



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

Vypružení vedení dvojkolí experimentálního  
podvozku

Suspension of wheelset guidance for an  
experimental bogie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
2020

Stanislav Čihák

Studijní program: B2341 STROJÍRENSTVÍ  
Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem  
Vedoucí práce: Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čihák** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **466689**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vypružení vedení dvojkolí experimentálního podvozku**

Název bakalářské práce anglicky:

**Suspension of wheelset guidance for an experimental bogie**

Pokyny pro vypracování:

1. Pro experimentální podvozek, který je součástí kladkového stavu pro simulaci jízdy kolejového vozidla v laboratoři ČVUT, proveďte rozbor možných řešení vypružení vedení dvojkolí vzhledem k natáčení dvojkolí kolem svislé osy. Jednotlivé varianty porovnejte.
2. U zvolené varianty navrhnete konstrukční řešení vypružení vedení dvojkolí a případných úprav experimentálního podvozku a vytvořte 3D CAD model.
3. Proveďte rozbor silových účinků a kontrolu dimenzování dílů.
4. Vypracujte sestavný výkres mechanismu a jeho zástavby do experimentálního podvozku.

Seznam doporučené literatury:

[1] Švejnoch V. a kol.: Teorie kolejových vozidel, [2] Kolář, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel, [3] CAD model a popis kladkového stavu a experimentálního podvozku, [3] normy, firemní literatura.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

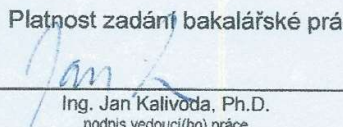
**Ing. Jan Kalivoda, Ph.D., Fakulta strojní**

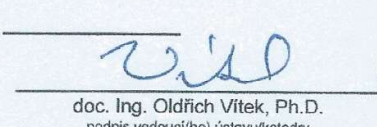
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

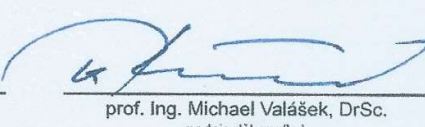
Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**29.4.2020**

Datum převzetí zadání



Podpis studenta



## Anotační záznam

Jméno autora: Stanislav Čihák

Název práce: Vypružení vedení dvojkolí experimentálního podvozku

Anglický název: Suspension of wheelset guidance for an experimental bogie

Rozsah práce:

- 40 stran
- 41 obrázků
- 9 tabulek
- 0 grafů

Akademický rok: 2019/2020

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.

Klíčová slova: Kladkový stav ČVUT, experimentální podvozek, vypružení vedení dvojkolí

Key words: CTU roller rig, experimental bogie, suspension of wheelset guidance



## Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je navrhnout konstrukční řešení vypružení vedení dvojkolí experimentálního podvozku vzhledem k natáčení kolem svislé osy. Experimentální podvozek je součástí kladkového stavu ČVUT, což je experimentální zařízení sloužící k simulaci jízdy kolejových vozidel v laboratorních podmínkách. Náplní práce je navržení několika možných řešení vypružení natáčení dvojkolí kolem svislé osy, zvolení vhodné varianty a navržení jejího konstrukčního provedení.

## Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to design a constructional solution for the suspension of wheelset guidance for an experimental bogie with respect to turning around the vertical axis. The experimental bogie is a part of the CTU roller rig, which is an experimental device used to simulate the running of rail vehicles in laboratory conditions. The scope of work is to design several possible solutions for the suspension of the rotation of wheelsets around the vertical axis, to choose the most suitable design variant and to design its constructional solution.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou na téma: “ Vypružení vedení dvojkolí experimentálního podvozku ” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne:

.....

(podpis autora)



## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Kalivodovi, Ph.D. za odborné vedení, veškeré rady, připomínky a čas věnovaný konzultacím při tvorbě mé bakalářské práce. Zároveň bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.



## Obsah

|  |    |
|--|----|
| 1 Úvod.....  | 9  |
| 1.1 Kladkový stav ČVUT .....   | 9  |
| 1.2 Experimentální podvozek.....   | 10 |
| 1.2.1 Mechanismus natáčení dvojkolí.....   | 11 |
| 1.3 Problematika bakalářské práce .....  | 12 |
| 2 Návrh řešení vypružení vedení dvojkolí kolem svislé osy .....                                      | 13 |
| 2.1 a) Vypružení mezi třmenem dvojkolí a rámem podvozku.....   | 13 |
| 2.1.1 Vypružení jako dorazy třmenů dvojkolí.....   | 14 |
| 2.2 b) Vypružení z vnějšku na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí.....                              | 15 |
| 2.2.1 Nahrazení aretačního táhla .....   | 15 |
| 2.3 c) Vypružení uvnitř konstrukce podvozku na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí...               | 16 |
| 2.4 Volba řešení vypružení pro experimentální podvozek.....  | 17 |
| 3 Návrh konstrukčního řešení vypružení natáčení vedení dvojkolí kolem svislé osy .....               | 18 |
| 3.1 Koncepční návrh vypružení .....  | 18 |
| 3.2 Návrh pružin pružícího prvku .....   | 19 |
| 3.2.1 Výpočet maximální síly v pružícím prvku .....  | 19 |
| 3.2.2 Výpočet maximálního zdvihu pružícího prvku .....   | 20 |
| 3.2.3 Výpočet tuhosti pružin .....   | 22 |
| 3.2.4 Volba pružiny .....  | 22 |
| 4 Konstrukce pružícího prvku .....   | 23 |
| 4.1 Táhlo pružícího prvku .....  | 24 |
| 4.1.1 Kontrola tyče táhla pružícího prvku .....  | 24 |
| 4.2 Usazení pružin .....   | 25 |
| 4.3 Kryt pružícího prvku.....  | 26 |
| 4.4 Kloubové hlavice.....  | 27 |
| 5 Montáž pružícího prvku.....  | 29 |
| 6 Konstrukce kliky vypružení .....   | 30 |
| 6.1 Kontrola čepového spojení kliky vypružení a pružícího prvku .....                                | 31 |
| 7 Zástavba vypružení natáčení vedení dvojkolí kolem svislé osy do experimentálního<br>podvozku ..... | 32 |
| 7.1 Spojení vypružení s hřídelí mechanismu natáčení dvojkolí.....                                    | 33 |



|  |    |
|--|----|
| 7.2 Spojení vypružení s rámem podvozku.....                    | 35 |
| 7.2.1 Kontrola čepového spojení konzoly a pružícího prvku..... | 36 |
| 8 Závěr .....  | 37 |
| 9 Seznam obrázků.....  | 38 |
| 10 Seznam tabulek .....  | 39 |
| 11 Seznam příloh .....   | 39 |
| 12 Použitá literatura .....                                    | 40 |





# 1 Úvod

## 1.1 Kladkový stav ČVUT

Kladkový stav ČVUT je zařízení sloužící k simulaci jízdy železničního podvozku na kolejích a posuzování silových účinků vozidla na trať. Nachází se v laboratořích ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel na Julisce. Kladkový stav umožňuje simulovat jízdu v přímé trati nebo v oblouku až do minimálního poloměru oblouku tratě 15 metrů.

Kladkový stav vznikl na začátku 90-tých let minulého století. Byl postupně podroben mnoha úpravám v závislosti na projektech, ve kterých byl používán. Vyroben byl v měřítku 1:3,5, což zůstalo nezměněné až dodnes. [1]

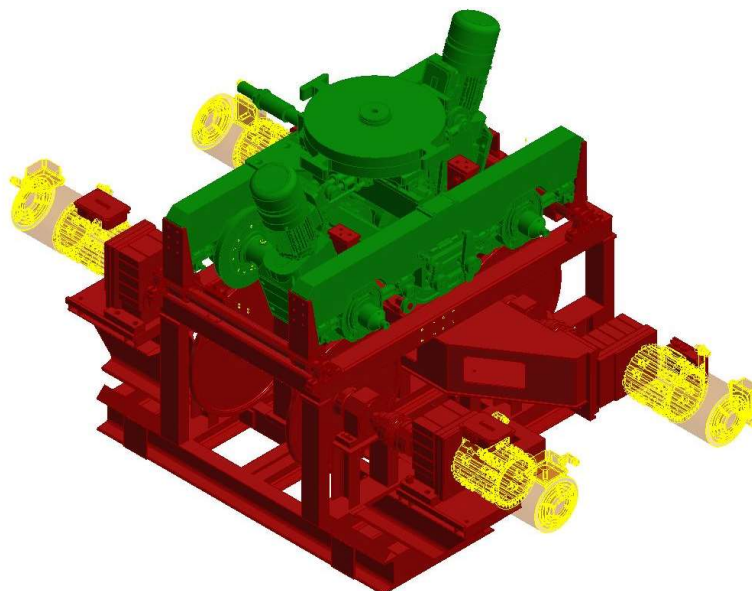
Aktuální stav kladkového stavu ČVUT lze vidět na Obr. 1.



*Obr. 1 – Fotografie aktuálního stavu kladkového stavu ČVUT*

Hlavní části kladkového stavu ČVUT jsou experimentální podvozek a samotný kladkový stav (viz Obr. 2), který se skládá ze svařovaného rámu a dvou párů poháněných kladek.

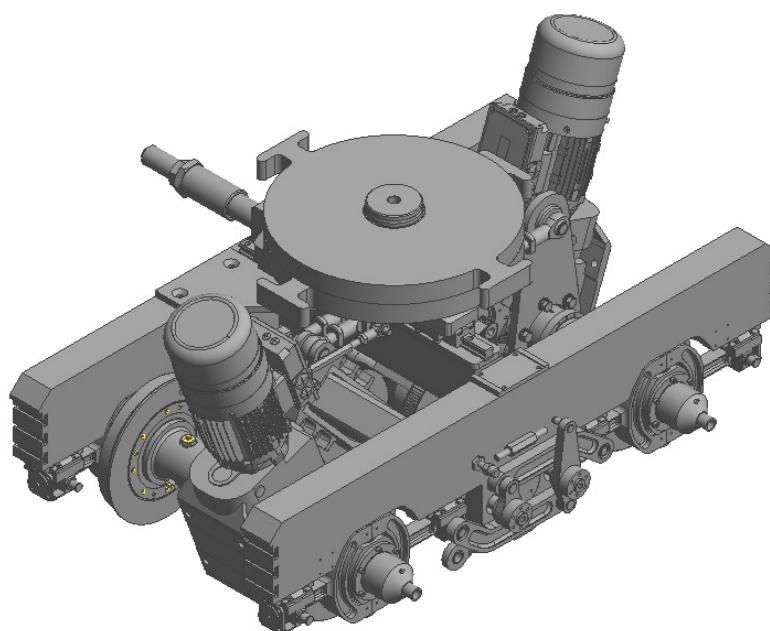
Princip simulace jízdy po železniční trati spočívá v nahrazení kolejnic kladek s profilem kolejnice na obvodě. Na vrcholcích kladek spočívá experimentální podvozek. Otáčením kladek je simulován pohyb podvozku po kolejnicích. Natáčením kladek kolem svislé osy lze simulovat zakřivení trati.



