



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

Systémy natáčení náprav kolejových vozidel

Systems of wheelset steering for railway  
vehicles

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
2021**

**Jiří ŠTOLBA**

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový  
Vedoucí práce: Ing Jan Kalivoda, Ph.D



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štolba** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **483133**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Systémy natáčení náprav kolejových vozidel**

Název bakalářské práce anglicky:

**Systems of wheelset steering for railway vehicles**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši systémů natáčení náprav v pojezdech kolejových vozidel.
2. Posuďte možnosti aplikace těchto systémů u moderních souprav metra.
3. Vypracujte studii zástavby mechanického systému natáčení náprav do podvozku metra.
4. Proveďte posouzení kinematiky mechanismu a základní pevnostní dimenzování jednotlivých dílů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Shiqiao Tian, Xiangping Luo, Lihui Ren & Chunyu Xiao (2021) Active radial system of railway vehicles based on secondary suspension rotation angle sensing, Vehicle System Dynamics, 59:5, 765-784.
- [2] Hur H, Shin Y, Ahn D. Analysis on Steering Performance of Active Steering Bogie According to Steering Angle Control on Curved Section. Applied Sciences. 2020; 10(12):4407.
- [3] odborné časopisy, online informační zdroje

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: **14.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**

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

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

prof. Ing. Michael Valášek, 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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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



## Anotační záznam

Jméno autora: Jiří Štolba

Název práce: Systémy natáčení náprav kolejových vozidel

Anglický název: Systems of wheelset steering for railway vehicles

Rozsah práce:

51 stran

49 obrázků

Akademický rok: 2020/2021

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

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Kalivoda, Ph.D

Klíčová slova: Systém natáčení náprav, kolejová vozidla, podvozek, návrh mechanismu, aktivně řízené podvozky

Key words: System of wheelset steering, railway vehicles, bogie, design of mechanism, active steering bogie



## Abstrakt

Práce se zabývá systémy natáčení náprav v pojezdech kolejových vozidel. V první části práce je vytvořena rešerše využívaných systémů natáčení v konkrétních podvozcích. Druhá část práce je věnována návrhu mechanismu pro podvozek pražského metra. Byl vytvořen kinematický, pevnostní rozbor a navrženy rozměry mechanismu. Dále bylo provedeno základní dimenzování táhel a kloubů.

## Abstract

The bachelor thesis analyzes the system of wheelset steering for railway vehicles. The first part is devoted to a search of used steering systems in specific bogies. The second part describes the design of a mechanism for the bogie of the Prague metro. In this part were also created kinematic, force analysis of the mechanism. Furthermore, the basic dimensioning of rods and joints was made. In the end, the results of the work were evaluated.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Systémy natáčení náprav kolejových vozidel“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů.

V Praze dne:

.....

(podpis autora)



## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Kalivodovi, PhD. za cenné poznatky, rady a skvělý individuální přístup.



## Obsah

1 Úvod.....	9
2 Základní pojmy.....	10
2.1 Pojezd kolejových vozidel.....	10
2.2 Systém natáčení náprav .....	10
2.3 Vedení dvojkolí .....	11
3 Rešerše systému natáčení náprav v pojezdech kolejových vozidel .....	12
3.1 Přirozeně stavěná .....	12
3.1.1 Křížová vazba .....	12
3.1.1.1 Princip fungování.....	13
3.1.1.2 Podvozek Leila .....	13
3.1.1.3 Podvozek TVP-2007 .....	15
3.1.2 Proměnlivá tuhost vedení dvojkolí.....	16
3.1.2.1 Hydropouzdro – HALL.....	16
3.1.2.2 Podvozek SF 300 a SF 400.....	17
3.1.3 Systémem Gigabox .....	18
3.1.4 Podvozek LN 25 Axiom .....	19
3.2 Nuceně stavěná .....	19
3.2.1 Liechtyho mechanismus .....	19
3.2.2 Mechanismus metra v Tokiu .....	20
3.2.3 Systém Talgo.....	21
3.3 Řízeně stavěná.....	22
3.3.1 FLEXX tronic ARS - Bombardier.....	22
3.3.2 Systém aktivního natáčení – Univerzita Kongju .....	23
3.3.3 HALL 2.0 .....	24
3.4 Aktivní natáčení .....	25
4 Zástavba mechanického systému do podvozku metra .....	27
4.1 Popis vybraného mechanismu.....	27
4.2 Kinematický popis.....	28
4.3 Stanovení rozměrů mechanismu a návrh zástavby do podvozku .....	30
4.3.1 Zástavba.....	30
4.3.2 Rozměry táhel.....	31



4.4 Určení tečné síly .....	32
4.5 Silový rozbor .....	33
4.6 Pevnostní dimenzování mechanismu .....	34
4.6.1 Táhlo 2 .....	34
4.6.1.1 Tah/Tlak .....	34
4.6.1.2 Vzpěr .....	35
4.6.2 Táhlo 3 .....	37
4.6.3 Táhlo 4 .....	38
4.6.3.1 Tah/Tlak .....	38
4.6.3.2 Vzpěr .....	39
4.6.4 Pryžové klouby .....	40
4.6.4.1 Kloub 1 .....	41
4.6.4.2 Kloub 2 a kloub 3 .....	42
4.6.4.3 Kloub 4 .....	43
4.6.4.4 Kloub 5 .....	44
5 Závěr .....	45
6 Použitá literatura .....	46
7 Seznam použitých zkratk a symbolů .....	49
8 Seznam použitých obrázků .....	50





## 1 Úvod

V posledních letech při vývoji pojezdů kolejových vozidel hrají čím dál větší roli požadavky na zlepšování jízdních vlastností. Velkým faktorem je zejména snížení opotřebení jízdních ploch a s ním spojené ekonomické náklady, či rychlost jízdy a její bezpečnost. Tyto problémy jsou převážně způsobeny při průjezdu vozidla obloukem, kdy velikost vznikajících vodících sil mezi kolem a kolejnicí má nepříznivý vliv jak na opotřebení, tak bezpečnost. Jednou z možností, jak lze tuto nepříznivou skutečnost alespoň částečně řešit, je natočením dvojkolí do radiální polohy.

Má bakalářská práce se zabývá systémy natáčení náprav dvojkolí, které se právě o stavění do radiální polohy starají a zlepšují tak jízdní vlastnosti vozu při průjezdu obloukem. První část je věnována rešerši, která Vás seznámí s dosud používanými systémy natáčení v pojezdech kolejových vozidel a přiblíží Vám jejich konstrukci a princip fungování. Ve druhé části kinematicky a silově popisují vybraný systém natáčení dvojkolí, navrhuji a dimenzuji jeho části pro podvozek pražského metra.

Téma natáčení dvojkolí je stále velmi aktuální. Používání tzv. „Track-friendly“ podvozků šetrným k trati, které jsou charakteristické svou možností natočení dvojkolí při jízdě v oblouku, je dnes velmi populární a žádané. Proto má velký smysl věnovat pozornost novému vývoji systému a způsobům, jak neefektivněji zlepšovat natáčení dvojkolí u jednotlivých podvozků a tím zlepšovat jejich chování v oblouku. Stále rychle se vyvíjí možnost ovlivňovat a řídit dynamiku vozidla pomocí aktivních prvků. Jednou z možností je právě aktivní natáčení dvojkolí.



## 2 Základní pojmy

Na začátku bych rád stručně obeznámil ze základními pojmy a termíny mé práce, které pomohou se lépe orientovat v tématu.

### 2.1 Pojezd kolejových vozidel

Pojezd kolejového vozidla můžeme nazvat jako zařízení, nacházející se mezi kolejí a skříní, které se stará o nesení a vedení vozu v koleji. Pojezdy kolejových vozidel můžeme dle uspořádání rozdělit na rámové a podvozkové. Rámové pojezdy jsou historicky starší a byly konstruovány při příchodu vůbec prvních kolejových vozů. Rámové pojezdy mají nejčastěji dvě nápravy, které jsou s pružícími prvky připevněny přímo k rámu vozu. Postupný vývoj a potřeba vyšší únosnosti jednotlivých vozů přináší využití podvozků. Podvozek si lze představit jako malý vozík s vlastním rámem, který je dvou či více nápravový. Běžně jeden vůz disponuje dvěma podvozků, které jsou uloženy na spodku tak, že se vůči skříní vozidla mohou pohybovat. Podvozkový pojezd nabízí lepší postavení dvojkolí v oblouku a lze u něho také aplikovat druhotné vypružení. Primární vypružení slouží k pružení dvojkolí vůči rámu podvozku a sekundární k vypružení rámu podvozku vůči rámu vozu.

V dnešní době jsou využívány výhradně podvozkové pojezdy jak u osobních, tak nákladních vozů. Rámový pojezd najdeme jen výjimečně u některých nákladních vozů, a proto se dále budeme bavit především o pojezdech podvozkových. [1][2]

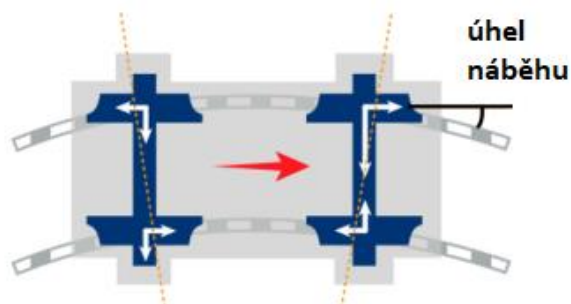
### 2.2 Systém natáčení náprav

Nápravu lze označit jako součást podvozku, která nese kola. Náprava nesoucí dvě pevně uložená kola je dvojkolí. Kola se natáčejí vzájemně s nápravou, proto budu často používat termín natáčení dvojkolí.

Systém natáčení staví dvojkolí do radiální polohy. Dvojkolí, které se natáčí do radiální polohy je tzv. rejdrovné. Při průjezdu obloukem dvojkolí najíždí na vnější kolejnici pod určitým úhlem. Tento úhel mezi kolem a kolejnici se nazývá úhel náběhu (obr). Právě postavením dvojkolí do radiálního směru se tento úhel sníží a tím i velikost vodících sil mezi kolejnici a koly, které jsou pro nás nepříznivé. Jedná se vždy o nějaký prvek či mechanismus v konstrukci pojezdu vozidla, který umožní dvojkolí se natočit, nebo třeba natočení sám aktivně řídí. Z toho vyplývá, že je více způsobů, jak dvojkolí nechat do radiálního směru stavět. Já jsem dospěl k rozdělení do tří skupin, dle způsobu stavění dvojkolí do radiální polohy:

- Přirozeně stavěná
- Nuceně stavěná
- Řízeně stavěná

Toto rozdělení jsem také užil a více popsal u provedené rešerše.



Obrázek 1 - Úhel náběhu [20]

### 2.3 Vedení dvojkolí

Vedení dvojkolí velmi úzce souvisí s natáčením dvojkolí. Je to vazba, která vzájemně propojuje ložiskové skříně náprav s rámem vozu a přenáší síly mezi nimi. Pokud u vozu chceme docílit toho, aby došlo k natočení dvojkolí do radiálního směru, musí nám to vedení dvojkolí dovolit jeho tuhostí nebo vedením s vůlemi. Při konstrukci tak velmi záleží na jeho zvolené koncepci. Požadavek natočení nápravy dvojkolí v oblouku splňuje vedení, které je dostatečně poddajné. Není to ovšem tak jednoduché. Poddajné vedení je sice výhodné pro jízdu v obloukových tratích při nižších rychlostech, ale pro jízdu ve vyšších rychlostech v přímé koleji, je to mu přímo naopak. Při vysokých rychlostech v přímé koleji může docházet k nadměrnému příčnému kmitání dvojkolí, které způsobuje nestabilní chod vozu. Z tohoto důvodu u vozů určených k jízdě s vyššími rychlostmi jsou volena vedení tuhá, nepoddajná. [3][4]



## 3 Rešerše systému natáčení náprav v pojezdech kolejových vozidel

Na snižování vodících sil možností natočení dvojkolí se při konstrukci vozidel dbá již dlouhou řadu let. Největší rozvoj systému natáčení přichází však v poslední době s trendem „Track-friendly“ podvozků, které jsou do provozu nasazovány stále více. Bylo vyvinuto značné množství nových konstrukčních řešení natáčení dvojkolí, která přinesla i nové podvozky. Spíše je ale velká snaha tato řešení natáčení dvojkolí přenášet na stávající používané podvozky a tím vylepšovat jejich dosavadní neuspokojivé jízdní vlastnosti při jízdě v oblouku. Například pro podvozek typu Y25, který patří v Evropě k nejrozšířenějším, tak bylo vyvinuto několik kompatibilních podvozků s přidanými vylepšujícími prvky, aby bylo vyhověno dnešním požadavkům na jízdní vlastnosti.

Následná rešerše je rozdělena do tří skupin dle kapitoly 2.2.

### 3.1 Přirozeně stavěná

Dvojkolí se při jízdě v oblouku samočinně přirozeně natočí. Přirozeného natočení lze docílit dostatečnou poddajností vedení případně jeho vůlí v podélném směru. K natočení může také dopomáhat mechanický prvek, který je právě za účelem lepšího natočení přidán do konstrukce podvozku.

Do skupiny přirozeného natáčení dvojkolí bychom prakticky mohli zařadit všechny možné konstrukce vedení dvojkolí, které alespoň v malé míře dovolí se nápravě natočit. V dnešní době to mohou být zejména čepová vedení, kyvnými rameny, či vedení ojnicemi, které jsou schopny poskytnout díky pryžovým prvkům v uložení určitou podélnou a příčnou tuhost. Je jasné, že vedení dvojkolí a systém natáčení spolu velmi blízce spolupracují. Cílem práce však je spíše se zaměřit na systémy a řešení konstrukce vedení, u kterých bylo především konkrétním prvkem myšleno na radiální natočení dvojkolí.

