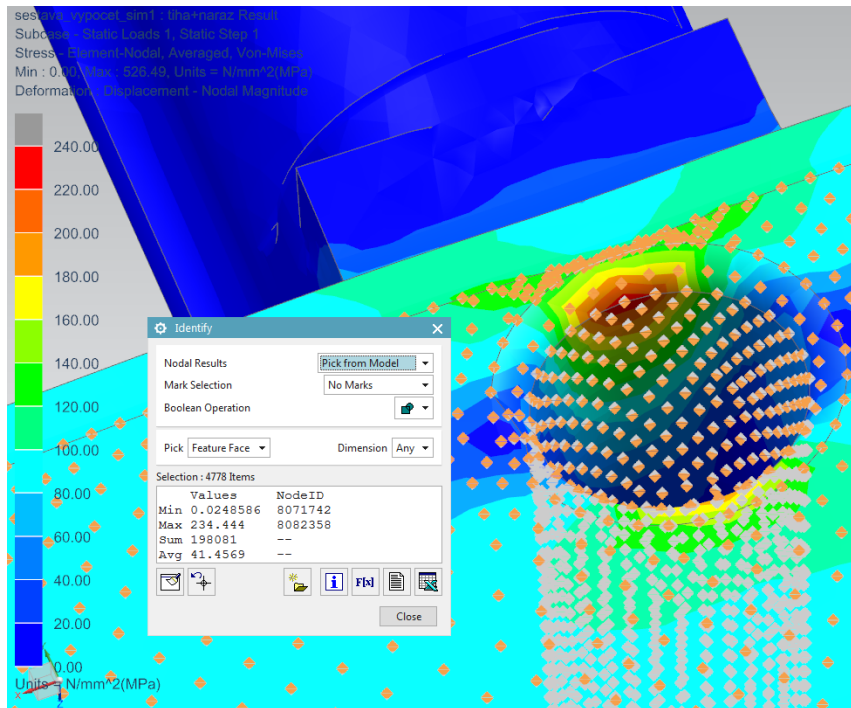
Obrázek 75 - Nejvyšší napětí (kritické místo) – kombinace 2

8.5.3. Kombinace 3

I při této kombinaci zátěžných stavů je opět kritické místo v okolí otvoru. Tentokrát je hodnota nejvyššího redukovaného napětí cca **234 [MPa]**. V okolí spojení příčnicku s podélníkem (tzn. v blízkosti svarů) se vyskytuje stále napětí pouze okolo 150 [MPa].



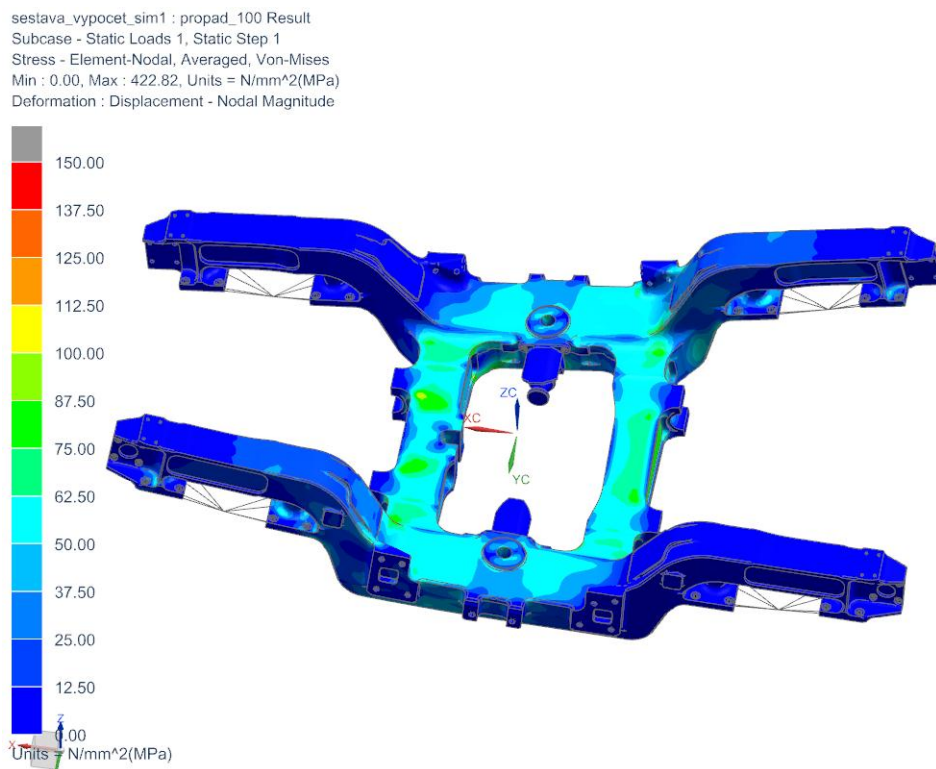
Obrázek 76 - Rozložení redukovaného napětí - kombinace 3