*Obr. 2 – 3D model Kladkového stavu ČVUT (experimentální podvozek – zeleně, kladkový stav – červeně)*

## 1.2 Experimentální podvozek

Aktuální verze experimentálního podvozku vznikla v roce 2015 (Obr. 3). Rám podvozku je uspořádán do „H“. Skládá se ze dvou podélníků a jednoho příčnicku, které jsou vyrobeny z hliníkových slitin. Dvojkolí experimentálního podvozku může být konvenční nebo s nezávisle otočnými koly. K rámu podvozku jsou dvojkolí upevněna pomocí mechanismu natáčení dvojkolí. Součástí podvozku je také sada závaží, která simuluje svislé zatížení způsobené hmotností skříně lokomotivy nebo vozu. [2]



*Obr. 3 – 3D model experimentálního podvozku*

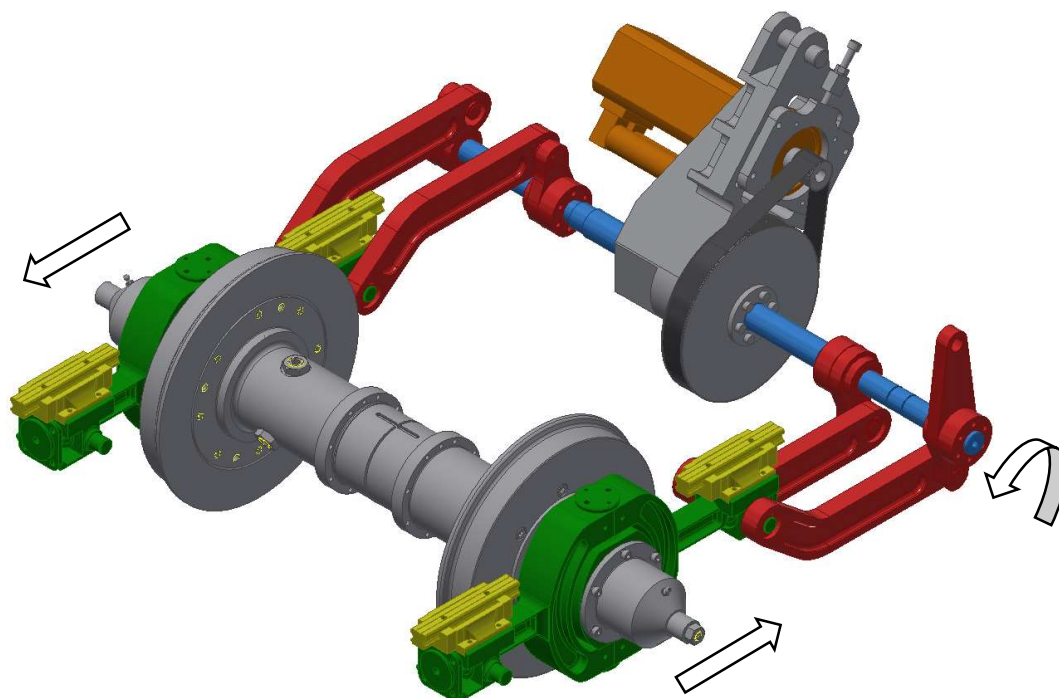


### 1.2.1 Mechanismus natáčení dvojkolí

Mechanismus natáčení dvojkolí (Obr. 4) umožňuje natáčet dvojkolí vůči rámu podvozku. Využívá se při jízdě obloukem pro snížení vodících sil. Každé dvojkolí je ovládáno samostatně.

Ložiskové komory dvojkolí jsou upevněny ke třmenům. Ty se mohou pohybovat vodorovně pomocí lineárních vedení, která jsou umístěna na spodní části podélníku. Třmeny jsou zároveň napojeny pomocí táhel na hřídel, která se nachází ve střední části podvozku. Hřídel je ozubeným řemenem napojena na servomotor.

Otáčením hřídele dojde k posuvu třmenů, které jsou ke hřídeli napojeny tak, aby se při jeho otáčení každý třmen posouval na opačnou stranu. Posuv třmenů následně způsobí natáčení dvojkolí kolem svislé osy. [1]



Obr. 4 – Mechanismus natáčení dvojkolí (třmeny – zeleně, lineární vedení – žlutě, táhla – červeně, hřídel – modře, servomotor – oranžově)



### 1.3 Problematika bakalářské práce

S ohledem na mechanismus natáčení dvojkolí funguje experimentální podvozek ve dvou nastaveních. V prvním nastavení je mechanismus natáčení dvojkolí zablokovan tuhým táhlem a zabraňuje dvojkolí v natáčení kolem svislé osy. Simulován je tak podvozek s tuze vedenou nápravou vůči rámu podvozku. V druhém nastavení je mechanismus natáčení dvojkolí uvolněn a je možné servomotorem ovládat natočení dvojkolí podvozku kolem svislé osy. Tato dvě nastavení umožňují při simulaci průjezdu v oblouku sledovat rozdíl působících sil mezi tratí a podvozkem při použití podvozku s tuze vedenou nápravou vůči rámu podvozku, nebo podvozku s možností natáčení náprav.

Protože tato nastavení zcela neodpovídají obvykle používaným podvozkům kolejových vozidel, je cílem této bakalářské práce navrhnout nastavení, u kterého nebudou nápravy vůči podvozku vedeny zcela tuze, ale bude umožněno natáčení náprav neovládané z vnějšku, které bude omezováno v závislosti na míře natočení náprav. Toho bude docíleno zavedením vypružení do konstrukce experimentálního podvozku, které bude vytvářet vratnou sílu působící proti natáčení náprav kolem svislé osy.



## 2 Návrh řešení vypružení vedení dvojkolí kolem svislé osy

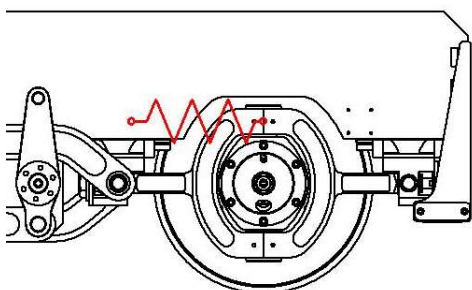
Prvním krokem návrhu konstrukčního řešení vypružení vedení dvojkolí bylo navržení možných variant a následně volba nevhodnější varianty. Z hlediska umístění na experimentálním podvozku je možné několik řešení:

- Wypružení mezi třmenem dvojkolí a rámem podvozku
- Wypružení z vnějšku na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí
- Wypružení uvnitř konstrukce podvozku na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí

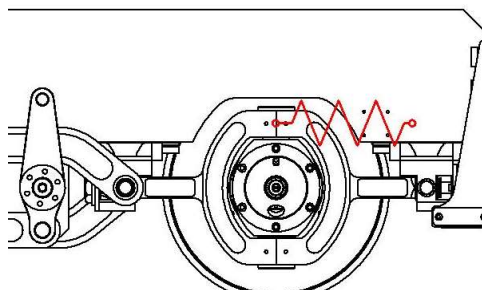
### 2.1 a) Wypružení mezi třmenem dvojkolí a rámem podvozku

Prvním z možných řešení wypružení je umístit pružící prvek mezi třmen dvojkolí a rám podvozku. Posouváním třmenu vlivem natáčení dvojkolí by došlo ke stlačování nebo natahování pružícího prvku, čímž by vznikla vratná síla, která by působila proti posuvné síle třmenu. Možných je několik konfigurací (Červeně je naznačena možná poloha wypružení.):

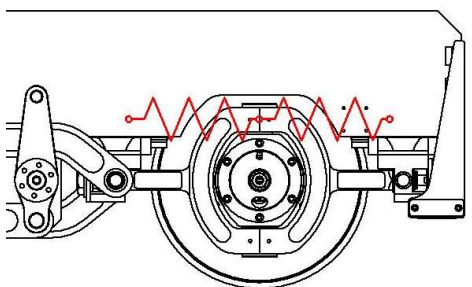
- varianta A1 – pružící prvek vodorovně, směrem dovnitř (Obr. 5)
- varianta A2 – pružící prvek vodorovně, směrem ven (Obr. 6)
- varianta A3 – dva pružící prvky vodorovně (Obr. 7)
- varianta A4 – dva pružící prvky šikmo (Obr. 8)
- varianta A5 – pružící prvek vodorovně, spojen se středovou částí podélníku (Obr. 9)



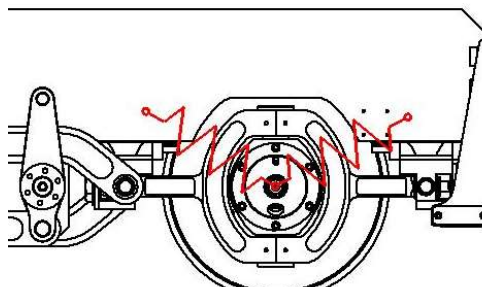
Obr. 5 – Návrh wypružení, varianta A1



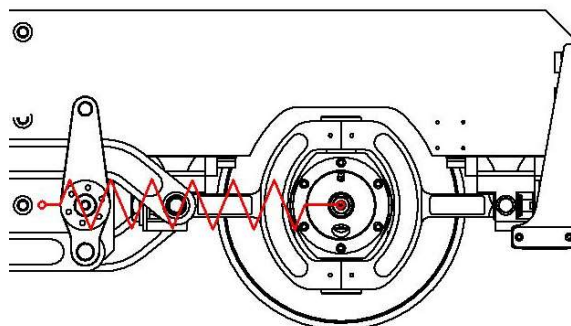
Obr. 6 – Návrh wypružení, varianta A2



Obr. 7 – Návrh wypružení, varianta A3



Obr. 8 – Návrh wypružení, varianta A4

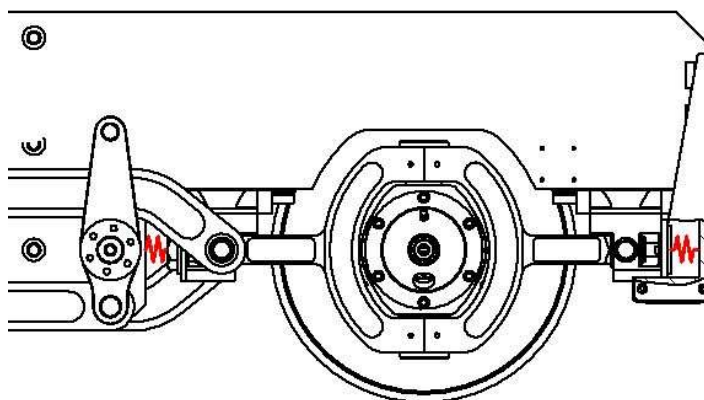


Obr. 9 – Návrh vypružení, varianta A5

Výhodou umístění vypružení z vnějšku konstrukce při použití těchto variant je dobrá přístupnost při montáži, demontáži a údržbě vypružení. Umístění z vnějšku by ale zároveň způsobovalo zvětšování celkového objemu konstrukce kladkového stavu. U většiny variant není pružící prvek umístěn ve stejné vodorovné rovině s osami dvojkolí, což by způsobovalo nepříznivá silová působení na podvozek.

### 2.1.1 Vypružení jako dorazy třmenů dvojkolí

Jednou z dalších variant řešení a) je varianta A6 (Obr. 10). Na oba konce třmenů by byly umístěny pružící prvky ve formě dorazů. Ty by mohly být například ve formě pružin nebo pryžových prvků. Jejich stlačováním při posuvu třmenů dvojkolí by opět vznikala požadovaná vratná síla proti natáčení dvojkolí.



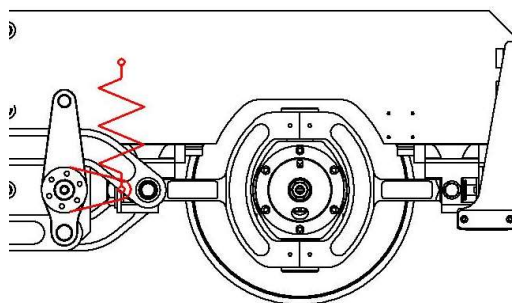
Obr. 10 – Návrh vypružení varianta A6

Na rozdíl od předchozích variant je u této varianty pružící prvek umístěn ve stejné vodorovné rovině jako osy dvojkolí, takže by působil přímo proti síle posouvajícího se třmenu. Svým umístěním by také příliš nepřispíval k celkovému zvětšování konstrukce kladkového stavu. Nevýhodou je poměrně malý prostor k samotnému konstrukčnímu řešení.



## 2.2 b) Vypružení z vnějšku na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí

Ve variantě B1 je pružící prvek upevněn jedním koncem k rámu podvozku a druhým koncem k hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí pomocí krátké kliky (Obr. 11). Rotací hřídele při natáčení dvojkolí kolem svislé osy by došlo k natáčení kliky, což by způsobilo stlačování nebo natahování pružícího prvku upevněného k rámu podvozku. Stlačováním a natahováním pružícího prvku by opět došlo ke vzniku hledané vratné síly.