#### 3.1.1 Křížová vazba

Jeden z prvních mechanismů podporující natáčení dvojkolí využívaný na železnicích je křížová vazba. Použití principu křížové vazby bylo již zaznamenáno na železnici Linz-Budějovice, kde byla vazba do kříže propojující dvojkolí vestavěna v podvozcích koněspřežky, která byla tažena koňmi. Ten, kdo se o využití křížové vazby v podvozcích vozidel nejvíce zasloužil byl Herbert Scheffel. V druhé polovině 20. století byly na podvozky kladeny čím dál větší požadavky k optimalizaci jízdních vlastností, které by řešily opotřebení železnice a s ním spojené náklady. Konkrétně úzkorozchodná železnice, která byla vystavěna v Jižní Africe, se stala velmi náchylnou k opotřebení, čímž rostly náklady na provoz. Do té doby bylo využíváno především tuhých podvozků, kde byla náprava dvojkolí pevně přidělena k rámu. Tyto podvozky se na úzké trati jevily nestabilně a při jízdě



v oblouku docházelo k velkým třecím silám. Proto právě Scheffel měl přijít s řešením, této nepříznivé situace. Snažil se vyvinout pružný, ale přitom stabilní podvozek. To se mu povedlo na svém podvozku, který byl v roce 1975 patentován, v němž aplikoval právě křížovou vazbu.

Dnes je křížová vazba v mnohých modifikacích stále využívána především u vozů nákladních, kde stále velmi efektivně snižuje vodící síly. [5]

#### **3.1.1.1 Princip fungování**

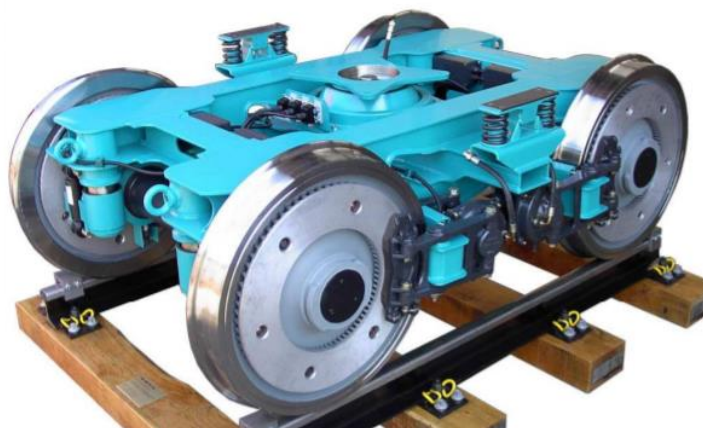
Jedná se o přirozené stavění dvojkolí do radiálního směru. Křížová vazba jen napomáhá a zesiluje tendenci dvojkolí se v oblouku natočit. Křížová vazba je zkonstruována dvojicí diagonálních táhel, která vzájemně propojují obě nápravy a jsou na koncích ukotvena nejčastěji k ložiskovým skříním dvojkolí.

Princip fungování je takový, že z předního dvojkolí je přes táhla přenášena opačná změna úhlu náběhu na dvojkolí zadní, čím je samočinně docíleno lepšího postavení obou dvojkolí v oblouku.

#### **3.1.1.2 Podvozek Leila**

Se stále narůstajícími vyššími požadavky na snižování nákladů a opotřebení, roste také větší snaha vyvíjet nová řešení, či optimalizovat jízdní vlastnosti stávajících tuhých podvozků. S inovativním řešením těchto problémů přichází podvozek pro nákladní vozy Leila, který využívá křížové vazby.

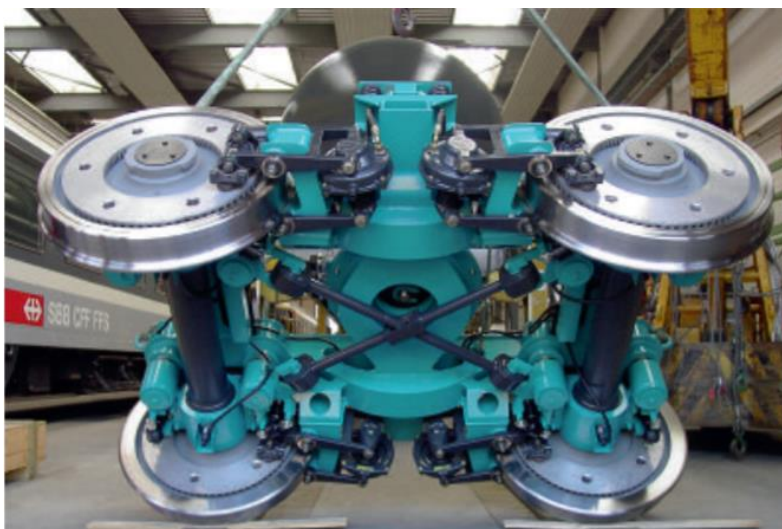
Německo-švýcarskému projektu, který vznikl koncem druhého tisíciletí na katedře Kolejových vozidel TU v Berlíně, měl za úkol vyvinout nízko-hlučný podvozek s radiálním nastavením dvojkolí pro příznivé chování v oblouku a vyvodit tak jeho ekonomický i energetický přínos. Tak vznikl podvozek pro nákladní vozy Leila (Obrázek 2), jehož konstrukce je v mnoha směrech zajímavá.



*Obrázek 2 - Podvozek Leila [4]*



Hlavním konstrukčním prvkem podvozku je rám tvaru H. Tento rám byl při vývoji zkoušen ve dvou polohách. Nejprve byl zkoušen rám, kde byla ložiska uložena na vnější straně dvojkolí, druhá z variant bylo uložení rámu s ložisky na vnitřní straně dvojkolí. Po důsledném zkoušení a simulačních výpočtech byl jako lepší varianta zvolen podvozek s uložení na vnitřní straně dvojkolí, což ale nebývá u podvozků tak časté. Díky tomu se rám zmenšil a snížila se jeho celková hmotnost a také hmotnost dvojkolí. Pro primární vypružení a zároveň vedení dvojkolí byly zvoleny tři pryžokovové pružiny, které jsou u každého kola uloženy v ocelových miskách na ložiskových skříních. Tyto pružiny zajišťují přenos svislého zatížení, ale také příčnou a podélnou tuhost. Odpružení je dále ještě tlumeno hydraulickými prvky. Dalším nevšedním prvkem je řešení brzd. Aby se docílilo tichého chodu a rovnoměrného opotřebení kol, byla zvolena kotoučová brzda u každého kola. V podvozku je také implementován elektronický diagnostický systém, který monitoruje stav jednotlivých komponent. Díky němu je také možné například dávkovat brzdnu sílu. K vylepšení natočení dvojkolí při jízdě v oblouku konstruktéři zvolili křížovou vazbu. Diagonální táhla jsou ukotvena zevnitř dvojkolí k miskám na ložiskových skříních (Obrázek 3). Právě vnitřní uložení poskytuje v tomto případě podvozku Leila lepší možnost natočení.



*Obrázek 3 - Křížová vazba v podvozku Leila [7]*

Při měření na zkušební trati, bylo zjištěno že v porovnání s podvozky s tuhými nápravami snižuje Leila s křížovou vazbou vodící síly o 30 % a celková energetická spotřeba při jízdě ve zkušební trati byla o 5 % nižší. [6][7]



### 3.1.1.3 Podvozek TVP-2007

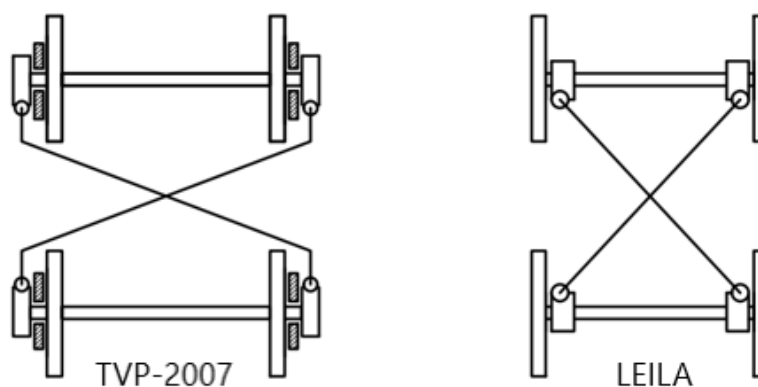
Dalších z konkrétních podvozků využívající křížové vazby je podvozek pro nákladní vozy TVP-2007 (Obrázek 4). Jedna z mnoha alternativ ze skupiny Track-friendly, která zlepšuje jízdní vlastnosti podvozků Y25, které jsou na železnicích stále hojně užívány. Podvozek TVP-2007 byl vyvinut společností Tatravagonka.



Obrázek 4 - Podvozek TVP-2007 [8]

Konstrukce podvozku TVP 2007 je téměř totožná jako konstrukce u klasického podvozku Y25, jsou zde však provedeny optimalizační úpravy ke zlepšení jízdních vlastností. K úpravě došlo především u svislého vypružení podvozku a také u jeho tlumení, tak aby se docílilo zmenšení působnosti dynamických sil mezi kolejí a kolem.

Dále je zde zaveden prvek právě v podobě křížové vazby, který může i díky dvěma předchozím úpravám dosáhnout lepších účinků a natočení dvojkolí. Konstrukce křížové vazby v podvozku TVP 2007 je řešena ukotvením táhel na ramenech protilehlých ložiskových skříní. Ložiskové skříně jsou uchyceny na rámu a nacházejí se z vnější strany dvojkolí. Křížová vazba v podvozku TVP-2007 se tedy svou konstrukcí lehce liší od konstrukce v podvozku Leila (Obrázek 5). Především kvůli postavení rámu z vnější strany dvojkolí.



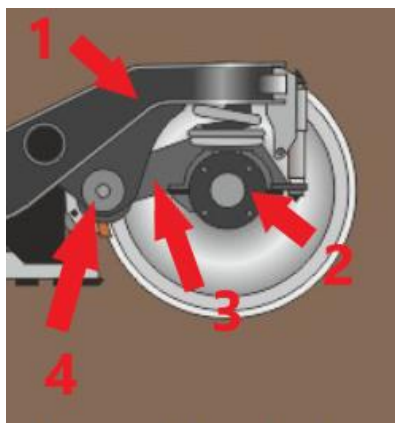
Obrázek 5 - Křížová vazba podvozku TVP 2007 a podvozku LEILA



Tatravagonka nabízí ještě další dva „track-friendly“ podvozky prototypu Y25, využívající křížovou vazbu. Jedná se o podvozky TVP -2009 R a TVP NG-DBS. Všechny tři podvozky jsou nasazovány do provozu a velmi úspěšně snižují opotřebení jízdnic. Nejnovější TVP NG-DBS také velmi úspěšně snižuje úroveň hlasitosti chodu až pod 80 dB, což ho řadí do třídy A dle rozdělení evropské komise. [9]

### 3.1.2 Proměnlivá tuhost vedení dvojkolí

Jeden z dalších přirozeně stavěných systémů je speciální koncepce vedení dvojkolí. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.3, vedení dvojkolí můžeme rozdělit na poddajné a nepoddajné (tuhé). Výhodné by bylo, kdybychom mohli současně využívat obě varianty. Při jízdě v oblouku by se vedení chovalo poddajně a při vyšších rychlostech by bylo dostatečně tuhé. Dříve řešení tohoto problému vedlo jen ke kompromisu, v současné době lze problém těchto protichůdných požadavků na tuhost vedení řešit hydropouzdry HALL. Tento prvek se ve vedení dvojkolí využívá frekvenčně závislého viskózního odporu. Dokáže tedy svou tuhost výrazně měnit a tím docílit natočení dvojkolí v oblouku a zároveň při vyšších rychlostech udržovat stabilní chod. Tyto pouzdra jsou využívána především u vedení dvojkolí kyvnými rameny. Kyvné rameno vedoucí z ložiskové skříň je k rámu podvozku vázáno kloubem, jehož funkci plní právě hydropouzdro (Obrázek 6). Můžeme se také setkat s jiným principem řešení, které ve svých podvozcích SF 300 a SF 400 aplikuje firma Siemens. [10]



Obrázek 6 - Vedení dvojkolí kyvným ramenem, 1 – podélník rámu, 2 – ložisková skříň, 3 – kyvné rameno, 4 – kloub kyvného ramena [11]

#### 3.1.2.1 Hydropouzdro – HALL

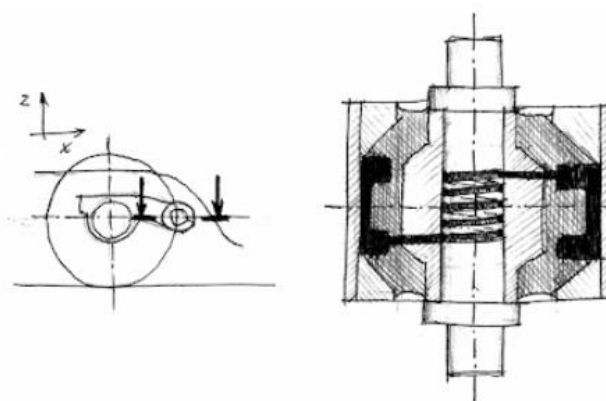
HALL je současným trendem na britských železnicích. Používán je v podvozcích jednotek Class 444 Desiro, Class 221 Voyager, nebo v podvozcích BT41. (nějaký obrázek)

Hydropouzdro tedy funguje na principu viskózního odporu a plní funkci kloubu kyvného ramene, který poskytuje příčný a podélný posun. V ose válcového pouzdra je uložen čep nebo hřídel. Část prostoru v pouzdru mezi stěnou a hřídelí je vyplněna pryžovým prvkem.