Obrázek 77 - Nejvyšší napětí (kritické místo) – kombinace 3

8.5.4. Kombinace 4

U tohoto zatížení jsou kritická místa na příčnicích, které jsou zkrucovány. Nicméně hodnoty redukovaného napětí dosahují max. hodnot okolo 110 [MPa].



Obrázek 78 - Rozložení redukovaného napětí - kombinace 4

8.6 Hodnocení pevnosti rámu zatíženého provozním zatížením

Předpokladem řešení provozního zatížení je úspěšné ověření pevnosti rámu podvozku pod mimořádným zatížením.

Zatěžování rámu podvozku provozním zatížením simuluje jeho obvyklé zatížení při jeho provozu. Hodnocení pevnosti rámu z tohoto hlediska není součástí práce, níže však ve zkratce popíši postup a smysl takového hodnocení.

8.6.1. Kombinace statického zatěžování

Podvozek je zatěžován silami vypočtenými z provozního zatížení. Tyto síly jsou ovlivněny koeficienty kmitání α a β . Tyto koeficienty zohledňují kolébání a houpání skříně. Jejich hodnota se odvíjí od provozních podmínek vozidla, jako je rozchod koleje, kvalita tratě, nedostatek převýšení a poloha těžiště. Dle normy obvykle nabývají hodnot $\alpha = 0,1[-]$ a $\beta = 0,2[-]$. [20]

kombinace číslo	F_{z1}	F_{z2}	F_y
1	$F_z/2$	$F_z/2$	0
2	$(1 + \alpha - \beta) \cdot F_z/2$	$(1 - \alpha - \beta) \cdot F_z/2$	0
3	$(1 + \alpha - \beta) \cdot F_z/2$	$(1 - \alpha - \beta) \cdot F_z/2$	$+F_y$
4	$(1 + \alpha + \beta) \cdot F_z/2$	$(1 - \alpha + \beta) \cdot F_z/2$	0
5	$(1 + \alpha + \beta) \cdot F_z/2$	$(1 - \alpha + \beta) \cdot F_z/2$	$+F_y$
6	$(1 - \alpha - \beta) \cdot F_z/2$	$(1 + \alpha - \beta) \cdot F_z/2$	0
7	$(1 - \alpha - \beta) \cdot F_z/2$	$(1 + \alpha - \beta) \cdot F_z/2$	$-F_y$
8	$(1 - \alpha + \beta) \cdot F_z/2$	$(1 + \alpha + \beta) \cdot F_z/2$	0
9	$(1 - \alpha + \beta) \cdot F_z/2$	$(1 + \alpha + \beta) \cdot F_z/2$	$-F_y$

Obrázek 79 - Zatěžovací stavy pro statické zkoušky [20]