Obr. 11 – Návrh vypružení, varianta B1

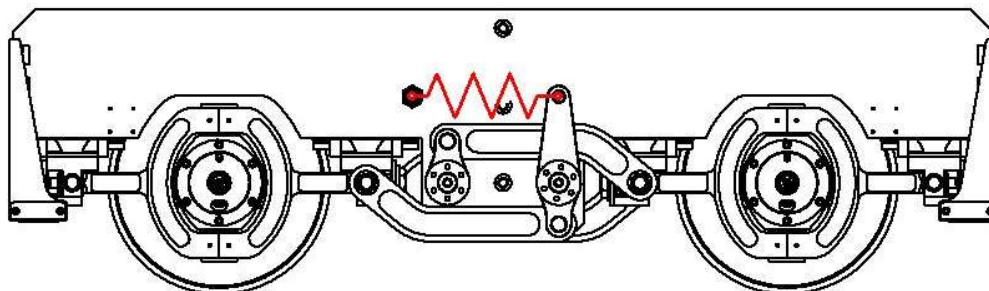
Podobně jako u řešení a) je umístění této varianty vypružení z vnějšku výhodně vzhledem k přístupnosti vypružení, ale méně výhodné kvůli zvětšování rozměrů kladkového stavu.

Protože je pružící prvek napojen přímo na hřídel mechanismu natáčení dvojkolí, nezáleží už na orientaci pružícího prvku vzhledem k vodorovné rovině procházející osami dvojkolí. Důležitější by v této variantě byla orientace pružícího prvku vzhledem ke klice, kterou je napojen na hřídel.

### 2.2.1 Nahrazení aretačního táhla

Aretační táhlo slouží k zablokování mechanismu natáčení dvojkolí při simulaci jízdy podvozku s tuze vedenou nápravou vůči rámu podvozku. Jeho uvolněním dojde k odblokování mechanismu natáčení dvojkolí, čímž je umožněno natáčení dvojkolí.

U varianty B2 je nahrazeno aretační táhlo pružícím prvkem (Obr. 12). Při natáčení dvojkolí by místo zablokování mechanismu natáčení dvojkolí došlo ke stlačování nebo natahování pružícího prvku, a tedy vzniku požadované vratné síly.



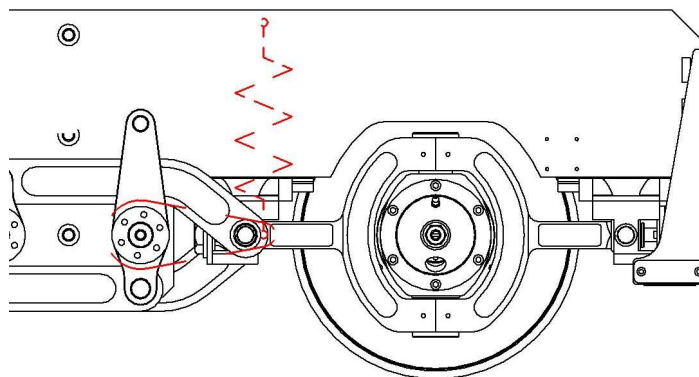
Obr. 12 – Návrh vypružení, varianta B2



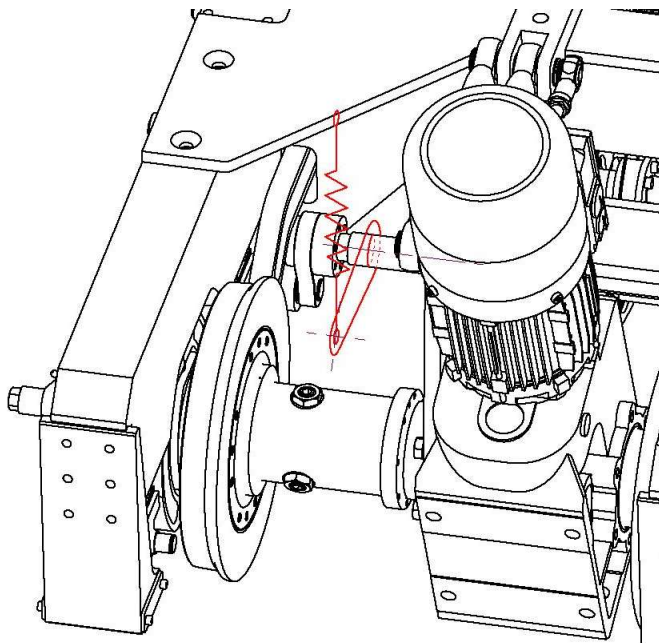
Aby byla zachována možnost zablokování mechanismu natáčení dvojkolí, bylo by nutné zavést nový prvek konstrukce, který by umožnil aretaci mechanismu natáčení dvojkolí při simulaci jízdy podvozku s tuze vedenou nápravou vůči rámu podvozku, nebo zajistit dostatečně snadnou výměnu vypružení a aretačního táhla na základě požadavků simulace.

### 2.3 c) Vypružení uvnitř konstrukce podvozku na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí

Varianta vypružení C1 se funkčně velmi podobá řešení b). Pružící prvek je opět napojen klikou na hřídel mechanismu natáčení dvojkolí a zároveň upevněn k rámu podvozku. Stejně jako u předchozího řešení by vratná síla vznikala natahováním a stlačováním pružícího prvku při otáčení hřídele mechanismu natáčení dvojkolí. Hlavním rozdílem je umístění samotného vypružení. Namísto umístění z vnějšku se vypružení nachází uvnitř konstrukce podvozku (Obr. 13 a Obr. 14).



Obr. 13 – Návrh vypružení, varianta C1, pohled z boku



Obr. 14 – Návrh vypružení, varianta C1, pohled do vnitřku experimentálního podvozku





Podobně jako u řešení b) není zásadní orientace pružícího prvku vzhledem k vodorovné rovině procházející osami dvojkolí, ale orientace pružícího prvku vůči klice, kterou je napojeno na hřídel mechanismu natáčení dvojkolí. Protože je vypružení umístěno uvnitř konstrukce podvozku, nepřispívá tak ke zvětšování celkového objemu konstrukce podvozku. Horší ovšem může být přístupnost vypružení při montáži, demontáži a údržbě.

## 2.4 Volba řešení vypružení pro experimentální podvozek

Po uvážení všech variant jsem vzhledem k rozměrovým a konstrukčním vlastnostem podvozku zvolil variantu C1, tj. umístění vypružení uvnitř konstrukce experimentálního podvozku na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí.



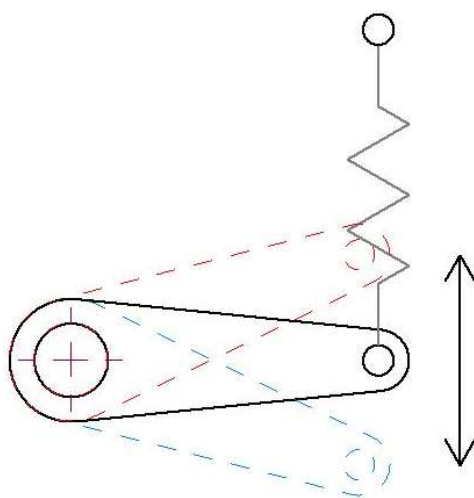
### 3 Návrh konstrukčního řešení vypružení natáčení vedení dvojkolí kolem svislé osy

#### 3.1 Koncepční návrh vypružení

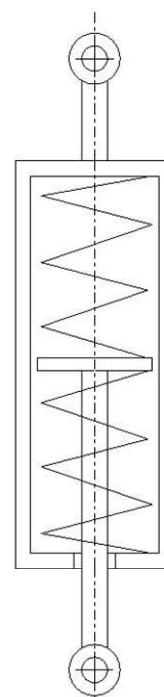
Vypružení se skládá ze dvou hlavních částí, kliky vypružení a pružícího prvku (Obr. 15). Klika je umístěna na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí. Ke klice je připojen jedním koncem pružící prvek, který je druhým koncem připojen k rámu podvozku.

Pružící prvek je natahován a stlačován v závislosti na směru otáčení hřídele mechanismu natáčení dvojkolí. Aby to bylo možné, jsou použity dvě tlačné pružiny. Pružiny jsou umístěny v rozebíratelném krytu, do kterého vede z vnějšku táhlo s osazením, na kterém jsou usazeny obě pružiny (Obr. 16). Táhlo je spojeno s klikou vypružení a kryt je upevněn k rámu podvozku. Natáčením kliky dochází k vysouvání nebo zasouvání táhla, které stlačuje pružiny uvnitř krytu pružícího prvku.

První součásti vypružení, která byla navrhována, byly proto pružiny pružícího prvku.



Obr. 15 – Schéma funkce vypružení



Obr. 16 – Schéma návrhu konstrukce vypružení



## 3.2 Návrh pružin pružícího prvku

Pro určení vhodných pružin pro pružící prvek bylo nutné nejprve určit jejich základní parametry. V tomto případě byly nejdůležitější zdvih pružin, jejich tuhost a maximální síla, která bude na pružiny působit. Pro výpočet byly k dispozici parametry experimentálního podvozku viz Tab. 1.

|   |                              |
|---|------------------------------|
| Maximální hmotnost experimentálního podvozku                  | $m = 1050 \text{ kg}$        |
| Minimální poloměr oblouku                                     | $R_{\min} = 15 \text{ m}$    |
| Maximální úhel natočení dvojkolí                              | $\alpha = 3^\circ$           |
| Součinitel tření mezi kolem a kladkou                         | $f = 0,4$                    |
| Vzdálenost styčných kružnic                                   | $2 \cdot s = 429 \text{ mm}$ |
| Příčná vzdálenost třmenů dvojkolí                             | $2 \cdot w = 560 \text{ mm}$ |
| Osová vzdálenost kliky a hřídele mechanismu natáčení dvojkolí | $a = 52 \text{ mm}$          |

Tab. 1 – Parametry experimentálního podvozku

Důležitý parametr pro výpočty byla také délka kliky vypružení. Tento rozměr je důležitý, protože dává prostor pro optimalizaci návrhových výpočtů. Pro výpočet konečného návrhu pružin byla uvažována délka kliky vypružení  $c = 45 \text{ mm}$ .

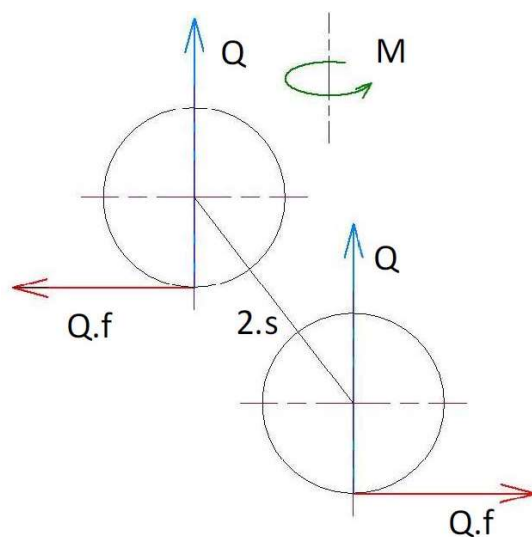
### 3.2.1 Výpočet maximální síly v pružícím prvku

Síla působící na pružící prvek vychází z hmotnosti podvozku. Nejprve byla vypočítána síla  $Q$  působící na jedno kolo dvojkolí podvozku. Síly působící na dvojkolí jsou vyobrazeny na Obr. 17.

$$Q = \frac{m \cdot g}{4} = 2575 \text{ N} \quad (1)$$

Poté byl vypočítán maximální moment  $M$  působící na dvojkolí kolem osy z.

$$M = Q \cdot f \cdot 2 \cdot s = 442 \text{ Nm} \quad (2)$$



Obr. 17 – Síly ve dvojkolí



Pomocí vypočteného momentu  $M$  byla určena síla ve třmenech  $F_1$ .