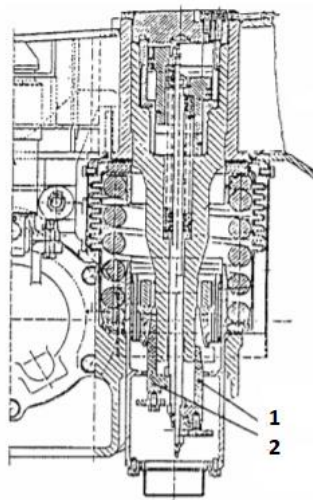
V něm jsou vytvořeny dvě komory, před a za hřídelí. Tyto dvě komory jsou vyplněny kapalinou a vzájemně propojeny kanálkem. Nejčastěji to bývá spirálovitý kanálek, který propojuje obě komory, jak lze vidět na obrázku v podélném řezu (Obrázek 7). Svou roli hraje i délka a průřez kanálku, jimž se může případně korigovat požadovaná tuhost. Kapalina proudí v kanálcích v závislosti na frekvenci kmitání. Při vyšších frekvencích kapalina z komor proudí kanálkem rychleji. Čím rychleji proudí, tím větší vykazuje odpor. Z toho tedy vyplývá, že při vyšších rychlostech v přímé koleji, kdy je frekvence kmitání vyšší, musí nápravové ložisko v podélném posuvu překonávat jak odpor pryže, tak odpor kapaliny. Na místo toho, když v nižší rychlosti projíždí vozidlo obloukem a kapalina proudí pomalu, překonává zejména jen odpor poddajnější pryže. [10][12]



Obrázek 7 - Hydropouzdro v podélném řezu [10]

### 3.1.2.2 Podvozek SF 300 a SF 400

Tyto dva podvozky pro osobní vozy vyvinuty firmou Siemens, využívají speciálního čepového vedení (Obrázek 8). Svislý vodící čep nalisovaný v rámu vozidla je dutý. Prochází uvnitř pružiny primárního vypružení skrze pouzdro, které je uloženo v konzole na ložiskové skříni. V pouzdru se nacházejí dva pryžové válcové prvky, z nichž jeden má kuželový otvor. V duté horní části čepu se nachází pneumatický válec s pístem. K tomuto pístu je uchyceno táhlo, které prochází dutým čepem a na druhém konci táhá za kuželovou rozpěru. Pokud z vrchu na píst nepůsobí tlak vzduchu, je píst pružinou udržován v horní poloze. Tím pádem táhlo vtáhne rozpěru do pouzdra mezi čep a pryžový prvek, kde tak jasně stanoví vůli pryžových prvků a vedení se stane tuhým. Jestliže se nad pístem vytvoří tlak a píst se dostane do spodní polohy, rozpěra je vytažena z pouzdra. Tím je poskytnuta větší vůle a menší tuhost vedení. Dvojkolí se pak může samočinně radiálně natočit. Tímto prvkem je u podvozků dosaženo příznivých účinků na kolej při jízdě v oblouku a možností jízdy s příznivými vlastnostmi až do 280 km/h. [13]



Obrázek 8 - Řez speciálního čepové vedení, 1- kuželová rozpěra v dolní poloze při jízdě v oblouku, 2 – kuželová rozpěra horní poloze při jízdě v přímé trati [13]

### 3.1.3 Systémem Gigabox

Systém Gigabox představuje nový koncept ložisek nápravy a primárního zavěšení so společnosti ContiTech a SKF. O vedení a primární vypružení se starají pryžové pružiny s hydraulickým tlumením, které jsou uložené v ložiskové skříni (Obrázek 9 a 10). Tyto pružiny mají nahradit prvky v primárním vypružení, které byli náchylné na opotřebení. Zajistit tak bezúdržbový chod až na 1 milion kilometrů. Poddajnost těchto prужit také zajišťuje přirozené radiální nastavení dvojkolí při průjezdu obloukem. Dalším přínosem je výrazné snížení emise hluku a díky integrovanému tlumicímu systému v pryžových pružinách, lze garantovat vysokou bezpečnost proti vykolejení. Koncepte tohoto primárního zavěšení je kompatibilní s podvozky Y25, vyžaduje pouze malé úpravy konstrukce.[14]



Obrázek 9 - Systém Gigabox [14]

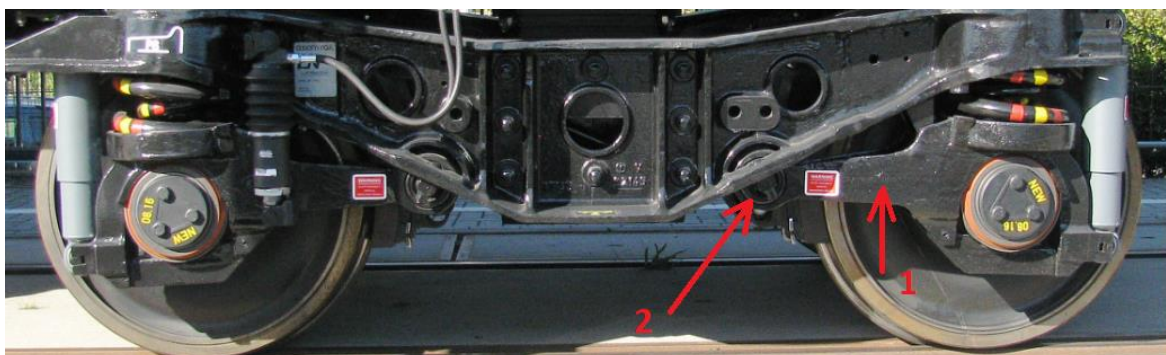


Obrázek 10 - Systém Gigabox [14]



### 3.1.4 Podvozek LN 25 Axiom

Společnost Axiom vyvinula a v roce 2014 představila „Track-friendly“ podvozek LN 25, který je novější verzí TF25. Axiom využívá u svých podvozků vedení a radiálního nastavení dvojkolí pomocí radiálních ramen, která vedou z ložiskové skříně do podélníku rámu, kde jsou uloženy pomocí pryžových kloubů (Obrázek 11). [15]



Obrázek 11 - Podvozek LN25 s radiálními rameny, 1 – rameno ,2- pryžový kloub

### 3.2 Nuceně stavěná

Nucené stavění dvojkolí do radiálního směru je způsobeno vzájemnou mechanickou vazbou mezi skříní a nápravou podvozku. Náprava dvojkolí je tak nuceně přes vazbu ke skříní natočena do radiální polohy díky pohybu skříně vozu vůči rámu podvozku.

#### 3.2.1 Liechtyho mechanismus

Koncept nuceného stavění využívá Liechtyho mechanismus, který pochází již ze 30.let 20.století, kdy jej popsal R.Liechty. Jeho princip provázání dvojkolí a skříně vozu využívá švýcarská společnost SIG, která ho instalovala do svého podvozku Navigator pro osobní vozy INC (Obrázek 12).

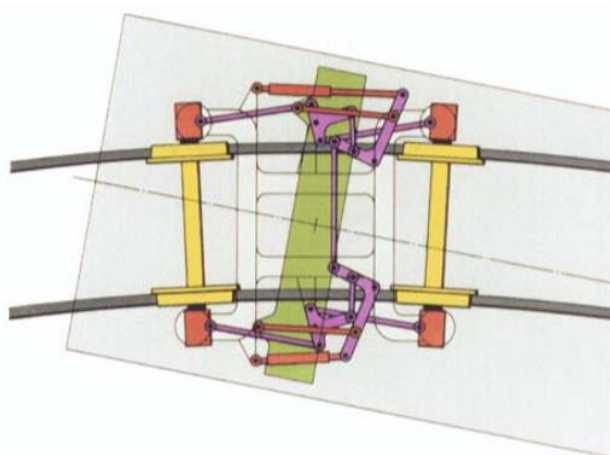


Obrázek 12 - Podvozek navigátor na voze INC [17]

Mechanismus se nachází na obou stranách vozidla a je složen ze čtyř táhel. Dvě spodní táhla jsou uchycena na ložiskových skříních. Jedno z horních táhel je pak pevně spojeno se skříní vozu a druhé rámem podvozku. Všechna čtyři táhla jsou společně spojena jedním dílem,



který převádí pohyb skříně, které nese horní táhlo na žádaný pohyb dolních táhel propojených s dvojkolím. Princip fungování a propojení vozu s mechanismem lze vidět na schématickém obrázku (Obrázek 13). [16]



Obrázek 13 - Princip mechanismu v podvozku Navigator [16]

### 3.2.2 Mechanismus metra v Tokiu

Společnosti Tokio Metro and Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation v roce 2013 společně vyvinuly nový natáčecí systém pro podvozky vozů tokijského metra Ginza line. Na této lince se vozy metra velmi potýkaly s nadměrným opotřebením jízdnic při jízdě v oblouku, doprovázené vysokou hlučností. Proto byla velká snaha stávající podvozky vylepšit. Tak vznikl nový podvozek SC101 (Obrázek 14), který využívá natáčení zadní nápravy podvozku.



Obrázek 14 - Podvozek SC101 pro Ginza line [18]

Do stávajícího podvozku byl dle možností konstrukce zabudován pákový mechanismus, který propojuje společně skřín vozu, rám podvozku a samotnou nápravu. Přenáší tedy vzájemné natáčení skříně vozu vůči podvozku. Mechanismus je zabudován na bočních stranách podvozku, vždy jen u zadní nápravy, kterou má za úkol natáčet. Toto specifické řešení natáčení pouze zadní nápravy podvozku vyplývá především z možnosti uložení mechanismu, kdy je pro zabudování také u přední nápravy překážkou nedostatek prostoru



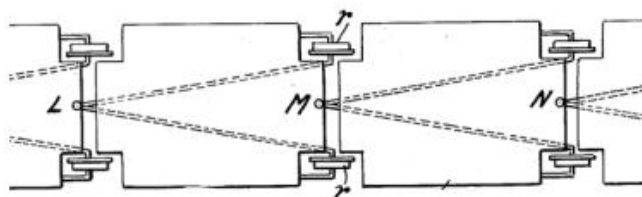
kolem trakčního motoru. Řízení pouze zadní nápravy, by se mohlo jevit jako nedostačující z důvodů, že přední náprava čelí daleko většímu působení vodících sil při nájezdu do oblouku. U tohoto konkrétního řešení byla však díky natáčení zadní nápravy eliminována nedotáčivost podvozku a tím i celkové působení sil na přední nápravu. Při testování vozu tak bylo dosaženo požadovaných výsledků. Vozy metra jezdí v obou směrech, proto má vůz disponující dvěma podvozky mechanismem osazenou vnitřní druhou a třetí nápravu. Celkový princip tohoto systému natáčení funguje tedy tak, že při průjezdu vozu obloukem je podvozek vůči skříně natočen a pákový mechanismus převede úhel natočení skříně vůči podvozku na potřebný úhel natočení dvojkolí. Náprava osazena mechanismem je v důsledku natočení natlačena na vnější kolej a tím u dvojkolí dojde k tzv. diferenciálnímu efektu. Vnější kolo se odvaluje, díky kuželovitému obrysu jízdnicích ploch, na větším poloměru než kolo na vnitřní kolejnici. Celkově se tak zlepší poloha a nedotáčivost podvozku do radiální polohy. Tím je docíleno snížení úhlu náběhu neřízené přední nápravy a působení vodících sil.

Velkou výhodou tohoto řešení je bezesporu jeho menší velikost a kompaktnost s podvozkiem, kdy díky natáčení pouze zadní nápravy a vlastní šikové konstrukci je mechanismus poměrně lehkým a nevyžaduje žádný větší zásah do celkové stavby podvozku a skříně vozu. Tento mechanismus je však navržen pouze pro konkrétní podvozek tokijského metra. Během testovacích jízd bylo dosaženo snížení vodících sil o 32 %. [18]

### 3.2.3 Systém Talgo

Za zmínku určitě stojí koncept konstrukce vozidla vyvinutý společností Talgo.

Jedná se o kloubový vlak s jednonápravovými vozy. Jednonápravový podvozek nacházející se v zadní části vozu, tvoří článek, který je vzájemně přes táhla propojen s články vozu předním a za ním (Obrázek 15). Náprava se tak nachází uprostřed mezi jednotlivými vozy. [17]

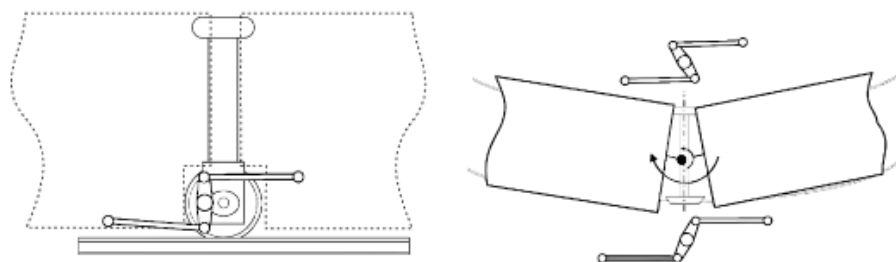


Obrázek 15 - Propojení článku soupravy [17]

Speciální konstrukce nápravy umožňuje jednotlivým kolům se nezávisle otáčet. Tím je docíleno dobrého průjezdu obloukem, kdy se každé kolo otáčí na jiném poloměru oblouku. Druhou výhodou této konstrukce je, že při jízdě v přímé koleji je chod stabilní, nedochází totiž k sinusovému pohybu, který se objevuje u náprav s pevně uchycenými koly



s kuželovým obrysem. Vedení jednotlivých náprav je řešeno wattovým mechanismem (Obrázek 16). Mechanismus udržuje osu nápravy vždy ve středu mezi oběma vozy. Náprava tak zaujímá ideálního radiálního nastavení v oblouku tratě.



Obrázek 16 - Mechanismus vedení nápravy [16]

Systém Talgo dosahuje vysoké bezpečnosti a plynulosti jízdy a minimálního opotřebení jízdnic. Díky speciální konstrukci uložení kol v nápravě je možné také měnit rozchod. [15]

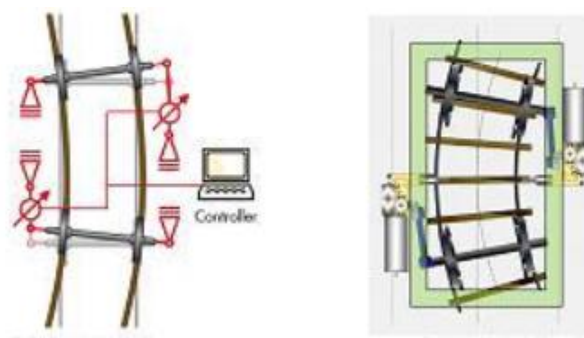
### 3.3 Řízení stavěná

Skupina řízení stavěných dvojkolí představuje systémy, u kterých je natáčení řízeno aktivním prvkem. Využívání aktivních prvků pro řízení dynamiky jízdy u kolejových vozidel je stále na začátku vývoje. Proto jejich současné nasazení v provozu je spíše ojedinělé. Dá se však očekávat, že v budoucnu s rostoucími požadavky na vlastnosti jízdy bude aplikace aktivních prvků řídicí dynamiku jízdy v konstrukcích kolejových narůstat. Je to však směr, kterým se bude vývoj kolejových vozidel určitě ubírat. [19]

#### 3.3.1 FLEXX tronic ARS - Bombardier

Tento systém aktivního radiálního řízení byl aplikován a testován na podvozku vozu Regina ve Švédsku.