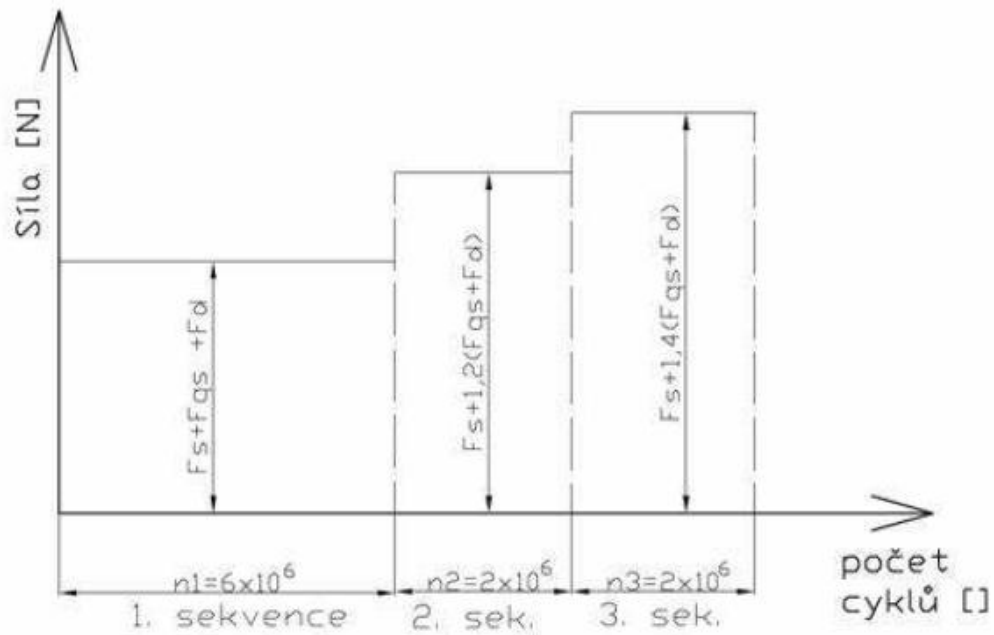
V každém vyšetřovaném místě se zaznamená minimální hodnota napětí σ_{max} a minimální hodnota σ_{min} . Z těchto napětí se určí středního napětí σ_m a amplituda napětí σ_a :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Tyto hodnoty napětí se pak zakreslují do mezních diagramů, jako jsou například Goodman-Smithovi. Mezní diagramy bývají stanoveny pro konkrétní materiál a druhy svarových spojů. Hodnoty napětí nesmí přesahovat mezní čáry diagramu o více než 20%. Je-li tato podmínka splněna, lze přistoupit k únavové zkoušce. [20]

Podvozek se pak zatěžuje ve třech cyklech, dle níže uvedeného grafu. Je zatížen statickými silami (F_s), kvazistatickými (F_{qs}) a dynamickými (F_d). Velikosti těchto sil jsou počítány dle normy.



Obrázek 80 - Graf průběhu únavové zkoušky [20]

8.7 Zhodnocení výpočtů

Maximální hodnoty redukovaného napětí zjištěné při výpočtech nepřekročily hodnotu meze kluzu. Nejvyšší hodnota byla zjištěna při kombinaci 1, kde byla $\sigma_{max} = 235 [MPa]$. Vůči mezi kluzu $R_{p0,2} = 280 [MPa]$ tedy vychází bezpečnost $k = 1,19 [-]$.

9 Závěr a zhodnocení

V diplomové práci byla posouzena možnost adaptace stávajícího tramvajového podvozku 26T s pružinovým sekundárním vypružením na vypružení vzduchové.

Byly navrženy jednotlivé konstrukční varianty a poté vybrána nejvhodnější a detailně rozpracována. Byly vyřešeny úpravy na rámu podvozku a také zástavba pružin do skříně tramvaje. Vše se snahou o maximální ekonomičnost konstrukce, při zachování co nejvyšší počtu původních dílů a komponent.

Z prostorových důvodů byla zvolena pružina s menším maximálním možným zatížením, než bylo zatížení na původní pružinové vypružení. To by bylo řešitelné například zkrácením dvou nesených článků (článek 2 a 4, dle obrázku 19), jelikož tento problém nastává pouze u prostředního podvozku.