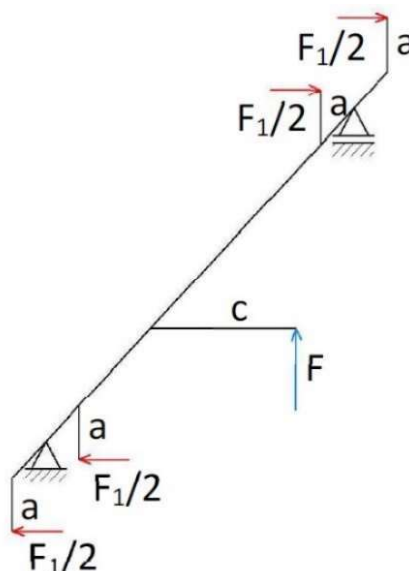
$$M = Q \cdot f \cdot 2 \cdot s = F_1 \cdot 2 \cdot w \quad (3)$$

$$F_1 = \frac{M}{2 \cdot w} = 789 \text{ N} \quad (4)$$

Po určení síly působící ve třmenech dvojkolí, bylo možné vypočítat maximální sílu na klice vypružení, tj. maximální sílu v pružícím prvku. Ta byla vypočítána pomocí momentové rovnováhy hřídele mechanismu natáčení dvojkolí (Obr. 18).

$$F \cdot c - 2 \cdot F_1 \cdot a = 0 \quad (5)$$

$$F = \frac{2 \cdot F_1 \cdot a}{c} = 1824 \text{ N} \quad (6)$$



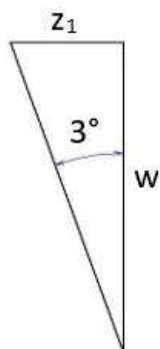
Obr. 18 – Momentová rovnováha hřídele mechanismu natáčení dvojkolí

### 3.2.2 Výpočet maximálního zdvihu pružícího prvku

Maximální zdvih pružícího prvku z odpovídá délce stlačení nebo natažení pružícího prvku při maximálním natočení dvojkolí z neutrální polohy.

Maximální zdvih pružícího prvku z byl přepočítáván z maximálního natočení dvojkolí a rozměrů podvozku. Z velikosti úhlu natočení dvojkolí a příčné vzdálenosti třmenů dvojkolí byl vypočítán podélný posuv třmenu  $z_1$  (Obr. 19).

$$z_1 = w \cdot \operatorname{tg}(3^\circ) = 14,7 \text{ mm} \quad (7)$$

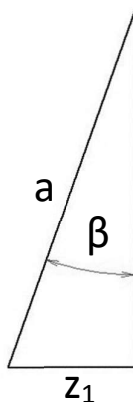


Obr. 19 – Schéma výpočtu posuvu třmenu dvojkolí

Ze zjištěného posuvu třmenu byl spočítán úhel  $\beta$ , o který se natočí hřídel mechanismu natočení dvojkolí při maximálním natočení dvojkolí (Obr. 20).

$$\sin \beta = \frac{z_1}{a} \quad (8)$$

$$\beta = \arcsin \left( \frac{z_1}{a} \right) = 16,4^\circ \quad (9)$$

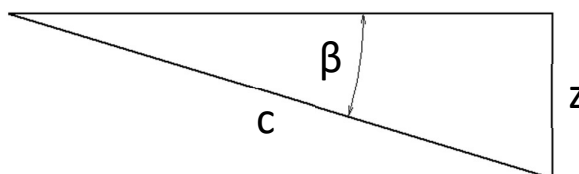


Obr. 20 – Schéma výpočtu úhlu  $\beta$

Pomocí úhlu  $\beta$  pak byl stejným způsobem vypočítán maximální zdvih vypružení  $z$  (Obr. 21).

$$\sin \beta = \frac{z}{c} \quad (10)$$

$$z = \arcsin(\beta) \cdot c = 12,8 \text{ mm} \quad (11)$$



Obr. 21 – Schéma výpočtu zdvihu  $z$



### 3.2.3 Výpočet tuhosti pružin

Z vypočítaných hodnot maximálního zdvihu pružiny a maximální síly v pružině bylo možné vypočítat potřebnou tuhost pružiny. Aby nedocházelo k uvolnění pružiny, která nebude přímo stlačována, musí být obě pružiny neustále stlačeny alespoň o jednu délku zdvihu  $z$ . Z tohoto důvodu byl při výpočtu tuhosti uvažován dvojnásobný zdvih, který zároveň odpovídá celkovému zdvihu pružícího prvku. Je označován  $z_c$ .

$$k = \frac{F}{2 \cdot z} = \frac{F}{z_c} = 70,8 \text{ N/mm} \quad (12)$$

### 3.2.4 Volba pružiny

Na základě vypočtených hodnot maximální síly v pružícím prvku  $F = 1824 \text{ N}$ , tuhosti pružiny  $k = 70,8 \text{ N/mm}$  a celkového zdvihu pružícího prvku  $z_c = 25,6 \text{ mm}$  byla zvolena pružina s parametry dle Tab. 2 z katalogu firmy Mateza spol. s. r. o. [3].

Při volbě pružiny byla porovnávána maximální síla v pružícím prvku  $F$  se silou vyvinutou při maximálním stlačení pružiny  $F_n$  s podmínkou, že  $F$  nesmí být větší než  $F_n$ . Zvolená pružina tuto podmínku splňuje. Vypočtená tuhost  $k$  byla porovnávána se skutečnou tuhostí pružin  $c$ , s cílem dosažení co nejmenšího rozdílu mezi vypočtenou a skutečnou hodnotou tuhosti pružiny. S ohledem na celkový zdvih pružícího prvku  $z_c$ , byla hledána pružina, která by umožnila stlačení rovnající se nebo větší, než je celkový zdvih pružícího prvku  $z_c$ . Maximální stlačení pružiny se rovná rozdílu délky pružiny ve volném stavu  $L_o$  a délky pružiny při maximálním stlačení  $L_n$ . Maximální stlačení zvolené pružiny se rovná 25,9 mm, je tedy větší než celkový zdvih pružícího prvku  $z_c$ .

Na základě provedených porovnání vypočtených hodnot pružícího prvku se skutečnými parametry pružiny bylo rozhodnuto, že zvolená pružina je vyhovující.

|  |            |
|--|------------|
| tloušťka drátu $d$                             | 6,3 mm     |
| Průměr pružiny od středu ke středu $D_m$       | 40 mm      |
| Délka pružiny ve volném stavu $L_o$            | 60 mm      |
| Délka pružiny při max. stlačení $L_n$          | 34,1 mm    |
| Průměr trnu                                    | 32,6 mm    |
| Vnitřní průměr pouzdra                         | 47,4 mm    |
| Síla vyvinutá pružinou při max. stlačení $F_n$ | 1854,10 mm |
| Tuhost pružiny $c$                             | 71,64 N/mm |
| Počet činných závitů                           | 3,5        |
| Celkový počet závitů                           | 5          |

Tab. 2 – Parametry pružiny dle [3]

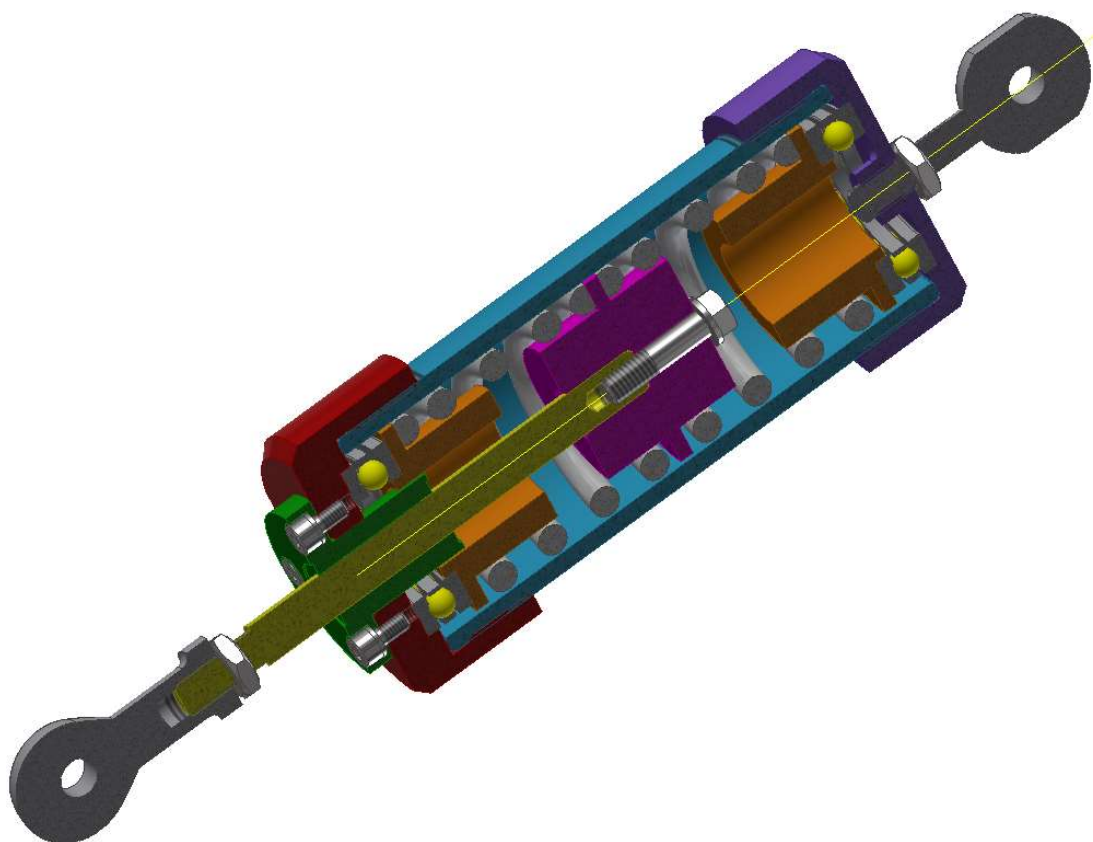


## 4 Konstrukce pružícího prvku

S ohledem na rozměry pružin a rozměry experimentálního podvozku byla vytvořena konstrukce pružícího prvku pro vypružení vedení dvojkolí při natáčení dvojkolí kolem svislé osy. Pružící prvek se skládá z několika hlavních částí: dvou pružin, táhla, usazení pružin s axiálními ložisky, krytu s lineárním ložiskem a dvou kloubových hlavíc. 3D model pružícího prvku viz Obr. 22 a Obr. 23.



Obr. 22 – 3D model pružícího prvku



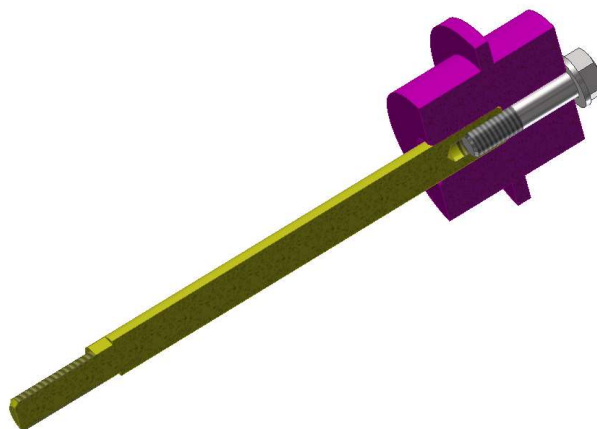
Obr. 23 – 3D model pružícího prvku v polovičním řezu



## 4.1 Táhlo pružícího prvku

Účelem táhla pružícího prvku je přenos sil z momentů působících na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí na pružiny uvnitř pružícího prvku. Skládá se ze dvou ocelových dílců: tyče a trnu viz Obr. 24.

Tyč vchází dovnitř pružícího prvku lineárním ložiskem umístěným na spodní části krytu pružícího prvku. Vnější konec tyče je zakončen závitem pro našroubování kloubové hlavice a vnitřní konec je zapaščen do trnu. Tyč s trnem je spojena šroubovým spojem v ose pružícího prvku. Trn slouží k vymezení polohy pružin a zajištění přenosu tlačné síly z tyče na pružiny.



Obr. 24 – Poloviční řez táhlem (tyč – žlutě, trn – purpurově)

### 4.1.1 Kontrola tyče táhla pružícího prvku

Abychom bylo ověřeno, zda jsou zvolené rozměry tyče táhla pružícího prvku vyhovující, byla provedena kontrola tyče na tah a vzpěr.

Napětí v tyči bylo vypočítáno dle rovnice (13). Tyč je kruhového průřezu o velikosti průměru  $d = 10$  mm. Maximální síla působící na tyč odpovídá maximální síle ve vypružení  $F = 1824$  N.