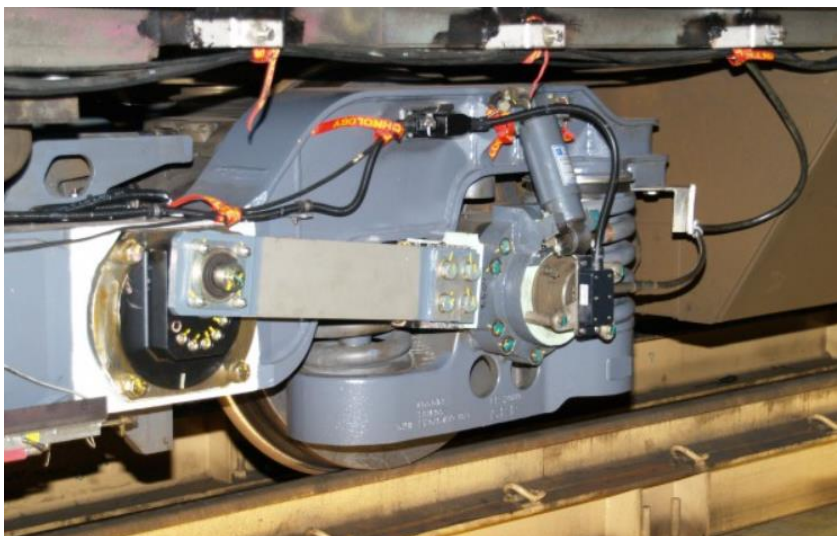
Principem systému je konstrukce poddajného podélné vedení dvojkolí umožňující jeho pasivní natočení při průjezdu obloukem, které je dále aktivně řízeno akčním prvkem v podobě elektrohydraulického pohonu (Obrázek 17).



Obrázek 17 - Schéma aktivního řídicího systému [20]



Ve verzi systému pro podvozek vozu Regina byl však použit elektromechanický pohon, který přenáší své síly a ovládá natáčení dvojkolí přes listové pružiny, které jsou uchyceny na ložiskových skříních (Obrázek 18). Ovládání pohonu je řízeno v závislosti na boční odchylce pohybu dvojkolí. Jednoduše by se dalo říct, že senzory systému sledují jízdní stopu dvojkolí, na jejímž základě je nastaveno jeho řízení. Jádrem systému vyhodnocuje frekvenční pásma, podle kterých je dvojkolí řízeno. V pásmu s nižšími frekvencemi, které odpovídají průjezdu obloukem, systém vyhodnotí radiální nastavení dvojkolí. Naopak při vyšších frekvencích, systém kompenzuje odchylky dráhy opačným řízením a stabilizuje tak chod dvojkolí.



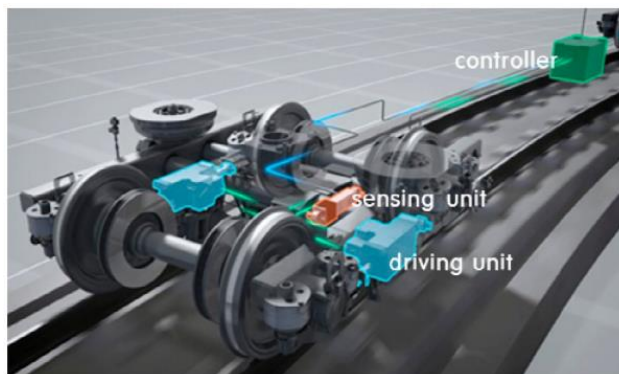
Obrázek 18 - Systém aktivního řízení na podvozku vozu Regina [20]

Aplikací systému lze docílit výrazného snížení hluku při provozu, a to zejména v obloucích tratě. Velmi významně snižuje vodící síly mezi kolem a kolejnicí, což způsobuje delší životnost jízdních ploch. Systém natáčení je také schopen vodící síly rovnoměrněji rozložit mezi obě nápravy, u konvenčních podvozků je totiž přední náprava této působící síle vystavena daleko více. Další nespornou výhodou je také aktivní stabilizace chodu dvojkolí, díky které tak nemusí být dále použito jiných tlumičů. [20]

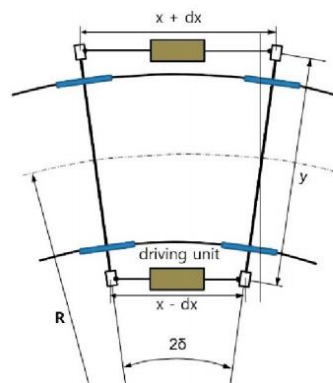
### 3.3.2 Systém aktivního natáčení – Univerzita Kongju

Na univerzitě v Kongju v Koreji se vytvořil nový prototyp aktivního natáčení. Prototyp byl vyvinu pro městské vozy metra EMU (electric multiple unit).

Tento systém řízení dvojkolí se skládá ze snímače, řídicí a pohonné jednotky (Obrázek 19 a 20). Snímač v reálném čase sleduje zakřivení tratě. Řídicí jednotkou je ze signálu snímače je dle výpočtové modelu spočten řídicí úhel, který je následně pohonnou jednotkou nastaven. Pohonná jednotka řídí obě dvojkolí je zde použita v podobě elektromechanického akčního členu s přítlačnou silou přes 50 000 N. Schéma mechanismu pohonné jednotky lze vidět na obrázku.



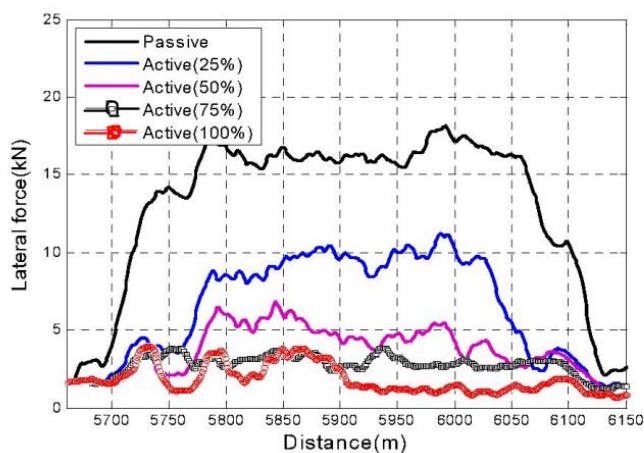
Obrázek 19 - Systém aktivního natáčení v podvozku vozidla [21]



Obrázek 20 - Schéma aktivního systému natáčení [21]

Výpočtový model pro získání řídicího úhlu dvojkolí vychází ze základní znalosti geometrie postavení vozu v oblouku a natočení jeho podvozku vůči skříně.

Testování systému na zkušebním vozidle bylo provedeno trati při průjezdu oblouku s rádiusem 300 m. Testováno bylo nejprve pasivní natáčení dvojkolí a poté s řídicím systémem vždy určitá procenta natočení cílového úhlu. Graf (Obrázek 21) ukazuje závislost podélné síly působící na dvojkolí při průjezdu obloukem. [21]



Obrázek 21 - Závislost působení podélné síly [21]

### 3.3.3 HALL 2.0

V srpnu roku 2014 bylo na veletrhu v Berlíně představeno řešení aktivního řízení pomocí hydropouzder HALL.

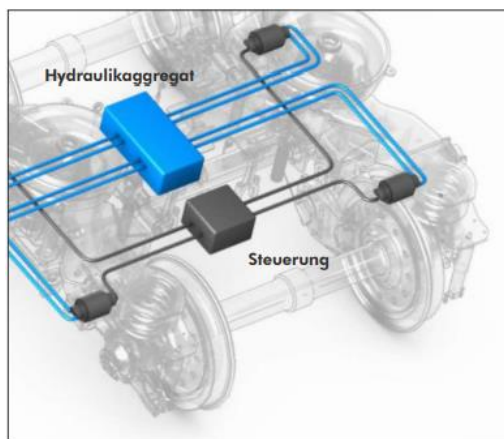
Hydropouzdro HALL bylo již popsáno v kapitole 3.1.2.1., tam se ale jednalo o pasivní prvek natáčení dvojkolí. Nová generace HALL 2.0. přichází z možností aktivního natáčení dvojkolí.

HALL 2.0. funguje na stejném principu jako pasivní pouzdro HALL, ale navíc je zde řídicí jednotka, která ovládá nastavení jednotlivých pouzder pomocí hydraulického zařízení (Obrázek 22), na bázi vyhodnocených interních informací o poloze a tlaku v pouzdře.

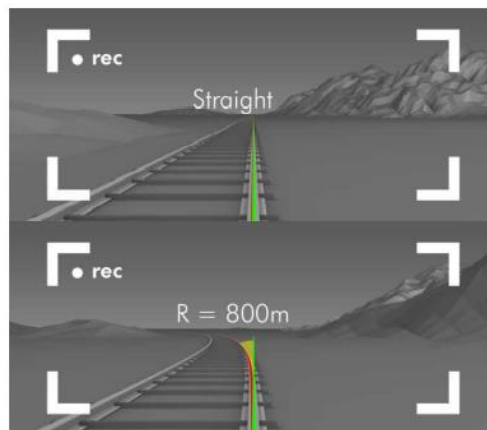




Dvojkolí se tak může díky určitému nastavení pouzder natočit v oblouku, nebo naopak být dostatečně tuhé v přímé koleji. Pro systém HALL 2.0. je ještě jiná možnost, jak řešit řízení a nastavení pouzder. Jedná se o získání informací z GPS systému, nebo kamery na přední části lokomotivy, které jsou následně převedeny do řídicí jednotky systému a pouzdra mohou být nastavena. Kamera, umístěná v předu, z obrazu v průběhu jízdy vyhodnocuje zakřivení trati (Obrázek 23). [22]



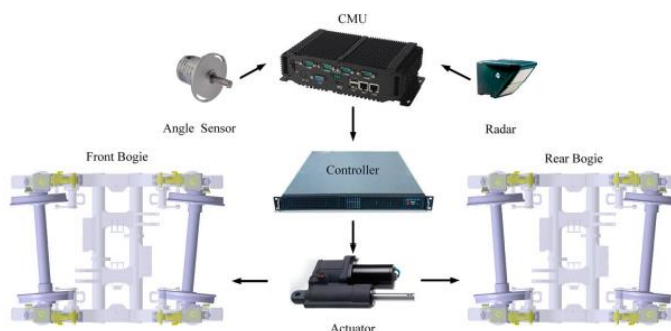
Obrázek 22 - Systém aktivního natáčení HALL 2.0. [22]



Obrázek 23 - Snímací kamera poloměru oblouku [22]

### 3.4 Aktivní natáčení

Nový způsob aktivního natáčení byl vyvinut a testován na Univerzitě Tong Ji v Šanghaji. Systém aktivního natáčení dvojkolí je založen na snímání úhlu natočení podvozku vůči skříni vozu. Skládá se ze snímače a měřicí jednotky, ovladače a akční jednotky (Obrázek 24). Úhlový snímač je speciálně namontován na horní straně otočného čepu uložení podvozku, kde snímá úhel natočení. Akční jednotky, starající se o natočení dvojkolí do radiální polohy, se nachází na každé straně obou dvojkolí.



Obrázek 24 - Systém aktivního natáčení [23]

Systém nabízí oproti jiným novou zajímavou variantu aktivního natáčení. Systém však prochází teprve ranným vývojem. První simulace prokázali dobré výsledky účinnosti



natáčení. Otázkou ale zůstává, jaký vliv bude mít dynamické chování vozu, jakou jsou vibrace, na úhel otáčení podvozku. Až budoucí testování ukáže, jaká je možnost využití v reálném provozu. [23]

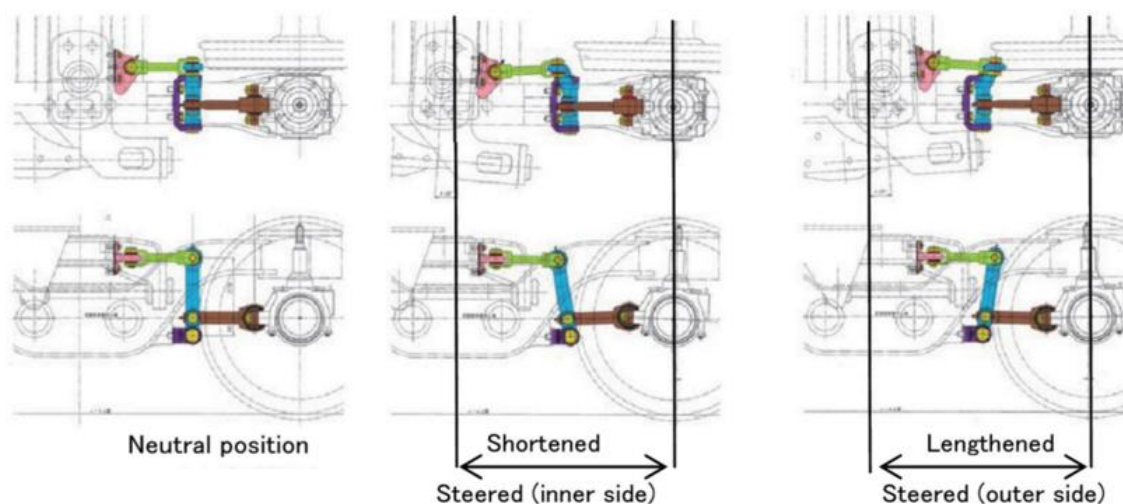


## 4 Zástavba mechanického systému do podvozku metra

V této praktické části mé práce se věnuji elementárnímu návrhu vybraného mechanického systému natáčení. Vybraný systém se pokusím navrhnout a zabudovat do konkrétního podvozku metra. Cílem je tedy ukázat teoreticky možnou aplikaci a zabudování tohoto systému, provést jeho základní kinematický, pevnostní rozbor a také nadimenzovat jednotlivé části.

### 4.1 Popis vybraného mechanismu

Pro vypracování jsem si vybral systém natáčení Tokijského metra, který je podrobně popsán v rešerši v kap.3.2.2. Jedná se o táhlový mechanismus, který využívá nuceného stavění dvojkolí do radiálního směru. Převádí úhel natočení skříně na úhel natočení dvojkolí. Na obrázku ho (Obrázek 25) lze vidět v podvozku tokijského metra v neutrální poloze a poté v polohách při natočení dvojkolí.