Při zástavbě vzduchových pružin do skříně nezbylo dostatek prostoru pro přidavné vzdušníky, respektive jejich objem je menší než předepsaný výrobcem. To znamená, že pružina bude mít větší tuhost než při objemu předepsaném. Dle orientačního výpočtu by měla být tuhost pružiny $819[N \cdot mm^{-1}]$, přičemž původní vinuté pružiny měly tuhost $850[N \cdot mm^{-1}]$. Na základě toho lze konstatovat, že komponenty podvozku jako jsou tlumiče a torzní stabilizátory mohou bez větších změn pracovat i v modifikovaném podvozku. Při případné realizaci by však bylo nezbytné se tím blíže zabývat. Stejně tak by bylo nezbytné pevnostně zkontrolovat úpravy na spodní části skříně.

Úpravy na rámu podvozku byly pevnostně zkontrolovány z hlediska mimořádných zatížení a v příloze je výkres upraveného odlitku podélníku.

Výsledkem práce je návrh modifikovaného podvozku 26T se vzduchovým sekundárním vypružením, včetně řešením jeho zástavby do současné skříně a návrh jejích úprav.

10 Zdroje

- [1] Milano Metro Modernisation, Italy. *RAILWAY TECHNOLOGY*. [Online] 2018. [Citace: 17. 1 2018.] <http://www.railway-technology.com> .
- [2] *TCRP Report 2 - Applicability of Low-Floor Light Rail Vehicles in North America*. Washington, D.C. : NATIONAL ACADEMY PRESS, 1995.
- [3] **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.** *KKV 2 Podvozky pro nízkopodlažní tramvaje*. Plzeň : Katedra konstruování strojů, ZČU, 2010. Výuková prezentace.
- [4] Wikipedia. *AEG-lagevloertram*. [Online] 16. 4 2013. [Citace: 17. 1 2018.] <https://nl.wikipedia.org/wiki/AEG-lagevloertram>.
- [5] Brochures. *Alstom*. [Online] 4 2014. [Citace: 17. 1 2018.] <http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Alstom%20Bogies%20Catalogue%202015%20-%20English.pdf?epslanguage=en-GB>.
- [6] First Class Bogies. *Siemens*. [Online] 8 2008. [Citace: 17. 1 2018.] <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/sitecollectiondocuments/en/rail-solutions/components-and-systems/bogies-catalog-en.pdf>.
- [7] Our experience. *PROSE*. [Online] [Citace: 1. 2 2018.] http://www.prose.one/DesktopModules/PRO_CaseHistory/files_ch/24-3_000.pdf.
- [8] Drehgestell. *Wikiwand*. [Online] [Citace: 17. 1 2018.] <http://www.wikiwand.com/de/Drehgestell>.
- [9] WABCO. *Air suspension systems*. [Online] [Citace: 8. 2 2018.] <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/57/8150100573-15.pdf>.
- [10] **Docquier, Nicolas**. Multiphysics Modeling of Railway Pneumatic Suspensions. *Simpack*. [Online] 2011. [Citace: 4. 3 2018.] http://www.simpack.com/fileadmin/simpack/doc/usermeeting11/UM_2011_presentations/Day_2_Rail/03_um11_UniLouvain_Docquier_Multiphysics_Modeling_of_Railway_Pneumatic_Suspensions.pdf.
- [11] 360. *Air Springs Information*. [Online] [Citace: 7. 2 2018.] http://www.globalspec.com/learnmore/mechanical_components/springs/air_springs.
- [12] GMT. *Air suspension*. [Online] [Citace: 7. 2 2018.] <https://www.gmtrubber.com/wp-content/uploads/2017/02/Railway-Vehicle-Applications-.pdf>.
- [13] Reagan industries. *Find Correct Spring*. [Online] 2018. [Citace: 7. 2 2018.] <http://www.reaganindustries.com/find-correct-spring>.
- [14] Airlinehyd. *Engineer Manual & Design Guide*. [Online] 1997. [Citace: 7. 2 2018.] <https://www.airlinehyd.com/apollo/firestone/w01metric.pdf>.
- [15] CONTITECH AIR SPRINGS AND ACTUATORS FOR PNEUMATICS. *Air spring specialist*. [Online] 2017. [Citace: 15. 2 2018.] <https://www.toolern.com.au/contitech-air-springs-and-actuators-for-pneumatics/>.
- [16] **KOLÁŘ, Josef**. *Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel*. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04262-5.