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = 23,2 \text{ MPa} \quad (13)$$

Vypočítané napětí  $\sigma$  bylo poměřováno s mezí kluzu materiálu tyče. Jedná se o ocel 11 373 s mezí kluzu  $Re = 250$  MPa. Poměrem meze kluzu a napětí v tyči byla zjištěna velikost bezpečnosti napětí v tahu  $k_\sigma$ .

$$k_\sigma = \frac{Re}{\sigma} = 10,8 \quad (14)$$





Pro kontrolu tyče na vzpěr byla počítána kritická síla  $F_{kr}$ , které byla porovnávána s maximální silou v pružícím prvku  $F$ . Kritická síla byla vypočítána pro II. tvar vzpěru dle rovnice (16). Modul pružnosti oceli 11 373 je  $E = 2,05 \cdot 10^5$  MPa, délka tyče je  $l = 114,1$  mm. Kvadratický moment průřezu tyče  $J$  byl určen dle rovnice (15).

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = 490,9 \text{ mm}^4 \quad (15)$$

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{l^2} = 76\,287 \text{ N} \quad (16)$$

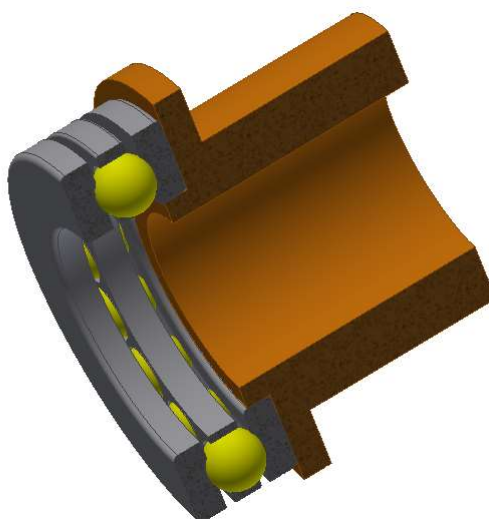
Dle rovnice (17) byla vypočítána bezpečnost proti vzpěru  $k_{F_{kr}}$  poměrem kritické síly vzpěru  $F_{kr}$  a maximální síly v pružícím prvku  $F$ .

$$k_{F_{kr}} = \frac{F_{kr}}{F} = 41,8 \quad (17)$$

Výpočtem kontrol tyče pružícího prvku na tah a vzpěr bylo ověřeno, že velikosti bezpečností  $k_{\sigma}$  a  $k_{F_{kr}}$  jsou dostatečné. Rozměry a mechanické vlastnosti materiálu tyče táhla vypružení jsou proto vyhovující.

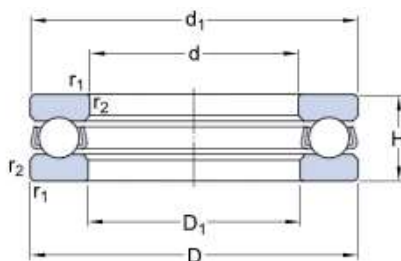
## 4.2 Usazení pružin

Poloha pružin je na vnějších koncích vnitřku pružícího prvku zajištěna pomocí ocelových trubkových dílců s osazením (Obr. 25). Ty jsou usazeny na axiálních ložiscích. Účelem zavedení axiálních ložisek je zamezení zkroucení pružin při zašroubování krytu pružícího prvku.



Obr. 25 – Usazení pružiny s axiálním ložiskem (usazení – oranžově)

Axiální ložisko bylo voleno z katalogu firmy SKF [4]. Jedná se o axiální kuličkové ložisko SKF 51104 (Obr. 26). Parametry ložiska viz Tab. 3.



Obr. 26 – Schéma axiálního ložiska SKF 51104 [4]

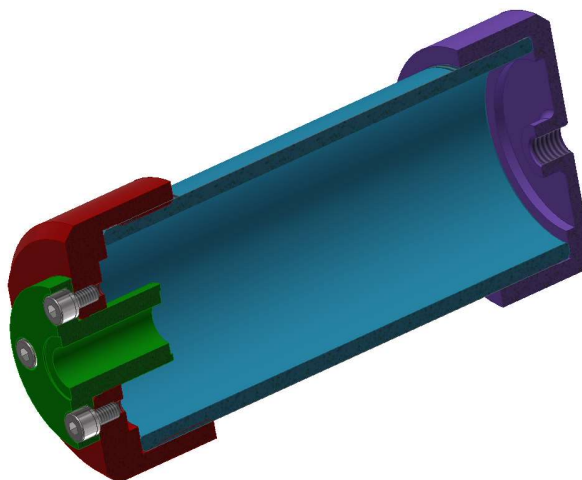
|                                  |         |
|----------------------------------|---------|
| d                                | 20 mm   |
| D                                | 35 mm   |
| H                                | 10 mm   |
| d <sub>1</sub>                   | 35 mm   |
| D <sub>1</sub>                   | 21 mm   |
| r <sub>1,2</sub>                 | 0,3 mm  |
| Dynamická únosnost C             | 15 kN   |
| Statická únosnost C <sub>0</sub> | 15,1 kN |

Tab. 3 – Parametry axiálního ložiska SKF 51104 [4]

Statická únosnost axiálního ložiska  $C_0$  je větší než maximální síla v pružicím prvku  $F = 1824$  N, ložisko je proto vyhovující.

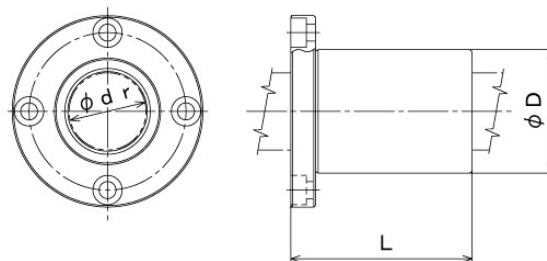
### 4.3 Kryt pružícího prvku

Kryt pružícího prvku se skládá ze tří částí: válce a dvou matic (Obr. 27). Matice jsou válcového tvaru, z jedné strany uzavřené. Vnitřní strana matic je uzpůsobena k usazení axiálních ložisek. Do vrchní matice bude zašroubována kloubová hlavice. Spodní matice je uzpůsobena pro zavedení lineárního ložiska, kterým prochází tyč táhla do vnitřku krytu.



Obr. 27 – Kryt vypružení (válec – modře, horní matice – fialově, spodní matice – červeně, lineární ložisko – zeleně)

Lineární ložisko bylo voleno vzhledem k průměru tyče táhla a celkovým rozměrům pružícího prvku. Zvoleno bylo lineární ložisko s kulatou přírubou LMF 10 (Obr. 28) dle katalogu firmy THK [5]. Parametry ložiska dle Tab. 4.



Obr. 28 – Schéma lineárního ložiska LMF 10 [5]

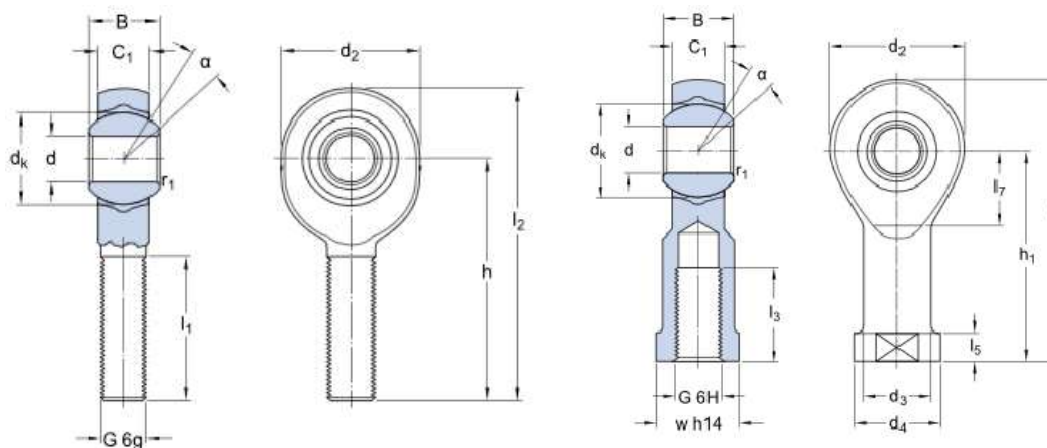
|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| dr                               | 10 mm |
| D                                | 19 mm |
| L                                | 29 mm |
| D <sub>1</sub>                   | 39 mm |
| Dynamická únosnost C             | 373 N |
| Statická únosnost C <sub>0</sub> | 549 N |

Tab. 4 – Parametry lineárního ložiska LMF 10 [5]

#### 4.4 Kloubové hlavice

Kloubové hlavice slouží ke spojení pružícího prvku s rámem podvozku a hřídele mechanismu natáčení dvojkolí přes kliku vypružení. Spojení je provedeno pomocí čepu.

Pro konstrukci pružícího prvku byly použity kloubové hlavice firmy SKF [4]. Upevnění kloubových hlavic na pružícím prvku je realizováno pomocí závitového spojení. Pro spojení pružícího prvku s rámem podvozku byla použita kloubová hlavice s vnějším závitem SALKB 8 F (Obr. 29) našroubovaná na vrchní matici krytu pružícího prvku. Pro spojení pružícího prvku s klikou vypružení byla použita kloubová hlavice s vnitřním závitem SIKB 8 F (Obr. 30) našroubovaná na tyč táhla pružícího prvku.



Obr. 29 – Schéma kloubové hlavice SALKB 8 F [4] Obr. 30 – Schéma kloubové hlavice SIKB 8 F [4]



Parametry kloubových hlavic viz Tab. 5 dle [4].

|                                  | SALKB 8 F | SIKB 8 F |
|----------------------------------|-----------|----------|
| d                                | 8 mm      | 8 mm     |
| d <sub>2</sub>                   | 25 mm     | 25 mm    |
| B                                | 12 mm     | 12       |
| G                                | M 8       | M 8      |
| C <sub>1</sub>                   | 9,5 mm    | 9,5 mm   |
| h                                | 42 mm     | -        |
| h <sub>1</sub>                   | -         | 36 mm    |
| α                                | 14°       | 14°      |
| d <sub>k</sub>                   | 15,8 mm   | 15,8 mm  |
| d <sub>3</sub>                   | -         | 12,5 mm  |
| d <sub>4</sub>                   | -         | 17 mm    |
| l <sub>1</sub>                   | 25 mm     | -        |
| l <sub>2</sub>                   | 56 mm     | -        |
| l <sub>3</sub>                   | -         | 12 mm    |
| l <sub>4</sub>                   | -         | 50 mm    |
| l <sub>5</sub>                   | -         | 5 mm     |
| l <sub>7</sub>                   | -         | 12 mm    |
| w                                | -         | 14 mm    |
| r <sub>1</sub>                   | 0,3 mm    | 0,3 mm   |
| Dynamická únosnost C             | 7,1 kN    | 7,1 kN   |
| Statická únosnost C <sub>0</sub> | 10 kN     | 11,4 kN  |

Tab. 5 – Parametry kloubových hlavic

Statická únosnost  $C_0$  kloubových hlavic SALKB 8 F a SIKB 8 F je v obou případech větší než maximální síla v pružícím prvku  $F = 1824$  N, kloubové hlavice jsou proto vyhovující.

Aby bylo po instalaci pružícího prvku do experimentálního podvozku možné dodatečně upravovat celkovou délku pružícího prvku, byla zvolena jedna kloubová hlavice s levým závitem (SALKB 8 F) a druhá kloubová hlavice s pravým závitem (SIKB 8 F). Tímto způsobem pak dojde v závislosti na směru otáčení těla pružícího prvku k zašroubování nebo vyšroubování obou kloubových hlavic, tj. prodlužování či zkracování celkové délky pružícího prvku. Konstrukce pružícího prvku a kloubových hlavic umožňuje změnu celkové délky pružícího prvku v rozmezí  $\pm 5$  mm z výchozí polohy.