Obrázek 25 - Mechanismus v podvozku tokijského metra

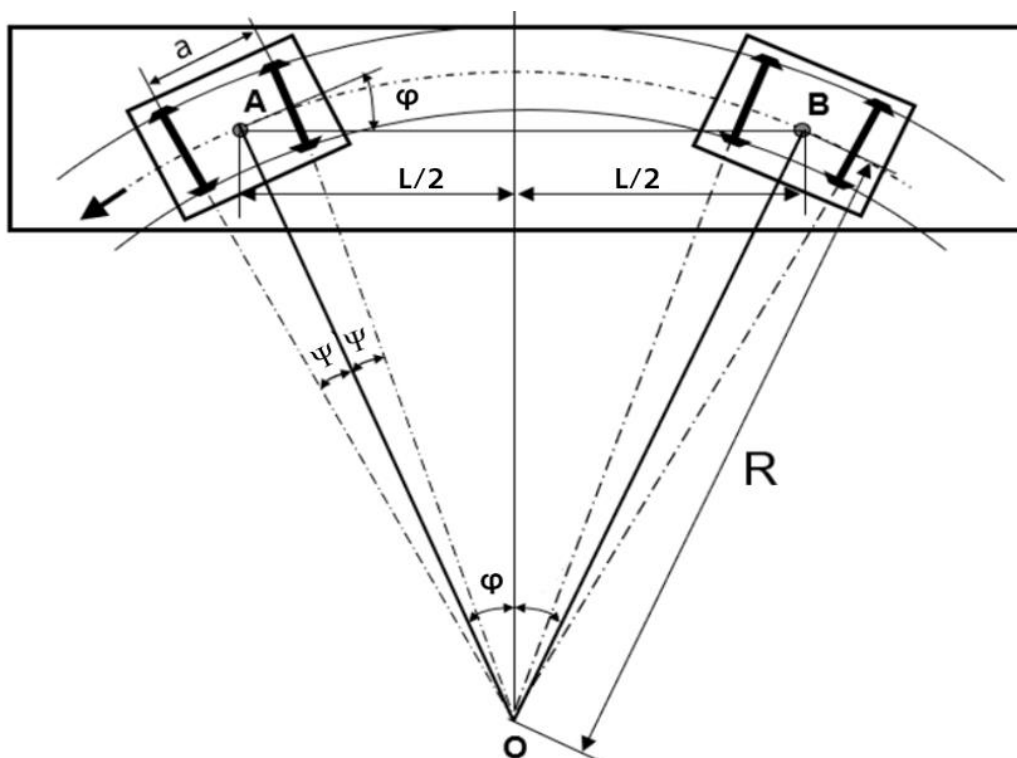
Tento mechanismus je originálním řešením vyvinutým pouze pro podvozky vozů souprav tokijského metra Ginza line. Podvozky však zprvu mechanismem osazeny nebyly. Zabudován byl až později po letech provozu, kdy bylo zapotřebí zlepšit jízdní vlastnosti. Proto se konstruktéři tohoto mechanismu, snažili vyjít se stávajícími možnostmi podvozku, upravit tak jen nutné prvky a výrazněji nezasahovat do jeho samotné koncepce. Jedná se tedy v celku o jednoduchý mechanismus, skládající se ze tří táhel.

Ačkoliv je systém výhradně zkonstruován pouze pro podvozky vozidel Ginza line, svými parametry a konstrukcí se jeví jako dobře aplikovatelný pro podvozky jiných vozů metra. Pokusím se ho tedy navrhnout pro rozměry podvozku metra pražského M1.



## 4.2 Kinematický popis

Na začátku kinematického popisu mechanismu, musíme vycházet ze základního geometrického popisu postavení otočného podvozku v oblouku (Obrázek 26). Goniometrickými funkcemi můžeme tak jednoduše vyjádřit úhel  $\varphi$  natočení podvozku vůči skříní a také úhel  $\Psi$  natočení dvojkolí a dostat tak jejich cílové hodnoty.



Obrázek 26 - Schéma postavení podvozku v oblouku

$L$  je vzdálenost středů podvozku, parametr  $a$  je vzdálenost náprav.  $R$  značí poloměr oblouku. Z nich vyjádříme jednotlivé úhly

$$\sin \varphi = \frac{L}{2R} \quad (1)$$

$$\tan \Psi = \frac{a}{2R} \quad (2)$$

Natočení se pohybuje v malých úhlech, proto platí:  $\sin \varphi \cong \varphi$ ,  $\tan \Psi \cong \Psi$ . Poté tedy ze vztahů (1) a (2) vyplývá

$$\frac{L}{\varphi} = \frac{a}{\Psi} \quad (3)$$

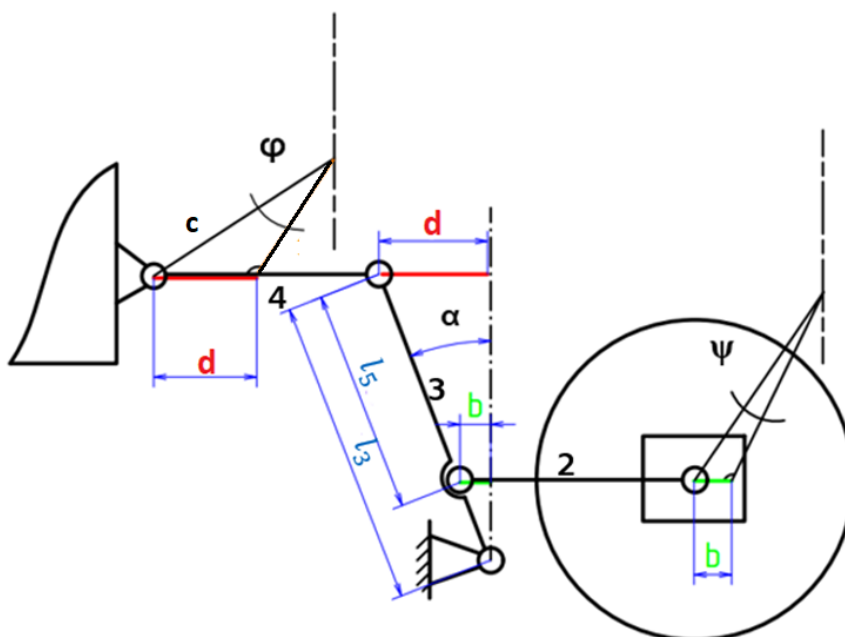
Dosazením konkrétních hodnot za parametry  $L, a$  do rovnice (3) pro podvozek M1 pražského metra získávám

$$\Psi = \frac{\varphi}{6} \quad (4)$$



Pro ideální natočení dvojkolí pro podvozek pražského metra je tak zapotřebí převést mechanismem 6x menší úhel, než je úhel natočení podvozku.

Základní kinematický popis přenesu do schématu mechanismu (Obrázek 27) tokijského metra. Na obrázku je vidět jednoduché kinematické schéma mechanismu s jednotlivými táhly a jsou zde vidět také úhly  $\varphi$  a  $\psi$ , jejichž hodnoty a poměr znám z přechozích vztahů (1,2). Znám také rozměr  $c$  vzdálenosti středu skříně a uložení táhla 4. Z nich můžu dále určit posunutí táhel  $d, b$  při průjezdu obloukem.



Obrázek 27 - Kinematické schéma mechanismu

Parametr  $c$  představuje vzdálenost uložení od středu skříně. Červený úsek posunutí  $d$  tak lze vyjádřit jako

$$d = \sin \varphi \cdot c \quad (5)$$

Posunutí táhel  $d, b$  tak musí být také v poměru jako úhly  $\varphi$  a  $\psi$

$$b = \frac{d}{6} \quad (6)$$

Pro správné natočení dvojkolí je tak stěžejní rozměr  $l_5$  na svislém táhle. Poměr ze vztahu (6) musí platit také pro rozdíl délek  $l_3$  a  $l_5$ . Z toho tedy dostáváme

$$\begin{aligned} l_3 - l_5 &= \frac{1}{6} l_3 \\ l_5 &= \frac{5}{6} l_3 \end{aligned} \quad (7)$$

Tímto máme daný ideální rozměr  $l_5$ .

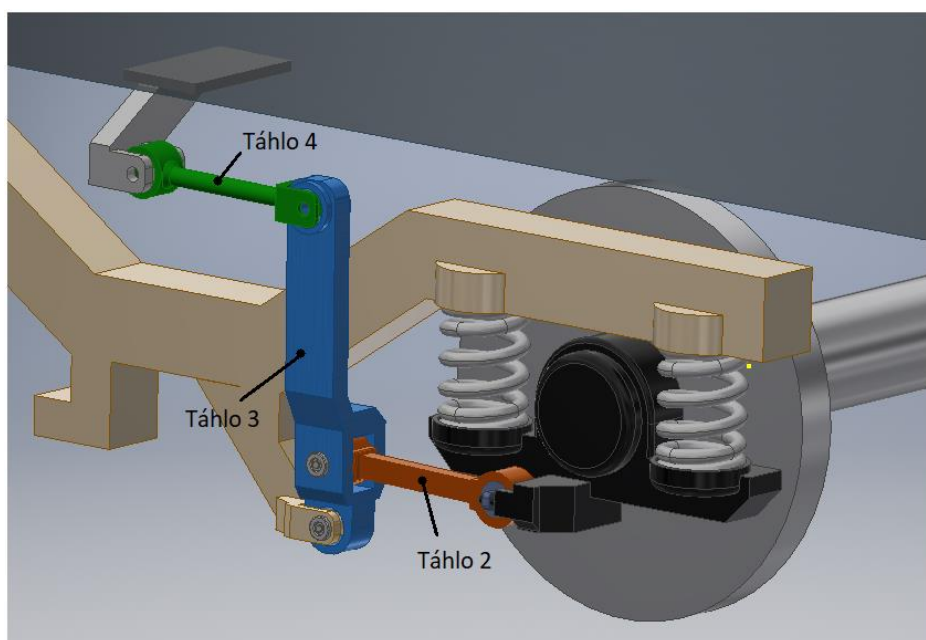


## 4.3 Stanovení rozměrů mechanismu a návrh zástavby do podvozku

### 4.3.1 Zástavba

Zástavbu mechanismu povedu do podvozku M1 pražského metra. Tento podvozek však není plně uzpůsobený svými prvky ve vypružení a vedení dvojkolí pro aplikaci mechanismu. Musely by tak být upraveny stávající nebo navrženy nové prvky primárního vypružení a vedení dvojkolí, aby dokázaly poskytnout mechanismu dostatečnou možnost pro natočení. To ale není cílem mé práce. Pro můj elementární návrh bude tedy stačit, když budu uvažovat, že podvozek disponuje poddajným vedením a aplikace mechanismu z hlediska těchto prvků je zcela možná.

Mechanismus se skládá ze tří táhel a propojuje vzájemně skříň vozidla, podélník podvozku a skříň nápravy. Na obrázku (Obrázek 28) je vytvořen přibližný model zástavby mechanismu, kde jsou vidět všechny jeho části. Oranžové táhlo (táhlo 2) propojuje ložiskovou skříň nápravy a svislé modré táhlo (táhlo 3). Na ložiskové skříni je vytvořen úchyt pro táhlo. Svislé modré táhlo je spodním kloubem upevněno k podélníku podvozku. Z rozměrových důvodů mechanismu není možné spodní kloub uchytit přímo do podélníku. Vytvořil jsem tak na podélníku držák s úchytem. Nad spodním kloubem je v táhlu uloženo táhlo oranžové. Výše se svislé táhlo vyhybá podélníku a na horním konci je spojeno se zeleným táhlem (táhlo 4), které je uchyceno ke skříni vozu. Pro spojení a uchycení táhel použiji pryžokovové klouby, které poskytují možnost torzní i kardanické deformace.

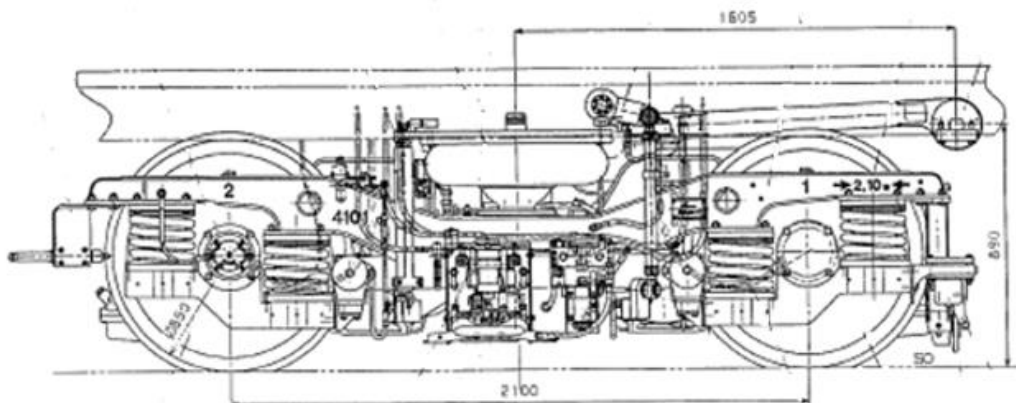


Obrázek 28 - Model zástavby



### 4.3.2 Rozměry táhel

Rozměry mechanismu jsem stanovil z dostupné výkresové dokumentace podvozku pražského metra M1, kde jsem odměřil potřebné vzdálenosti.



Obrázek 29 - Výkres podvozku M1

Z kinematického rozboru víme, že důležitý je rozměr  $l_5$ , který jsem vyjádřil jako  $l_5 = \frac{5}{6} \cdot l_3$

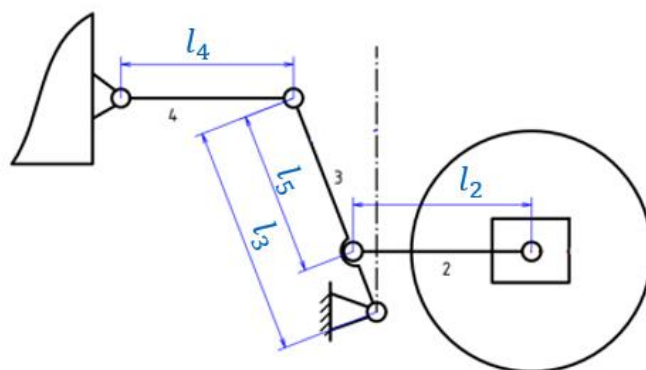
Stanovené rozměry táhel:

$$l_2 = 420 \text{ mm}$$

$$l_3 = 690 \text{ mm}$$

$$l_5 = 575 \text{ mm}$$

$$l_4 = 300 \text{ mm}$$



Obrázek 30 - Mechanismus s rozměry táhel



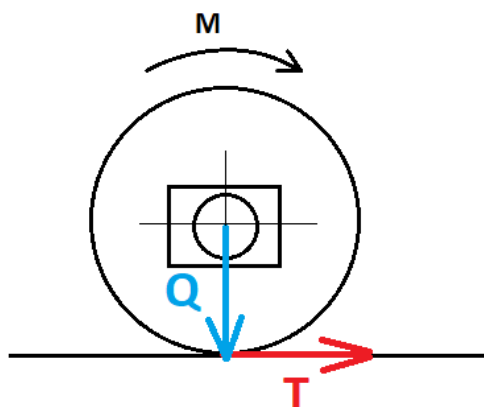
#### 4.4 Určení tečné síly

Abych mohl začít se silovým rozbořem, musím nejdříve stanovit sílu, která na mechanismus působí. Pokud na kolo působí svislé zatížení a hnací moment, vzniká ve stykových plochách kola a kolejnice tečná síla (Obrázek 31).[24] To je ta síla, kterou musí přenést mechanismus, aby docílil natočení dvojkolí.