- [17] ČSN EN 13597. Železniční aplikace - Pryžové součásti vypružení - Pryžové membrány pro pneumatické závěsné pružiny. Český normalizační institut, 2004.
- [18] Trelleborg. *Airspring system*. [Online] [Citace: 7. 2 2018.]
http://www.trelleborg.com/anti-vibration-solutions/~/_media/anti-vibration--systems_tis/pdfs/brochures--and--catalogues/datasheets--new/tiavs--air--spring--systems.pdf.
- [19] Vyjela nejnovější plzeňská tramvaj: veselá, klimatizovaná a s LCD. *LIDOVKY.cz*. [Online] 28. 5 2013. [Citace: 6. 5 2018.]
https://byznys.lidovky.cz/vyjela-nejnovejsi-plzenska-tramvaj-vesela-klimatizovana-a-s-lcd-p8s-/doprava.aspx?c=A130528_112949_ln-doprava_mev.
- [20] **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.** *Rámy podvozků kolejových vozidel*. Plzeň : Katedra konstruování strojů, ZČU, 2011.

11 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Podvozek 35T	6
Obrázek 2 - Podvozek Eurotram [1]	7
Obrázek 3 - Podvozek Eurotram [3]	8
Obrázek 4 - Podvozek GT6N [2]	8
Obrázek 5 - Podvozek GT6N [3]	9
Obrázek 6 - Podvozek CL606 [5]	11
Obrázek 7 - Podvozek CL 606 [5]	12
Obrázek 8 - Podvozek CL 606 [5]	12
Obrázek 9 - Podvozek SF 1000 [6]	13
Obrázek 10 - Podvozek SF 1000 [6]	14
Obrázek 11 - Podvozek EV09 [7]	14
Obrázek 12 - Podvozek EV09 s úzkým (vlevo) a širokým rozchodu [8]	15
Obrázek 13 - Regulační ventil [9]	16
Obrázek 14 - Obecné schéma soustavy vzduchového vypružení [10]	17
Obrázek 15 - 1-bodové uložení [10]	17
Obrázek 16 - 2-bodové uložení [10]	18
Obrázek 17 - Základní části měchu [12]	18
Obrázek 18 - Vlnovcová pružina [11]	19
Obrázek 19 – Výškové varianty vlnovcových pružin [13]	19
Obrázek 20 - Varianta upnutí membrány vlnovcové pružiny [14]	20
Obrázek 21 - Pružina typu Rolling lobe [15]	20
Obrázek 22 - Pružina (výrobce Trelleborg) [15]	21
Obrázek 23 - Pružina (Contitech) [15]	21
Obrázek 24 - Přepásaná pružina (Trelleborg) [18]	21
Obrázek 25 - Pružina s vedením (Contitech) [15]	21
Obrázek 26 - Nouzové pružiny vyráběné firmou GMT [12]	22
Obrázek 27 - Kmitavé pohyby skříně [16]	23
Obrázek 28 - Definované tuhosti membrány [17]	24
Obrázek 29 - Podvozek s původním konvenčním vypružením	25
Obrázek 30 - Schéma varianty A	26
Obrázek 31 - Schéma varianty B	27
Obrázek 32 - Schéma varianty C	27