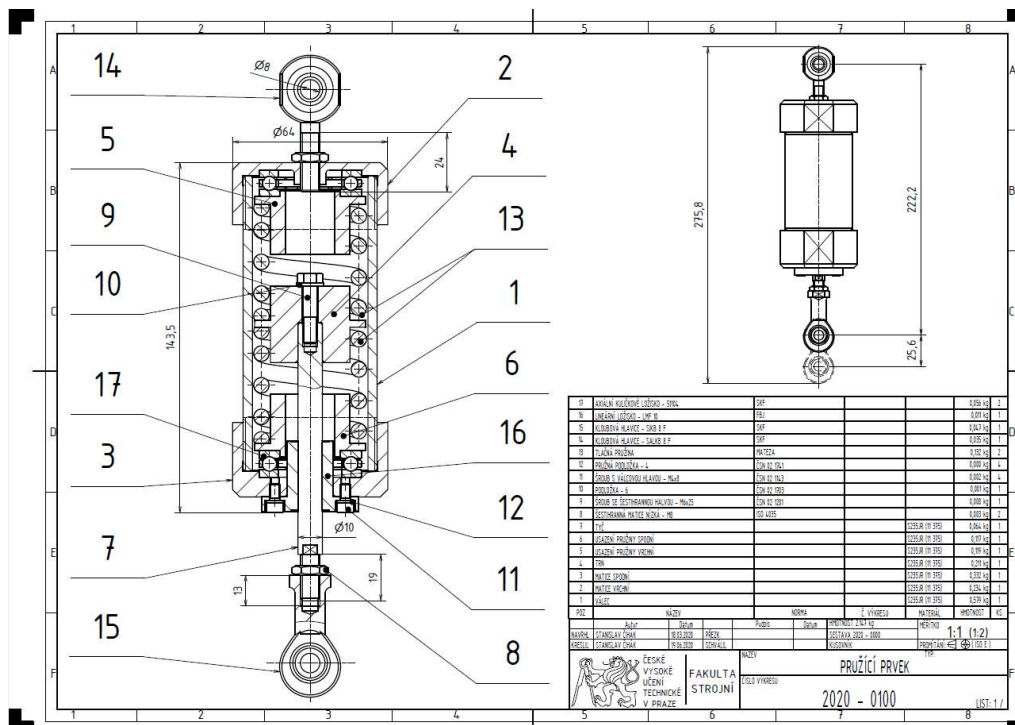
Aby nedošlo k nežádanému povolování nebo utahování kloubových hlavic, je ke každé hlavici zařazena kontramatice.



## 5 Montáž pružícího prvku

Pozice jednotlivých dílů na sestavném výkrese pružícího prvku (Příloha 1) jsou v popisu montáže označeny složenými závorkami. Sestavný výkres pružícího prvku viz Obr. 31.

1. Nasunutí prvního axiálního ložiska {17} na vrchní usazení pružiny {5}
2. Vložení vrchního usazení pružiny {5} s axiálním ložiskem {17} do vrchní matice {2}
3. Nasunutí první pružiny {13} na vrchní usazení pružiny {5}
4. Našroubování válce {1} na vrchní matici {2} o přibližně 5 mm
5. Smontování trnu {4} a tyče {7} táhla pružícího prvku
6. Vsunutí trnu {4} do první pružiny {13} ve válci {1}
7. Nasunutí druhé pružiny {13} na trn {4} táhla pružícího prvku
8. Vsunutí spodního usazení pružiny {6} do druhé pružiny {13}
9. Nasunutí druhého axiálního ložiska {17} na spodní usazení pružiny {6}
10. Přišroubování lineárního ložiska {16} ke spodní matici {3}
11. Nasunutí lineárního ložiska {16} na tyč {7} a našroubování spodní matice {3} na válec {1} a postupné dotažení obou matic
12. Našroubování první kontramaticy {8} na kloubovou hlavici SALKB 8 F {14}
13. Našroubování kloubové hlavice SALKB 8 F {14} na vrchní matici {2}
14. Našroubování druhé kontramaticy {8} a kloubové hlavice SIKB 8 F {15} na tyč {7}

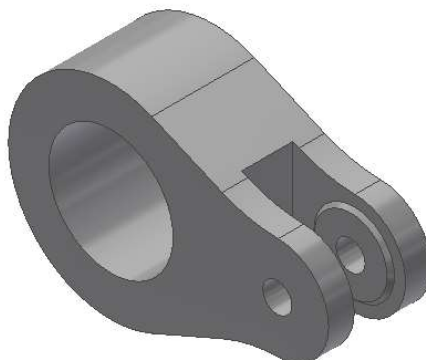


Obr. 31 – Výkres sestavy pružícího prvku (Příloha 1)



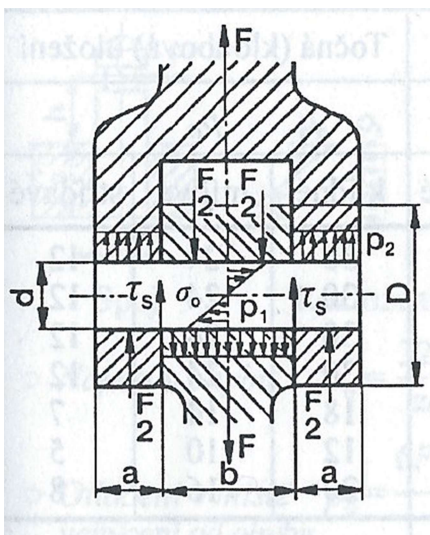
## 6 Konstrukce kliky vypružení

Klika vypružení slouží ke spojení pružícího prvku s hřídelí mechanismu natáčení dvojkolí (Obr. 32). Rozměr kliky, který odpovídá osové vzdálenosti hřídele a čepového spojení s pružícím prvkem, je 45 mm. Materiál kliky je hliníková slitina AW 2017.



Obr. 32 – Klika vypružení

Další rozměry kliky byly určeny z doporučených rozměrových poměrů pro čepové spoje dle [6]. Schéma rozměrů a zatížení v čepovém spoji viz Obr. 33.



Obr. 33 – Schéma rozměrů a zatížení čepového spoje [6]

Šířka ramene táhla  $b$  je v tomto případě dána rozměry kloubové hlavice SIKB 8 F. Proto byla vypočítána teoretická šířka ramene  $b'$ , která byla použita pro výpočet šířky ramene vidlice  $a$  na klice vypružení. Zvolený průměr čepu je  $d = 8$  mm.

$$b' = 1,7 \cdot d = 13,6 \text{ mm} \quad (18)$$

$$a = \frac{b'}{2} = 6,8 \text{ mm} \quad (19)$$

$$D = 3,5 \cdot d = 28 \text{ mm} \quad (20)$$



Skutečné rozměry čepového spojení viz Tab. 6.

|   |       |
|---|-------|
| d | 8 mm  |
| b | 12 mm |
| a | 7 mm  |
| D | 28 mm |

Tab. 6 – Skutečné rozměry čepového spoje

Čepový spoj je realizován pomocí čepu s hlavou 8 x 35 ČSN EN 22341 a pojistného kroužku ČSN 02 2930.

## 6.1 Kontrola čepového spojení kliky vypružení a pružícího prvku

Dle [6] byla provedena kontrola napětí čepu v ohybu, tlaku ve vidlici a napětí ve smyku čepu. Pro výpočet bylo uvažováno čepové spojení jako točné s klidným zatížením. Materiál čepu je ocel 11 700. Jednotlivá zatížení byla počítána dle následujících rovnic:

- Tlak ve vidlici

$$p_2 = \frac{F}{2 \cdot d \cdot a} \leq p_D \quad (21)$$

- Napětí v ohybu

$$\sigma_o = \frac{4 \cdot F \cdot (b + 2 \cdot a)}{\pi \cdot d^3} \leq \sigma_{Do} \quad (22)$$

- Napětí ve smyku

$$\tau_s = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \leq \tau_{Ds} \quad (23)$$

Parametry a výsledky kontrolních výpočtů viz Tab. 7.

| Parametry čepového spoje         |           |
|----------------------------------|-----------|
| d                                | 8 mm      |
| a                                | 7 mm      |
| b                                | 12 mm     |
| F                                | 1824 N    |
| Dovolená napětí čepových spojů   |           |
| $p_D$ (hliníková slitina)        | 18 MPa    |
| $\sigma_{Do}$ (ocel 11 700)      | 140 MPa   |
| $\tau_{Ds}$ (ocel 11 700)        | 90 MPa    |
| Vypočtená napětí v čepovém spoji |           |
| $p_{2KLIKA}$                     | 16,3 MPa  |
| $\sigma_o$                       | 117,9 MPa |
| $\tau_s$                         | 18,1 MPa  |

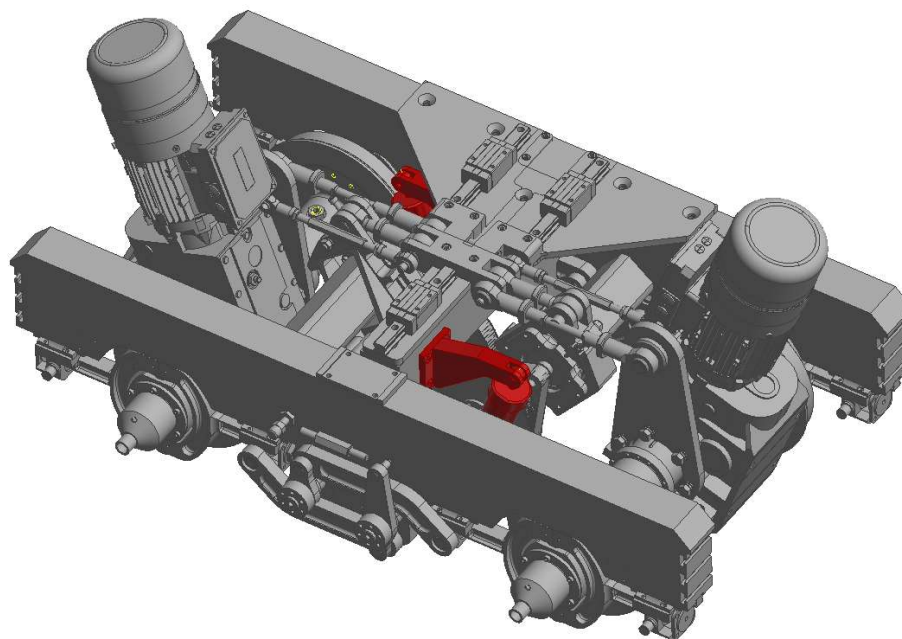
Tab. 7 – Parametry a výsledky kontrolních výpočtů čepového spoje kliky vypružení a pružícího prvku

Výsledná napětí u kontrolovaných dílů čepového spoje nepřesahují hodnoty dovolených napětí. Rozměry a použité materiály jednotlivých dílů jsou tedy vyhovující.

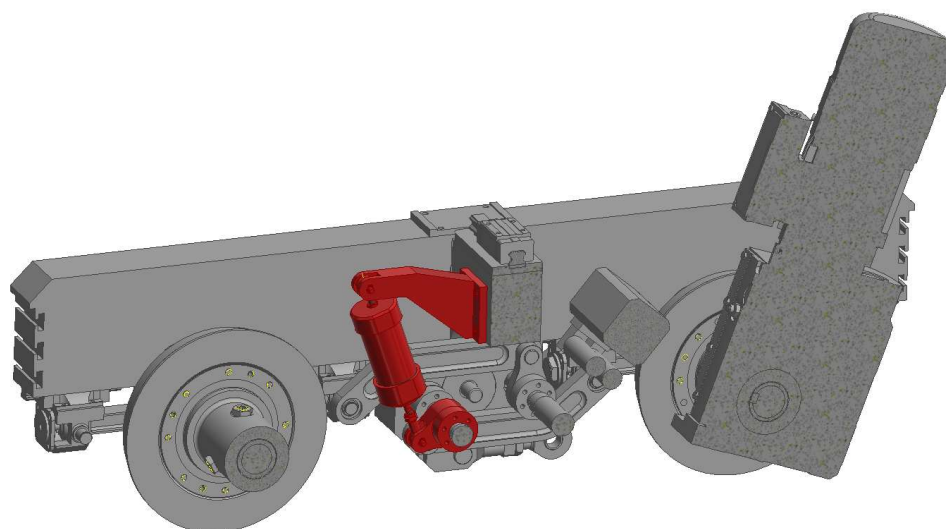


## 7 Zástavba vypružení natáčení vedení dvojkolí kolem svislé osy do experimentálního podvozku

Řešení zástavby vypružení natáčení vedení dvojkolí kolem svislé osy na experimentálním podvozku je rozděleno do dvou částí: spojení vypružení s hřídelí mechanismu natáčení dvojkolí a spojení vypružení s rámem podvozku. Umístění vypružení v experimentálním podvozku viz Obr. 34 a Obr. 35.