Tečnou sílu určíme ze vztahu

$$T = Q \cdot \mu \quad (8)$$

Kde  $\mu$  je součinitel adheze, pro který volím přibližně střední hodnotu  $\mu = 0,35$  a  $Q$  je síla svislého zatížení působící na kolo.



Obrázek 31 - Tečná síla

Vypočtu tedy svislé zatížení pro podvozek M1 pražského metra

$$Q = \frac{\text{Max. zatížení nápravy}}{2} \cdot g$$

Max. zatížení nápravy: 12,5 t

$$g = 9,81 \text{ ms}^{-1}$$

$$Q = \frac{12500}{2} \cdot 9,81 = 61\,312 \text{ N} \quad (9)$$

Dosazením hodnot do vztahu (5) tak určím velikost tečné síly

$$T = 61312 \cdot 0,35 = 21\,459 \text{ N} \quad (10)$$

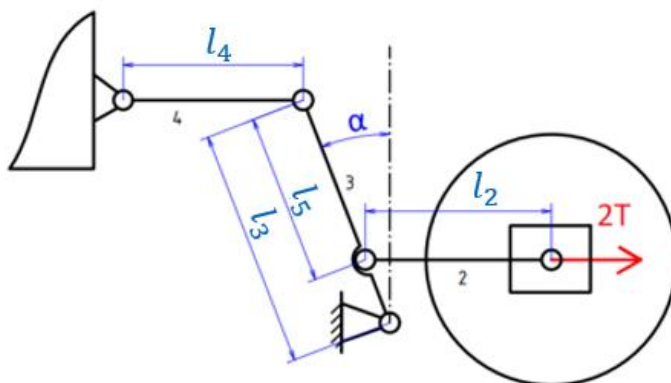
Tuto sílu musí přenést mechanismus na obou stranách. Může však nastat situace, že mechanismus bude muset přenést větší sílu než  $T$ , maximálně však  $2T$ . Jelikož by poškození mechanismu mohlo mít fatální dopad na bezpečnost jízdy, budu uvažovat při dimenzování sílu  $2T$ .





## 4.5 Silový rozbor

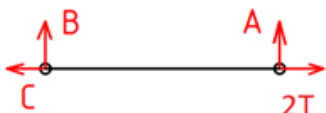
Provedu rozbor vnitřního silového působení v mechanismu k vypočtení potřebných reakcí. Při základním silovém rozboru si vystačím s rovinným schématem a také s tím, že na mechanismus působí pouze tečná síla  $2T$  (Obrázek 32). Při hlubším rozboru konkrétního řešení by však bylo nutné zabývat se vratnými silami, které jsou způsobeny prvky ve vypružení vozidla.



Obrázek 32 - Mechanismus zatížen silou  $2T$

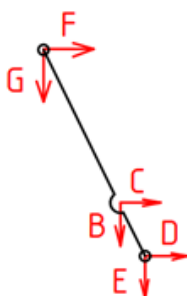
Postupně uvolním všechna tělesa mechanismu a sestavím jejich rovnice rovnováhy (Obrázek 33).

**Táhlo 2**



$$\begin{aligned} x: 2T - C &= 0 \\ y: A + B &= 0 \\ M: A \cdot l_2 &= 0 \end{aligned}$$

**Táhlo 3**



$$\begin{aligned} x: C + D + F &= 0 \\ y: -G - B - E &= 0 \\ M: D \cdot l_3 \cdot \cos\alpha + C \cdot l_3 \cdot \cos\alpha - E \cdot l_3 \cdot \sin\alpha - B \cdot l_3 \cdot \sin\alpha &= 0 \end{aligned}$$

**Táhlo 4**



$$\begin{aligned} x: J - F &= 0 \\ y: K + G &= 0 \\ M: G \cdot l_4 &= 0 \end{aligned}$$

Obrázek 33 - Uvolnění a silový rozbor těles mechanismu



Z rovnic rovnováhy vyjádříme a vypočteme jednotlivé reakce

$$C = 2T = 2 \cdot 21\,459 = 42\,918 \text{ N}$$

$$D = -\frac{C \cdot l_5}{l_3} = -\frac{42\,918 \cdot 575}{690} = -35\,765 \text{ N}$$

$$F = -C - D = -42\,918 + 35\,765 = -7\,153 \text{ N}$$

$$J = F = -7\,153 \text{ N}$$

$$A = B = E = G = K = 0 \quad (11)$$

Reakce jsou vypočteny, můžu tak začít s dimenzováním jednotlivých částí.

#### 4.6 Pevnostní dimenzování mechanismu

V této kapitole budu pevnostně kontrolovat mnou zvolené průřezy jednotlivých táhel. Poté navrhnou pryžové klouby z katalogu GMT pro uchycení a spojení táhel. Pro táhla mechanismu jsem jako materiál zvolil ocel 11 423, která se běžně používá v konstrukcích železničních vozidel.

Průřezy jsem volil na straně vyšší bezpečnosti  $k$ .

##### 4.6.1 Táhlo 2

Táhlo 2 je namáháno na tah-tlak a na vzpěr.

Zvolil jsem obdélníkový průřez:  $S = b \cdot h = 35 \cdot 50 = 1750 \text{ mm}^2$

##### 4.6.1.1 Tah/Tlak

Potřebné parametry:

$$S = 1750 \text{ mm}^2$$

$$R_e = 220 \text{ MPa}$$

$$F = 2T = 42\,918 \text{ N}$$



Obrázek 34 - Namáhání tahem



$$\sigma = \frac{F}{S} \leq \sigma_{Dt}$$
$$\sigma_{Dt} = \frac{Re}{k}$$
$$\sigma = \frac{42\,918}{1750} = 24,5 \text{ MPa} \rightarrow k = \frac{220}{24,5} = 8,9 \quad (12)$$

#### 4.6.1.2 Vzpěr

Jedná se o 2. případ vzpěru (Obrázek 35).



Obrázek 35 - 2.případ vzpěru

Potřebné parametry:

$$S = b \cdot h = 35 \cdot 50 = 1750 \text{ mm}^2$$

$$Re = 220 \text{ MPa}$$

$$l = 420 \text{ mm}$$

Jako první určím štíhlost a mezní štíhlost prutu

$$\lambda_{mez} = \sqrt{\frac{n \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{\frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5}{220}} = 94,7$$
$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{i}} = \frac{l}{\sqrt{\frac{J_{min}}{A}}} = \frac{l}{\sqrt{\frac{\frac{b^3 \cdot h}{12}}{b \cdot h}}} = \frac{420}{\sqrt{\frac{35^3 \cdot 50}{12}}} = 41,56$$

(13)



Z výpočtů vyplývá že  $\lambda < \lambda_{mez}$ , což znamená že se pohybují v oblasti nepružného vzpěru.

V této oblasti se pro řešení a určení kritické síly používá metoda dle Tetmajera.

Vztah pro kritické napětí vypadá takto

$$\sigma_{kr} = a - b \cdot \lambda - c \cdot \lambda^2 \quad (14)$$

Kde  $a, b, c$  jsou experimentálně stanovené konstanty, nabývající hodnot dle tabulky na obrázku (Obrázek 36).

Materiál	$a$ [MPa]	$b$ [MPa]	$c$ [MPa]	$\lambda_m$
Ocel	320	1,2	0	90
Litina	776	12	0,053	80
Dřevo	29,3	0,194	0	110

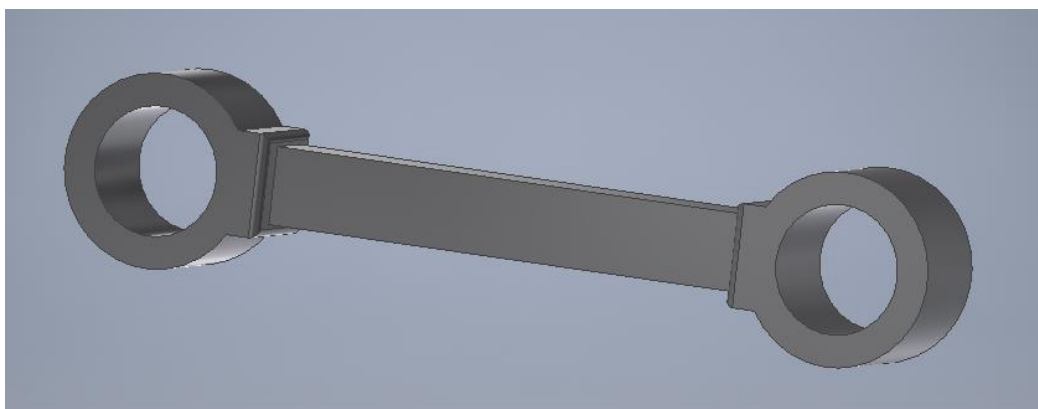
Obrázek 36 - Tabulka koeficientů [25]

Pro náš materiál použijeme řádek s hodnotami pro ocel, změníme však první koeficient  $a$ , který by měl přibližně odpovídat hodnotě meze kluzu dané oceli. Pro naši ocel tedy užije koeficient  $a = 230$  MPa.

$$\sigma_{kr} = a - b \cdot \lambda - c \cdot \lambda^2 = 230 - 1,2 \cdot 41,56 = 180,128 \text{ MPa}$$

$$F_{kr} = \sigma_{kr} \cdot S = 254,9 \cdot 1750 = 315224 \text{ N}$$

$$k = \frac{F_{kr}}{F} = \frac{446075}{42918} = 7,3 \quad (15)$$



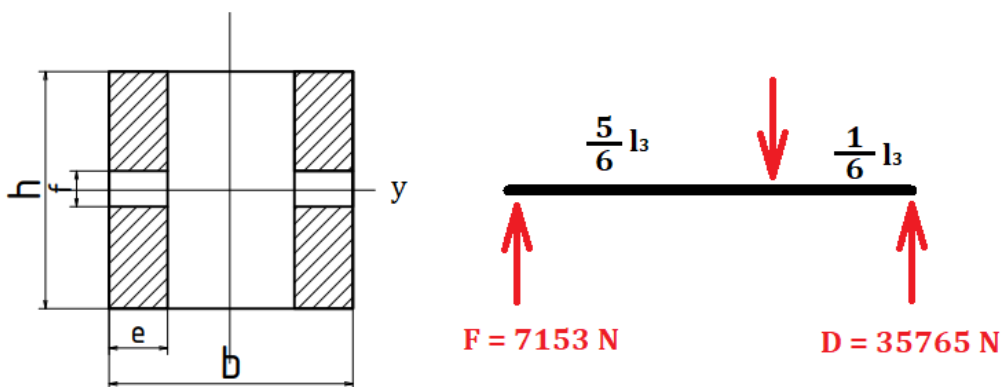
Obrázek 37 - Model táhla 2



### 4.6.2 Táhlo 3

Táhlo 3 je namáháno kombinovaně na ohyb a také na krut. Toto namáhání je způsobeno vychýlením táhla z osy z důvodu nutnosti se vyhnout podélníku podvozku. Na toto složitější namáhání by bylo zapotřebí použití analýzy MKP.

Provedu tak alespoň základní dimenzování na ohyb (Obrázek 38).



Obrázek 38 - Průřez a schéma ohybu

Ze silového rozboru známe reakce v podpěrách, stačí tedy určit průřezový modul  $W_o$  a velikost moment v požadovaném místě  $M_o$ .

Potřebné parametry:

$$h = 125 \text{ mm}$$

$$e = 32 \text{ mm}$$

$$f = 30 \text{ mm}$$

$$l_3 = 690 \text{ mm}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_o}{W_o}$$

$$W_o = \frac{J_y}{\frac{h}{2}}$$

$$J_y = \left( \frac{e \cdot h^3}{12} - \frac{e \cdot f^3}{12} \right) = \left( \frac{32 \cdot 125^3}{12} - \frac{32 \cdot 30^3}{12} \right) = 5136333 \text{ mm}^4$$

$$\rightarrow W_o = \frac{J_y}{\frac{h}{2}} \cdot 2 = \frac{5136333}{\frac{125}{2}} \cdot 2 = 164362,6 \text{ mm}^3$$

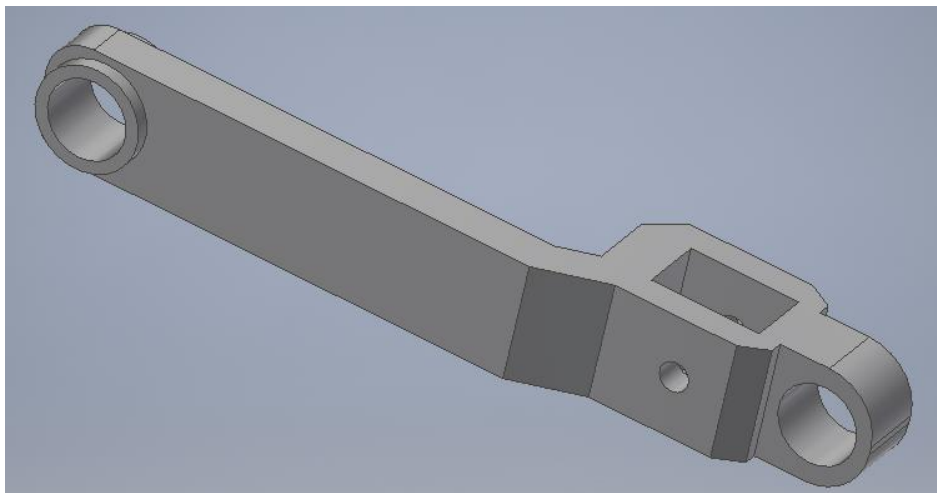
$$M_o = \frac{1}{6} \cdot l_3 \cdot D = \frac{1}{6} \cdot 690 \cdot 35765 = 4112975 \text{ N}$$

$$\rightarrow \sigma_{max} = \frac{4112975}{164362,6} = 25 \text{ MPa}$$



$$k = \frac{Re}{\sigma_{max}} = \frac{220}{25} = 8,8$$

(16)



Obrázek 39 - Model táhla 3

#### 4.6.3 Táhlo 4

Táhlo 4 je namáháno obdobně jako táhlo 2. Provedeme tedy také pevnostní kontrolu na tah/tlak a na vzpěr.