Obrázek 33 - Schéma varianty D	28
Obrázek 34 - Základní rozměry vzduchové pružiny pro 10,5 tuny	29
Obrázek 35 - Pružina Trelleborg [18].....	31
Obrázek 36 - Pružina z tramvaje 35T použitá pro přestavbu	32
Obrázek 37 - Pohyby pružiny v horizontální rovině.....	33
Obrázek 38 - Zástavbový prostor potřebný pro pružinu.....	34
Obrázek 39 - Původní část podélníku	34
Obrázek 40 - Změny na ložné ploše podélníků (vlevo původní).....	35
Obrázek 41 - Otvor pro čep pružiny	35
Obrázek 42 - Úprava patek pro jádro odlitku	36
Obrázek 43 - Tloušťka podélníku	36
Obrázek 44 - Kolize příčné narážky s pružinou a jejím zástavbovým prostorem	37
Obrázek 45 - Zkrácení příčných narážek na straně skříně.....	37
Obrázek 46 - Možnosti úpravy příčné narážky.....	38
Obrázek 47 - Kolize pružiny s původní skříní	38
Obrázek 48 - Řez pružinou a původní skříní	39
Obrázek 49 - Část skříně nad podvozkem (levá část původní, pravá modifikovaná)	39
Obrázek 50 - Úprava konzole pro narážku (vlevo původní)	40
Obrázek 51 - Řezy upravenou částí skříně (pohled zdola)	40
Obrázek 52 - Úpravy ve vztahu s původní skříní	41
Obrázek 53 - Prostor pro pomocné vzduchojemy (pohled shora skrz podlahu).....	41
Obrázek 54 - Vyšetření pohybů skříně vůči podvozku (modrá skřín).....	42
Obrázek 55 - Natočená skřín vůči podvozku v jedné z krajních poloh	43
Obrázek 56 - Model pružiny v řezu s naznačeným činným průměrem	44
Obrázek 57 - Schéma tramvaje 26T [19].....	46
Obrázek 58 - Schéma svislého zatížení	48
Obrázek 59 - Schéma příčného zatížení	49
Obrázek 60 - Schéma zatížení při podélném zrychlení – nárazu.....	50
Obrázek 61 - Schéma zatížení při kosení podvozku.....	51
Obrázek 62 - Schéma zatížení při křížovém propadu 1%	52
Obrázek 63 - Schéma zatížení při křížovém propadu – 100% odlehčení kola	52
Obrázek 64 - Zasiťovaný model	54
Obrázek 65 - Deformace pod svislým zatížením (ve směru osy z)	55
Obrázek 66 - Deformace při podélném zrychlení (v ose x).....	56

Obrázek 67 - Deformace při kosení podvozku (ve směru osy x)	56
Obrázek 68 - Deformace při příčném zatížení (ve směru osy y)	57
Obrázek 69 - Deformace při křížovém propadu 100% (ve směru osy z)	58
Obrázek 70 - Deformace při křížovém propadu 1% (ve směru osy z)	59
Obrázek 71 - Rozložení redukovaného napětí - kombinace 1	60
Obrázek 72 - Špičky napětí v otvorech pro šrouby	60
Obrázek 73 - Nejvyšší napětí (kritické místo) – kombinace 1	61
Obrázek 74 – Rozložení redukovaného napětí - kombinace 2	61
Obrázek 75 - Nejvyšší napětí (kritické místo) – kombinace 2	62
Obrázek 76 - Rozložení redukovaného napětí - kombinace 3	62
Obrázek 77 - Nejvyšší napětí (kritické místo) – kombinace 3	63
Obrázek 78 - Rozložení redukovaného napětí - kombinace 4	63
Obrázek 79 - Zatěžovací stavy pro statické zkoušky [20]	64
Obrázek 80 - Graf průběhu únavové zkoušky [20].....	65

12 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní parametry podvozku 35T	6
Tabulka 2 - Základní parametry podvozku Eurotram [2]	7
Tabulka 3 - Základní parametry podvozku GT6N [2]	9
Tabulka 4 - Základní parametry podvozku CL606 [5]	11
Tabulka 5 - Základní parametry podvozku SF 1000 [6]	13
Tabulka 6 - Základní parametry podvozku EV09 [7]	15
Tabulka 7- Zhodnocení variant	28
Tabulka 8 - Parametry podvozku 26T	29
Tabulka 9 - Původní hmotnostní rozbor tramvaje 26T	47
Tabulka 10 - Kombinace zatížení	53

13 Seznam příloh

- Výkres odlitku podélníku

číslo výkresu: DP20.18.01