Obr. 34 – Umístění vypružení v experimentálním podvozku (vypružení – červeně)



Obr. 35 – Experimentální podvozek v řezu s umístěním vypružení (vypružení – červeně)

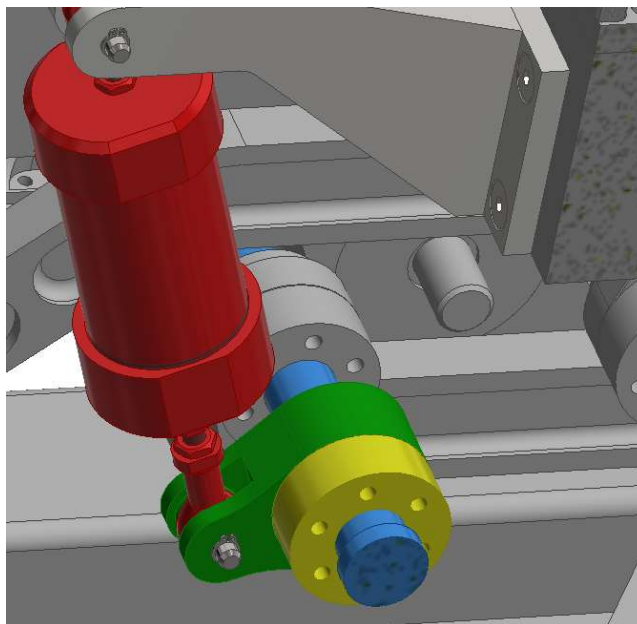
Sestavné výkresy zástavby vypružení do experimentálního podvozku viz Příloha – 2 a Příloha – 3.





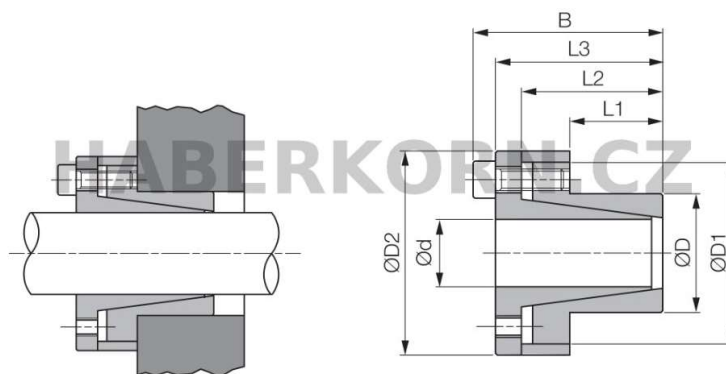
## 7.1 Spojení vypružení s hřídelí mechanismu natáčení dvojkolí

Vypružení je spojeno s hřídelí natáčení dvojkolí prostřednictvím kliky vypružení. Ta je k hřídeli upevněna svěrným upínacím pouzdem (Obr. 36).



*Obr. 36 – Detail spojení vypružení s hřídelí mechanismu natáčení dvojkolí, pohled v řezu (hřídel mechanismu natáčení dvojkolí – modře, svěrné upínací pouzdro – žlutě, klika vypružení – zeleně, pružící prvek – červeně)*

Pro upevnění kliky je použito svěrné upínací pouzdro typu BK 80 s vnitřním průměrem 25 mm a vnějším průměrem 34 mm (Obr. 37). Pouzdro bylo voleno z katalogu firmy Haberkorn [7]. Parametry svěrného upínacího pouzdra BK 80 25x34 viz Tab. 8.



*Obr. 37 – Svěrné upínací pouzdro BK 25x34 [7]*

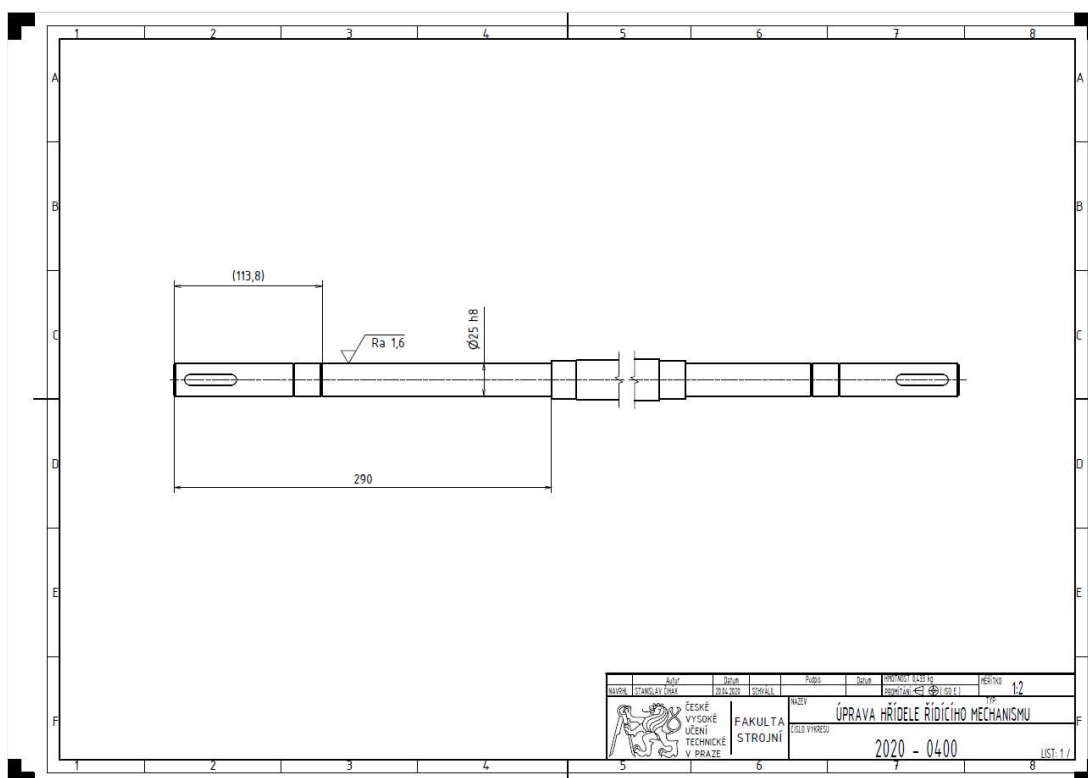


| materiál pouzdra             | nerezová ocel |
|------------------------------|---------------|
| d                            | 25 mm         |
| D                            | 34 mm         |
| L1                           | 25 mm         |
| L3                           | 46 mm         |
| B                            | 52 mm         |
| Maximální kroutící moment    | 180 Nm        |
| D2                           | 56            |
| Axiální síla                 | 15 kN         |
| Upínací šroub – DIN 912-12,9 | M6 x 18       |
| Počet šroubů                 | 6             |

Tab. 8 – Parametry svěrného upínacího pouzdra BK 80 25x34 dle [7]

Maximální přenositelný kroutící moment svěrného upínacího pouzdra BK 80 25x34  $M_{BK80} = 180 \text{ Nm}$  je větší než moment způsobený maximální silou v pružícím prvku  $F$   $M_P = 82,1 \text{ Nm}$ . Z toho vyplývá, že zvolené upínací pouzdro je vyhovující.

Aby bylo možné umístit svěrné upínací pouzdro s klikou vypružení na hřídel mechanismu natáčení dvojkolí, je nutné hřídel upravit. Protože stejná svěrná upínací pouzdra jsou již na hřídeli použita pro upevnění jiných částí mechanismu natáčení dvojkolí, je třeba pouze prodloužit obrobením plochu hřídele o průměru  $\varnothing 25 \text{ h8}$  o délku dostačující pro umístění svěrného upínacího pouzdra s klikou vypružení, viz Příloha – 4 (Obr. 38). Celková délka plochy o průměru  $\varnothing 25 \text{ h8}$  na hřídeli je po úpravě 290 mm. Původní délka plochy hřídele  $\varnothing 25 \text{ h8}$  byla 210 mm.

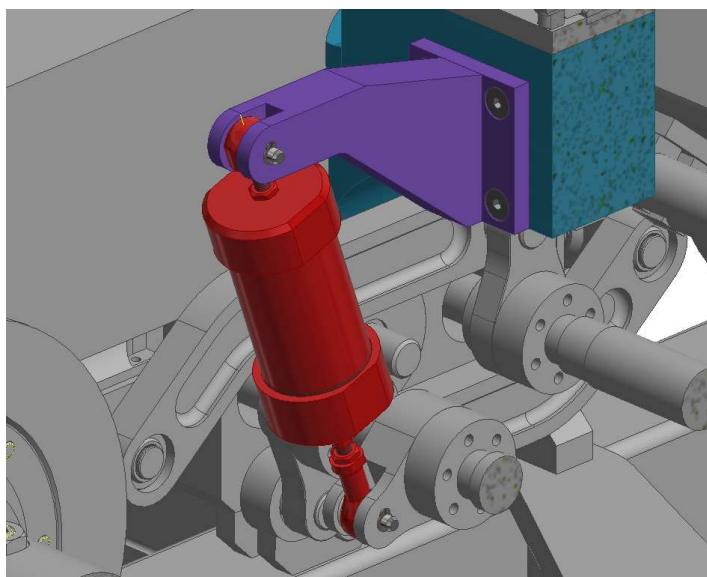


Obr. 38 – Výkres úpravy hřídele mechanismu natáčení dvojkolí (Příloha – 4)



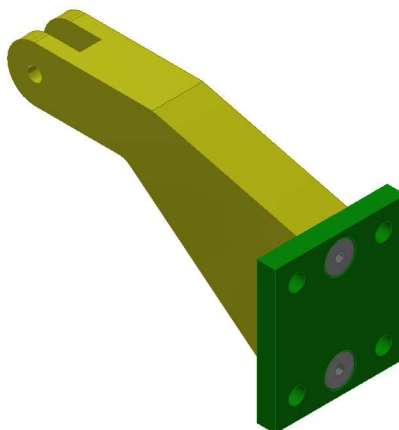
## 7.2 Spojení vypružení s rámem podvozku

Vypružení je s rámem podvozku spojeno prostřednictvím speciální konzoly (Obr. 39). Na konzolu je čepovým spojem prostřednictvím kloubové hlavice SALKB 8 F napojen pružící prvek vypružení. Pro čepový spoj pružícího prvku s konzolovou je použit čep s hlavou 8 x 35 ČSN EN 22341 a pojistný kroužek ČSN 02 2930. Konzola je k příčnicku rámu podvozku připevněna šroubovým spojením.