Pro toto táhlo jsem zvolil kruhový průřez s průměrem  $d = 20$  mm.

##### 4.6.3.1 Tah/Tlak

Potřebné parametry:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 20^2}{4} = 314,2 \text{ mm}^2$$

$$Re = 220 \text{ MPa}$$

$$F = 7153 \text{ N}$$



Obrázek 40 - Namáhání tahem



$$\sigma = \frac{F}{S} \leq \sigma_{Dt}$$

$$\sigma_{Dt} = \frac{Re}{k}$$

$$\sigma = \frac{7153}{314,2} = 22,7 \text{ MPa} \rightarrow k = \frac{220}{22,7} = 9,6 \quad (17)$$

#### 4.6.3.2 Vzpěr

Jedná se o 2. případ vzpěru (obr).



Obrázek 41 - 2.případ vzpěru

Potřebné parametry:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 20^2}{4} = 314,2 \text{ mm}^2$$

$$Re = 220 \text{ Mpa}$$

$$l = 300 \text{ mm}$$

$$n = 1$$

$$\lambda_{mez} = \sqrt{\frac{n \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{\frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5}{220}} = 94,7$$
$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{i}} = \frac{l}{\sqrt{\frac{J_{min}}{A}}} = \frac{l}{\sqrt{\frac{\frac{\pi}{64} \cdot d^4}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2}}} = \frac{300}{5} = 60 \quad (18)$$

Vychází  $\lambda < \lambda_{mez}$ , budeme tedy stejně jako u táhla 2 řešit nepružný vzpěr podle Tetmajera. Koeficienty  $a, b$  jsou stejné jako ve vztahu (15).

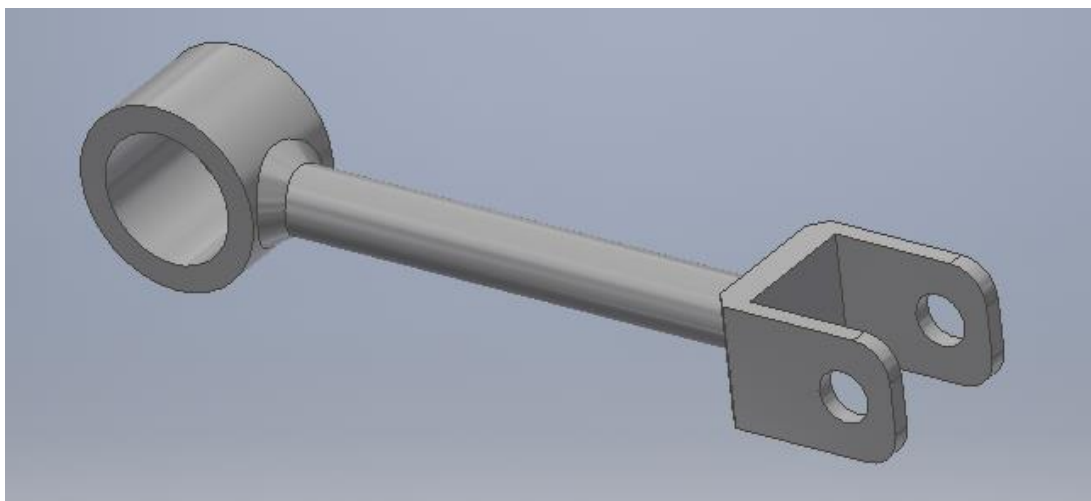
$$\sigma_{kr} = a - b \cdot \lambda - c \cdot \lambda^2 = 230 - 1,2 \cdot 60 = 148 \text{ MPa}$$

$$F_{kr} = \sigma_{kr} \cdot S = 148 \cdot 314,2 = 46501,6 \text{ N}$$



$$k = \frac{F_{kr}}{F} = \frac{46501,6}{7153} = 6,5$$

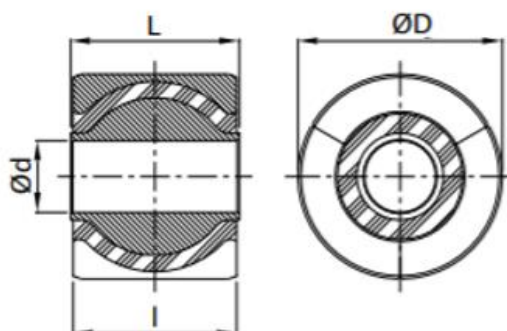
(19)



Obrázek 42 - Model táhla 4

#### 4.6.4 Pryžové klouby

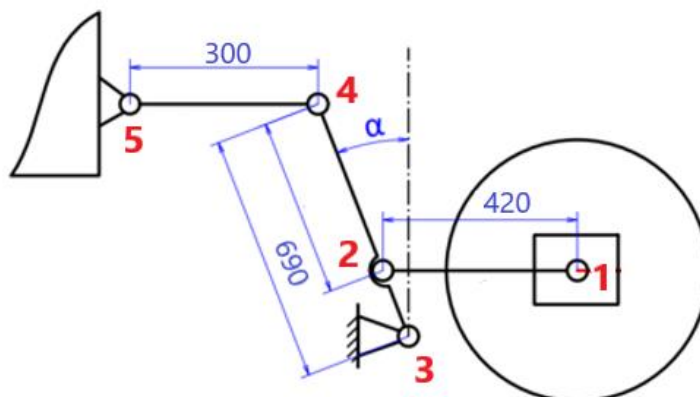
Pro spojení a uchycení táhel použijeme pryžové klouby z katalogu firmy GMT (Obrázek 43).



Obrázek 43 - Pryžový kloub

Z vypočtených reakcí znám radiální zatížení v jednotlivých kloubech. Zapotřebí je také zjistit torzní natočení v kloubu. Budeme uvažovat, že primární vypružení ve svislém směru dovoluje pohyb dvojkolí proti rámu o 20 mm a sekundární vypružení umožní maximální svislý pohyb skříně o 55 mm. Určitě by se při návrhu muselo počítat také s kardanickým natočením. Proto by však bylo potřeba podrobnější analýzou rozklíčovat vzájemné příčné pohyby mechanismu. Pro základní návrh tak budeme vycházet pouze z radiálního zatížení a torzní deformace. Na obrázku jsou červenými čísly označeny jednotlivé klouby mechanismu (Obrázek 43).

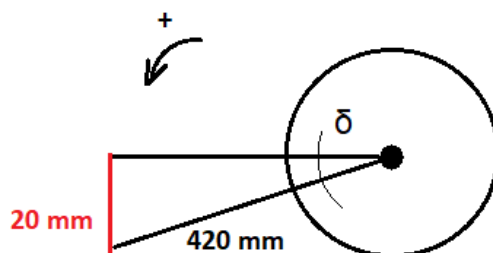




Obrázek 44 - Schéma torzní deformace v kloubu

#### 4.6.4.1 Kloub 1

Torzní natočení v kloubu 1 je závislé na pohybu dvojkolí vůči rámu. Schéma natočení v kloubu je vidět na obrázku (Obrázek 45).



Obrázek 45 - Natočení v kloubu

Úhel  $\delta$  v kladném směru otáčení určíme tedy jako

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{20}{420}\right) = 2,73^\circ \quad (20)$$

Natočení do záporného směru bude minimální. Vydeme tak s hodnotou torzního natočení  $\delta = 2,73^\circ$  a víme že v kloubu působí radiální síla  $2T = 42\,918\text{ N}$ .

Volím tedy kloub označení SPH-SB2 184-57 (Obrázek 45), který vyhovuje požadavkům.

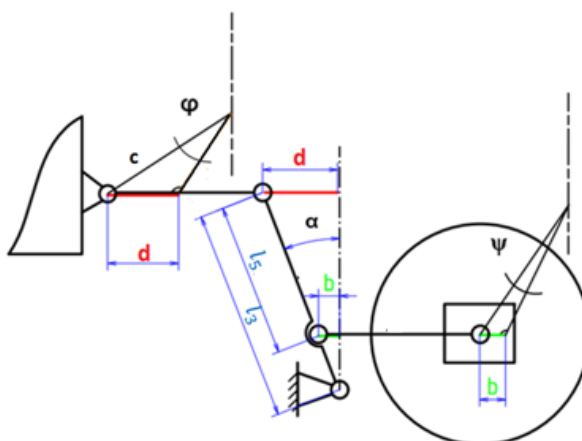


Product Code	ØD mm	Ød mm	L mm	l mm	Radial Stiffness kN/mm	Normal Radial Load kN	Torsional Stiffness kNm/rad	Normal Torsional Movement °	Conical Stiffness kNm/rad	Normal Conical Movement °	Max Mechanical °
SPH-SB1119-57	66.70 66.66	25.4	54.0	47.9	70.0	33.3	0.9	8.0°	0.9	± 6.0°	± 10°
SPH-SB1120-57	90.51 90.47	28.6	76.0	70.0	92.8	57.7	2.8	8.0°	2.8	± 6.0°	± 9.0°
SPH-SB2184-57	90.51 90.47	29.9	76.0	70.0	92.8	57.7	2.8	8.0°	2.8	± 6.0°	± 9.0°
SPH-SB1121-57	104.80 104.76	38.1	82.5	76.2	88.0	71.2	4.0	8.0°	4.0	± 7.0°	± 10.0°
SPH-SB2473-57	127.04 126.98	44.5	104.8	101.6	88.0	110.8	6.8	10.0°	5.7	± 7.0°	± 11.0°
SPH-SB2140-68	127.04 126.98	50.0	104.8	101.6	88.0	110.8	6.8	10.0°	5.7	± 7.0°	± 11.0°

Obrázek 46 - Tabulka s parametry kloubů

#### 4.6.4.2 Kloub 2 a kloub 3

V kloubu 2 je radiální síla  $2T = 42\,918\text{ N}$ . Pro kloub 3 je velikost radiální síla  $D = 35\,765\text{ N}$ .  
K určení natočení v kloubech 2 a 3, musím vypočítat úhel  $\alpha$  (obrázek 47).



Obrázek 47 - Schéma mechanismu

Úhel vypočtu následovně

$$c = 920\text{ mm (uložení táhla od středu skříně)}$$

$$\varphi = \frac{L}{2R} = \frac{12600}{2 \cdot 8000} = 4,5^\circ$$

(úhel při průjezdu obloukem o nejmenším radiusu)

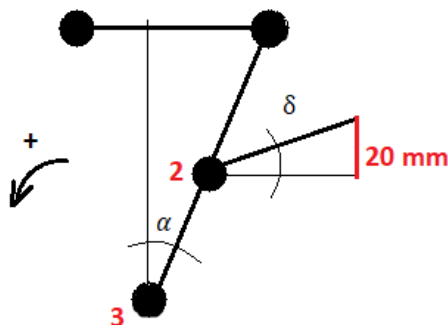
$$d = \sin \varphi \cdot c = \sin(4,5) \cdot 920 = 72,1\text{ mm}$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{72,1}{690}\right) = 6^\circ \quad (21)$$



Pro kloub 3 je  $\alpha$  maximálním natočením v obou směrech. Pohybuje se tedy v rozmezí  $\pm 6^\circ$ .

Kloub 2 je však ještě natočen svislým pohybem táhla upevněného k nápravě, které zvětšuje natočení pouze však při natočení mechanismu proti kladnému směru otáčení (obrázek 48).



Obrázek 48 - Poloha mechanismu při max. natočení v kloubu 2

Ze schématu je tedy patrné, že může dojít k natočení v kloubu o velikosti  $\alpha + \delta$ .

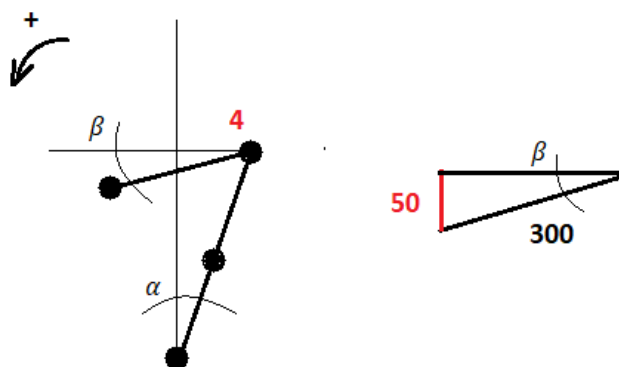
$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{20}{420}\right) = 2,73^\circ \quad (22)$$
$$\alpha + \delta = 6 + 2,73 = 8,73^\circ$$

V kladném směru otáčení se kloub 2 natočí o  $6^\circ$  a v záporném směru o  $8,73^\circ$ .

Pro oba klouby volím stejný pryžový kloub označení SPH-CB2184-57 jako u kloubu 1. S tím že u kloubu 2 bude provedena montáž s korekcí. Kloub 2 bude uložen již s torzní deformací  $+1^\circ$ , aby bylo docíleno požadavku  $\pm 8^\circ$

#### 4.6.4.3 Kloub 4

Kloub 4 se v kladném směru otáčení se torzně natočí maximálně o úhel  $\alpha = 5,9^\circ$ , který známe již ze vztahu (). V tom opačném směru se může kloub 3 maximálně natočit o velikost úhlu  $\alpha + \beta$ , jak je vidět na schématu (Obrázek 49).



Obrázek 49 - Schéma natočení v kloubu 4



Natočení tedy spočteme jako

$$\alpha = 5,9^\circ \text{ (již známe z předchozích výpočtů)}$$

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{50}{300}\right) = 9,6^\circ$$

$$\text{Maximální natočení} = \alpha + \beta = 5,9 + 9,6 = 15,5^\circ \quad (23)$$

Z výpočtu je tedy prokazatelné že se pohybujeme v rozmezí  $+5,9^\circ$  až  $-15,5^\circ$ . Pro tento rozsah natočení žádný nabízený kloub z katalogu nevyhovuje. Výroba kloubu by se musela řešit individuálními požadavky.

#### 4.6.4.4 Kloub 5

V tomto kloubu působí radiální síla  $J = 7135 \text{ N}$  a maximální natočení v kloubu bude mít velikost úhlu  $\beta = 9,6^\circ$ , který jsme vypočetli ve vztahu (23). Z hlediska rozměrů volím pryžový kloub SPH-CB2184-57, jako i předchozích návrhů. Uložení kloubu však musí být vedeno s deformací  $-1^\circ$ , aby bylo docíleno bezpečného fungování.