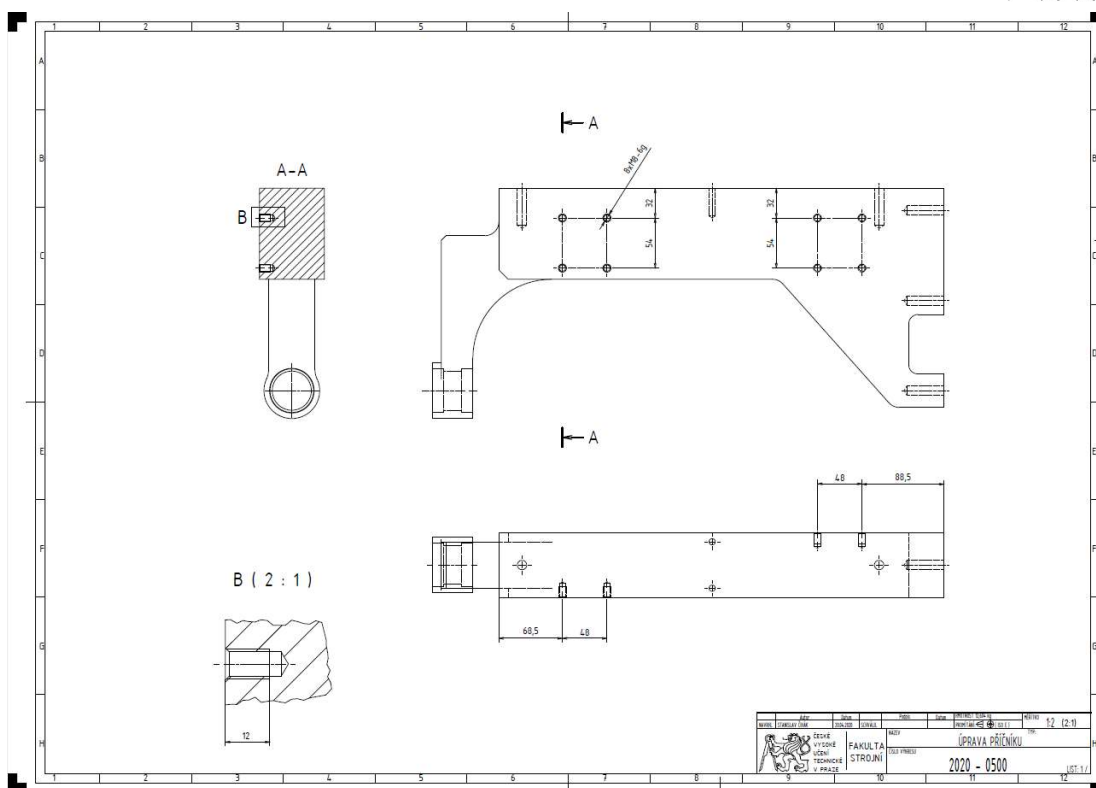
*Obr. 39 – Detail spojení vypružení s rámem podvozku, v řezu (pružící prvek vypružení – červeně, konzola – fialově, příčník – tyrkysově)*

Konzola se skládá ze dvou částí: ramene a desky (Obr. 40). Materiál obou částí konzoly je hliníková slitina AW 2017. Rozměry konce konzoly byly určeny stejným způsobem jako u kliky vypružení na základě doporučených rozměrových převodů pro čepové spoje dle [6] viz kapitola 6.



*Obr. 40 – Konzola (rameno – žlutě, deska – zeleně)*

Pro možnost spojení konzoly s příčnickem rámu je nutné příčník upravit obrobením děr pro realizaci šroubového spojení, viz Příloha – 5 (Obr. 41).



Obr. 41 – Výkres úpravy příčnicku rámu experimentálního podvozku (Příloha – 5)

### 7.2.1 Kontrola čepového spojení konzoly a pružícího prvku

Kontrola čepového spojení konzoly a pružícího prvku byla provedena dle [6] stejným způsobem jako v kapitole 6.1. Parametry a výsledky kontrolních výpočtů viz Tab. 9.

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| Parametry čepového spoje         |           |
| d                                | 8 mm      |
| a                                | 7 mm      |
| b                                | 12 mm     |
| F                                | 1803,64 N |
| G                                | 20,46 N   |
| Dovolená napětí čepových spojů   |           |
| $p_D$ (hliníková slitina)        | 18 MPa    |
| $\sigma_{D0}$ (ocel 11 700)      | 140 MPa   |
| $\tau_{Ds}$ (ocel 11 700)        | 90 MPa    |
| Vypočtená napětí v čepovém spoji |           |
| $p_{2KONZOLA}$                   | 16,5 MPa  |
| $\sigma_o$                       | 117,9 MPa |
| $\tau_s$                         | 18,1 MPa  |

Tab. 9 – Parametry a výsledky kontrolních výpočtů čepového spoje pružícího prvku a konzoly

Veličina  $G$  je tíhová síla způsobená hmotností pružícího prvku. Byla připočtena k síle  $F$  při výpočtu tlaku působícího na konzolu.

Výsledná napětí u všech kontrolovaných dílů čepových spojů nepřesahují hodnoty dovolených napětí. Rozměry a použité materiály jednotlivých dílů jsou tedy vyhovující.



## 8 Závěr

Náplní bakalářské práce bylo nejprve seznámení se s experimentálním podvozkem, který je součástí kladkového stavu ČVUT, provedení rozboru možných řešení vypružení vedení dvojkolí vzhledem k natáčení dvojkolí kolem svislé osy a volba nejvhodnější varianty. Po porovnání jednotlivých variant byla zvolena varianta s umístěním vypružení uvnitř konstrukce experimentálního podvozku na hřídeli mechanismu natáčení dvojkolí. Bylo navrženo konstrukční řešení, jehož první částí byla volba vhodných pružin pro pružící prvek vypružení na základě sílových účinků v experimentálního podvozku a rozměrových převodů natočení vedení dvojkolí kolem svislé osy. Po zvolení vhodných pružin byly navrženy ostatní prvky vypružení a vytvořen 3D CAD model. Byl navržen způsob zástavby vypružení do experimentálního podvozku a nutné úpravy dílů podvozku. Následně byl vytvořen sestavný výkres pružícího prvku, sestavné výkresy zástavby vypružení do experimentálního podvozku a výkresy upravovaných dílů experimentálního podvozku. Důležité díly pružícího prvku a jeho zástavby do experimentálního podvozku byly pevnostně zkontrolovány a vyhovují.



## 9 Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1 – Fotografie aktuálního stavu kladkového stavu ČVUT .....  | 9  |
| Obr. 2 – 3D model Kladkového stavu ČVUT (experimentální podvozek – zeleně, kladkový stav – červeně) .....   | 10 |
| Obr. 3 – 3D model experimentálního podvozku .....   | 10 |
| Obr. 4 – Mechanismus natáčení dvojkolí (třmeny – zeleně, lineární vedení – žlutě, táhla – červeně, hřídel – modře, servomotor – oranžově) .....   | 11 |
| Obr. 5 – Návrh vypružení, varianta A1 .....   | 13 |
| Obr. 6 – Návrh vypružení, varianta A2 .....   | 13 |
| Obr. 7 – Návrh vypružení, varianta A3 .....   | 13 |
| Obr. 8 – Návrh vypružení, varianta A4 .....   | 13 |
| Obr. 9 – Návrh vypružení, varianta A5 .....   | 14 |
| Obr. 10 – Návrh vypružení varianta A6 .....   | 14 |
| Obr. 11 – Návrh vypružení, varianta B1 .....  | 15 |
| Obr. 12 – Návrh vypružení, varianta B2 .....  | 15 |
| Obr. 13 – Návrh vypružení, varianta C1, pohled z boku .....   | 16 |
| Obr. 14 – Návrh vypružení, varianta C1, pohled do vnitřku experimentálního podvozku .....   | 16 |
| Obr. 15 – Schéma funkce vypružení .....   | 18 |
| Obr. 16 – Schéma návrhu konstrukce vypružení .....  | 18 |
| Obr. 17 – Síly ve dvojkolí .....  | 19 |
| Obr. 18 – Momentová rovnováha hřídele mechanismu natáčení dvojkolí .....  | 20 |
| Obr. 19 – Schéma výpočtu posuvu třmenu dvojkolí .....   | 21 |
| Obr. 20 – Schéma výpočtu úhlu $\beta$ .....   | 21 |
| Obr. 21 – Schéma výpočtu zdvihu z .....   | 21 |
| Obr. 22 – 3D model pružícího prvku .....  | 23 |
| Obr. 23 – 3D model pružícího prvku v polovičním řezu .....  | 23 |
| Obr. 24 – Poloviční řez táhlem (tyč – žlutě, trn – purpurově) .....   | 24 |
| Obr. 25 – Usazení pružiny s axiálním ložiskem (usazení – oranžově) .....  | 25 |
| Obr. 26 – Schéma axiálního ložiska SKF 51104 [4] .....  | 26 |
| Obr. 27 – Kryt vypružení (válec – modře, horní matice – fialově, spodní matice – červeně, lineární ložisko – zeleně) .....  | 26 |
| Obr. 28 – Schéma lineárního ložiska LMF 10 [5] .....  | 27 |
| Obr. 29 – Schéma kloubové hlavice SALKB 8 F [4] .....   | 27 |
| Obr. 30 – Schéma kloubové hlavice SIKB 8 F [4] .....  | 27 |
| Obr. 31 – Výkres sestavy pružícího prvku (Příloha 1) .....  | 29 |
| Obr. 32 – Klika vypružení .....   | 30 |
| Obr. 33 – Schéma rozměrů a zatížení čepového spoje [6] .....  | 30 |
| Obr. 34 – Umístění vypružení v experimentálním podvozku (vypružení – červeně) .....   | 32 |
| Obr. 35 – Experimentální podvozek v řezu s umístěním vypružení (vypružení – červeně) .....  | 32 |
| Obr. 36 – Detail spojení vypružení s hřídelí mechanismu natáčení dvojkolí, pohled v řezu (hřídel mechanismu natáčení dvojkolí – modře, svěrné upínací pouzdro – žlutě, klika vypružení – zeleně, pružící prvek – červeně) ..... | 33 |
| Obr. 37 – Svěrné upínací pouzdro BK 28x39 [7] .....   | 33 |
| Obr. 38 – Výkres úpravy hřídele mechanismu natáčení dvojkolí (Příloha – 4) .....  | 34 |
| Obr. 39 – Detail spojení vypružení s rámem podvozku, v řezu (pružící prvek vypružení – červeně, konzola – fialově, příčník – tyrkysově) .....   | 35 |
| Obr. 40 – Konzola (rameno – žlutě, deska – zeleně) .....  | 35 |
| Obr. 41 – Výkres úpravy příčníku rámu experimentálního podvozku (Příloha – 5) .....   | 36 |



## 10 Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tab. 1 – Parametry experimentálního podvozku .....   | 19 |
| Tab. 2 – Parametry pružiny dle [3] .....   | 22 |
| Tab. 3 – Parametry axiálního ložiska SKF 51104 [4] .....   | 26 |
| Tab. 4 – Parametry lineárního ložiska LMF 10 [5].....  | 27 |
| Tab. 5 – Parametry kloubových hlavic.....  | 28 |
| Tab. 6 – Skutečné rozměry čepového spoje .....   | 31 |
| Tab. 7 – Parametry a výsledky kontrolních výpočtů čepového spoje kliky vypružení a pružícího prvku | 31 |
| Tab. 8 – Parametry svěrného upínacího pouzdra BK 80 25x34 dle [7] .....                            | 34 |
| Tab. 9 – Parametry a výsledky kontrolních výpočtů čepového spoje pružícího prvku a konzoly.....    | 36 |

## 11 Seznam příloh

|  |
|--|
| Příloha 1 – Sestavný výkres pružícího prvku  |
| Příloha 2 – Sestavný výkres zástavby vypružení do experimentálního podvozku          |
| Příloha 3 – Sestavný výkres zástavby vypružení do experimentálního podvozku – detail |
| Příloha 4 – Výkres úpravy hřídele mechanismu natáčení dvojkolí                       |
| Příloha 5 – Výkres úpravy příčnicku rámu experimentálního podvozku                   |
| Příloha 6 – 3D CAD model sestavy vypružení   |
| Příloha 7 – 3D CAD model sestavy pružícího prvku                                     |



## 12 Použitá literatura

- [1] KALIVODA, Jan a Petr BAUER. *Design of scaled experimental mechatronic bogie*. 2015 [cit. 2020-06-29].
- [2] KALIVODA, Jan a Petr BAUER. *Využití modelového kladkového stavu při vývoji inovativních pojezdů kolejových vozidel*. 2019 [cit. 2020-06-29].
- [3] *Pružiny tlačné, Mateza spol. s r. o.* [online]. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.mateza.cz/>
- [4] *SKF* [online]. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz>
- [5] *LMF: Product Information* [online]. [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://tech.thk.com/en/products/thkdlinks.php?id=323>
- [6] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-718-3312-6.
- [7] Svěrné upínací pouzdro nerezové BK 80. *Haberkorn* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: [https://eshop.haberkorn.cz/sverne-upinaci-pouzdro-nerezove-bk-80-1-11.html?force\\_sid=11b6b67bfeb389510e07ad90b6d9df8c](https://eshop.haberkorn.cz/sverne-upinaci-pouzdro-nerezove-bk-80-1-11.html?force_sid=11b6b67bfeb389510e07ad90b6d9df8c)