## 5 Závěr

Cílem práce bylo vytvořit rešerši systémů natáčení náprav a následně pro vybraný systém natáčení navrhnout jeho zástavbu do podvozku metra, provést kinematický, silový rozbor a nadimenzovat jeho jednotlivé části.

Na začátku práce definuji základní pojmy, které pomohou lépe se orientovat v tématu. Poté jsem vytvořil samotnou rešerši systémů natáčení náprav, kterou jsem rozdělil do tří skupin dle způsobu stavění dvojkolí do radiální polohy a popsal jejich základní princip fungování. Pro každou skupinu jsem uvedl několik konkrétních podvozků využívajících těchto systémů. Z rešerše vyplývá, že v poslední době se zásadně vyvíjí především skupina podvozků s aktivním natáčením, kde se stále inovují nové možnosti řízení.

Druhá polovina práce je věnována studii zástavby vybraného mechanismu natáčení dvojkolí do podvozku pražského metra. Vybral jsem mechanický táhlový systém využívaný v podvozcích tokijského metra, který jsem podrobně popsal v již zmiňované rešerši. Vypracoval jsem jeho základní kinematický rozbor, ze kterého jsem poté vycházel při návrhu rozměrů jednotlivých táhel a zástavbě do samotného podvozku. Pro představu rozměrové zástavby v podvozku jsem vytvořil 3D model. Po pevnostním rozboru jsem navrhl jednotlivé průřezy táhel, které jsem následně odkontroloval. Pro uchycení a spojení táhel jsem navrhl pryžové klouby dle katalogu GMT.

Je nutné zmínit, že se jednalo především o elementární návrh celého konceptu, který na začátku vycházel z jasně daných podmínek. Při podrobnější fázi studie by muselo být myšleno na další důležité faktory, které jsem v práci zjednodušil. S návrhem mechanismu by bylo nutné komplexněji přistoupit i k úpravě prvků v konstrukci podvozku pražského metra. Jedná se především o prvky ve vypružení vozidla, které by musely být optimalizovány. Poté by se s jejich vrátnými silami, které jsem v práci neuvažoval, muselo počítat při silovém rozboru. Detailněji také provést rozbor z hlediska příčných sil a pohybů. Kontroly jednotlivých táhel byly provedeny spíše pro ověření celkových rozměrů, jestli vyhovují zvolené prostorové možnosti zástavby. Proto jsem z tohoto hlediska volil vyšší bezpečnost a ponechal tak možnost pokračovat v případných úpravách. Výsledný tvar táhel a případná kontrola náchylných míst by se poté odvíjela od vybrané technologie výroby.

V práci bylo dosaženo stanovených cílů a ukázala tak teoreticky možnou cestu zástavby mechanického systému natáčení do podvozku pražského metra.



## 6 Použitá literatura

- [1] HELLER, Petr a Josef DOSTÁL. POJEZDY A PODVOZKY. *KOLEJOVÁ VOZIDLA II*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009, s. 39. ISBN 978-80-7043-641-7.
- [2] Pojezdy podvozkových vozidel. VAGONY [online]. [cit. 2021-6-15]. Dostupné z: <https://www.vagony.cz/pojezdy/podvozky.html>
- [3] Prvotní vypružení a vedení dvojkolí. VAGONY [online]. [cit. 2021-6-15]. Dostupné z: <https://www.vagony.cz/pojezdy/podvozky.html>
- [4] ŠIROKÝ, Jaromír, Jaroslav MÜLLER a Stanislav ZAPLETAL. *Stavba železničních vozidel* [online]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Univerzita Pardubice, 2013 [cit. 2021-6-15]. Dostupné z: [https://issuu.com/michdor/docs/m10\\_text](https://issuu.com/michdor/docs/m10_text)
- [5] BALL, Peter. The Scheffel Bogie and the Rail Gauge. *THEHERITAGEPORTAL* [online]. 2016 [cit. 2021-6-15]. Dostupné z: <http://www.theheritageportal.co.za/article/scheffel-bogie-and-rail-gauge>
- [6] *Güterwagen-Drehgestelle: LEILA* [online]. 2014 [cit. 2021-6-15]. Dostupné z: <http://www.drehgestelle.de/6/leila.html>
- [7] REY, Lucienne. Mit dem Drehgestell LEILA kommt der Lärmschutz zum Zug. *DOSSIER UMWELTECHNOLOGIEFÖRDERUNG* [online]. 2008, , 4 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=1483&Load=true>
- [8] *Neue Güterwagendrehgestelle – eine Bestandsaufnahme* [online]. In: . 2014, s. 40 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: [http://www.dmg-berlin.info/page/downloads/vortrag\\_scholdan.pdf](http://www.dmg-berlin.info/page/downloads/vortrag_scholdan.pdf)
- [9] TVP2007. *TATRAVAGONKA* [online]. [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <http://tatravagonka.sk/bogie/tvp2007/?lang=en>
- [10] Hydropouzdra v kývačkovém vedení dvojkolí. *Papuchal naležato* [online]. 2018 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <http://papuchalk-nalezato.blogspot.com/2018/03/hydropouzdra-v-kyvackovem-vedeni.html>
- [11] Podvozky typu Fiat. VAGONY [online]. [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: [https://www.vagony.cz/pojezdy/mapa/podvozky\\_mapa\\_fiat.html](https://www.vagony.cz/pojezdy/mapa/podvozky_mapa_fiat.html)
- [12] HYDRAULIC AXLE-GUIDE BEARINGS (HALL). *Vibration Control Technology Railway Vehicle* [online]. Freudenberg Schwab, 2012, 2012, , 20-21 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/5005908/vibration-control-technology-railway-vehicle-freudenberg-schwab>
- [13] Čepové vedení s proměnnou podélnou a příčnou tuhostí a s vypružením šroubovitou pružinou. HELLER, Petr a Josef DOSTÁL. *KOLEJOVÁ VOZIDLA II*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009, s. 124. ISBN 978-80-7043-641-7.
- [14] Güterwagen-Drehgestelle: Gummifeder - Gigabox. *Drehgestelle* [online]. 2011 [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: [http://www.drehgestelle.de/6/gummi\\_gigabox.html](http://www.drehgestelle.de/6/gummi_gigabox.html)



- [15] HERMANN, Jahn. Axiom LN 25. *InnoBogies* [online]. 2016 [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <http://www.innobogies.de/de/axiom%20ln%2025%20de.html>
- [16] WEI, Yunfan. *Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen* [online]. Karlsruhe, 2014 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Spurf%C3%BChrungsregelung-eines-aktiv-gelenkten-Radpaars-Wei/f9242516586eeddc00524229165fa4b17158901>. Disertační práce. Karlsruher Institut für Technologie.
- [17] KAHNERT, Pascal. *Development and Optimisation of Innovative Running Gear Concepts for an Ultra-High-Speed Train* [online]. Stockholm, 2015 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:893813/FULLTEXT01.pdf>
- [18] SHIMOKAWA, Yoshiyuki a Masaaki MIZUNO. *Development of the New Concept Steering Bogie* [online]. In: . NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT, 2013, DECEMBER 2013, s. 1-7 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/105-08.pdf>
- [19] KALIVODA, Jan. *SIMULACE AKTIVNÍCH PRVKŮ V PODVOZCÍCH KOLEJOVÝCH VOZIDEL* [online]. In: . České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, s. 1-3 [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: [http://dsp.vscht.cz/konference\\_matlab/MATLAB09/prispevky/051\\_kalivoda.pdf](http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB09/prispevky/051_kalivoda.pdf)
- [20] SCHNEIDER, Richard. ARTICLE Combining capacity with track-friendly technology: FLEXX Tronic WAKO and ARS from Bombardier. *Global Railway Review* [online]. 31 May 2010 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <https://www.globalrailwayreview.com/article/5797/combining-capacity-with-track-friendly-technology-flexx-tronic-wako-and-ars-from-bombardier/>
- [21] HUR, Hyunmoo, Yujeong SHIN a Dahoon AHN. *Analysis on Steering Performance of Active Steering Bogie According to Steering Angle Control on Curved Section* [online]. In: . Kongju National University, 26 June 2020, s. 1-15 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/342525350\\_Analysis\\_on\\_Steering\\_Performance\\_of\\_Active\\_Steering\\_Bogie\\_According\\_to\\_Steering\\_Angle\\_Control\\_on\\_Curved\\_Section](https://www.researchgate.net/publication/342525350_Analysis_on_Steering_Performance_of_Active_Steering_Bogie_According_to_Steering_Angle_Control_on_Curved_Section)
- [22] *Aktives Hall* [online]. In: . Freudenberg Schwab, s. 1 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: [https://www.fst.com/-/media/files/pr/2014-09/hall/2014-09-23\\_pr\\_innotrans-broschuere\\_eu\\_de.pdf](https://www.fst.com/-/media/files/pr/2014-09/hall/2014-09-23_pr_innotrans-broschuere_eu_de.pdf)
- [23] SHIQIAO, Tian, Luo XIANGPING, Ren LIHUI a Xiao CHUNYU. *Active radial system of railway vehicles based on secondary suspension rotation angle sensing* [online]. Published online: 10 Feb 2020, , 1-20 [cit. 2021-7-12]. ISSN 1744-5159. Dostupné z: doi:10.1080/00423114.2020.1722183
- [24] DOSTÁL, Josef a Petr HELLER. Adheze. *KOLEJOVÁ VOZIDLA I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007, s. 29. ISBN 978-80-7043-520-5.
- [25] HALAMA, Radim. Pružnost a pevnost – interaktivní studijní materiál [online]. [cit. 2021-07-12]. Dostupné z:



[http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost\\_pevnost\\_obraz.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost_pevnost_obraz.pdf).

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Západočeská univerzita v Plzni.





## 7 Seznam použitých zkratek a symbolů

$L$	[mm]	Vzdálenost středů podvozků
$a$	[mm]	Vzdálenost náprav v podvozku
$R$	[mm]	Poloměr oblouku
$\varphi$	[°]	Úhel natočení podvozku pod skříní
$\Psi$	[°]	Úhel natočení nápravy v podvozku
$c$	[°]	Vzdálenost uložení táhla od středu skříně
$T$	[N]	Tečná síla
$k$	[-]	Bezpečnost
$Re$	[MPa]	Mez kluzu materiálu v tahu
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez
$\lambda$	[-]	Štíhlost
$\lambda_{mez}$	[-]	Mezní štíhlost
$\sigma$	[MPa]	Napětí v součásti
$\sigma_{Dt}$	[MPa]	Dovolené napětí v materiálu
$\sigma_{kr}$	[MPa]	Kritické napětí
$F_{kr}$	[N]	Kritická síla



## 8 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 - Úhel náběhu [20] .....	11
Obrázek 2 - Podvozek Leila [4] .....	13
Obrázek 3 - Křížová vazba v podvozku Leila [7] .....	14
Obrázek 4 - Podvozek TVP-2007 [8].....	15
Obrázek 5 - Křížová vazba podvozku TVP 2007 a podvozku LEILA .....	15
Obrázek 6 - Vedení dvojkolí kyvným ramenem, 1 – podélník rámu, 2 – ložisková skříň, 3 – kyvné rameno, 4 – kloub kyvného ramena [11] .....	16
Obrázek 7 - Hydropouzdro v podélném řezu [10] .....	17
Obrázek 8 - Řez speciálního čepové vedení, 1- kuželová rozpěra v dolní poloze při jízdě v oblouku, 2 – kuželová rozpěra horní poloze při jízdě v přímé trati [13].....	18
Obrázek 9 - Systém Gigabox [14] .....	18
Obrázek 10 - Systém Gigabox [14] .....	18
Obrázek 11 - Podvozek LN25 s radiálními rameny, 1 – rameno ,2- pryžový kloub .....	19
Obrázek 12 - Podvozek navigátor na voze INC [17] .....	19
Obrázek 13 - Princip mechanismu v podvozku Navigator [16].....	20
Obrázek 14 - Podvozek SC101 pro Ginza line [18] .....	20
Obrázek 15 - Propojení článku soupravy [17] .....	21
Obrázek 16 - Mechanismus vedení nápravy [16] .....	22
Obrázek 17 - Schéma aktivního řídicího systému [20].....	22
Obrázek 18 - Systém aktivního řízení na podvozku vozu Regina [20] .....	23
Obrázek 19 - Systém aktivního natáčení v podvozku vozidla [21].....	24
Obrázek 20 - Schéma aktivního systému natáčení [21].....	24
Obrázek 21 - Závislost působení podélné síly [21] .....	24
Obrázek 22 - Systém aktivního natáčení HALL 2.0. [22] .....	25
Obrázek 23 - Snímací kamera poloměru oblouku [22] .....	25
Obrázek 24 - Systém aktivního natáčení [23] .....	25
Obrázek 25 - Mechanismus v podvozku tokijského metra .....	27
Obrázek 26 - Schéma postavení podvozku v oblouku .....	28
Obrázek 27 - Kinematické schéma mechanismu .....	29
Obrázek 28 - Model zástavby.....	30
Obrázek 29 - Výkres podvozku M1 .....	31
Obrázek 30 - Mechanismus s rozměry táhel.....	31
Obrázek 31 - Tečná síla .....	32
Obrázek 32 - Mechanismus zatížen silou 2T.....	33
Obrázek 33 - Uvolnění a silový rozbor těles mechanismu.....	33
Obrázek 34 - Namáhání tahem .....	34
Obrázek 35 - 2.případ vzpěru.....	35
Obrázek 36 - Tabulka koeficientů [25] .....	36
Obrázek 37 - Model táhla 2.....	36
Obrázek 38 - Průřez a schéma ohybu .....	37
Obrázek 39 - Model táhla 3.....	38
Obrázek 40 - Namáhání tahem .....	38
Obrázek 41 - 2.případ vzpěru.....	39



Obrázek 42 - Model táhla 4.....	40
Obrázek 43 - Pryžový kloub.....	40
Obrázek 44 - Schéma torzní deformace v kloubu.....	41
Obrázek 45 - Natočení v kloubu.....	41
Obrázek 46 - Tabulka s parametry kloubů.....	42
Obrázek 47 - Schéma mechanismu.....	42
Obrázek 48 - Poloha mechanismu při max. natočení v kloubu 2 .....	43
Obrázek 49 - Schéma natočení v kloubu 4.....	43