

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STAVEBNÍ**

**KATEDRA  
ŽELEZNIČNÍCH STAVEB**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**DYNAMICKÁ ANALÝZA KOLEJE  
PŘI PRŮJEZDU TRAMVAJÍ**

**2023**

**LUCIE  
SEMERÁDOVÁ**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: S E M E R Á D O V Á Jméno: L u c i e Osobní číslo: 477 227  
Zadávající katedra: Katedra železničních staveb - K137  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Dynamická analýza koleje při průjezdu tramvají

Název bakalářské práce anglicky: Dynamic analysis of tram track

**Pokyny pro vypracování:**

V rámci rešeršní části práce zpracujte přehled metod měření průhybu koleje a parametrů ovlivňujících průhyb koleje. S ohledem na zaměření další (praktické) části dále zpracujte základní popis tramvajového vozového parku DP Praha se zameřením na hmotnost, nápravové tlaky, a další parametry ovlivňující dynamické účinky na trať.

V rámci praktické části proveďte alespoň tři měření průhybu koleje na zvolených místech na tramvajových tratích, včetně vyhodnocení. Při hodnocení se zaměřte na rozdíly průhybu mezi jednotlivými typy tramvají podle jejich hmotnosti nebo jiného vhodně zvoleného parametru.

**Seznam doporučené literatury:**

Kulich Pavel, Dynamická analýza koleje, Brno 2017

Mojžíšek Dominik, Dynamická analýza koleje, Brno, 2018

Esveld Coenraad, Modern railway track, MRT Production, 2001 .

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Ondřej Bret

Datum zadání bakalářské práce: 22. 9. 2022 Termín odevzdání bakalářské práce: 9. 1. 2023

*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

.....  
Podpis vedoucího práce

.....  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

.....  
Datum převzetí zadání

.....  
Podpis studenta(ky)

## PODROBNÉ ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Studentka: **LUCIE SEMERÁDOVÁ**

Akademický rok: **2022/2023**

### **UPŘESŇUJÍCÍ BODY PRO ZPRACOVÁNÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE:**

Na základě podrobnějšího vytipování a v kooperaci se správcem dopravní cesty bude měření průhybu kolejnic provedeno NA DVOU lokalitách, a sice:

- v mezizastávkovém úseku Přístaviště – Pobřežní cesta a
- v mezizastávkovém úseku U Libušského potoka – Modřanská rokle.

V rámci měření bude provedeno:

- měření průhybu kolejnic, v každé lokalitě pro alespoň 10 tramvají,
- měření rychlosti, sledování a záznam přibližné obsazenosti spojů.

### **ODEVZDÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:**

Práce bude odevzdána jak elektronicky, tak v papírové podobě.

Elektronicky bude odevzdána formou vložení .pdf souborů s úplným zněním bakalářské práce (včetně všech příloh) do studijního informačního systému KOS ve stanoveném termínu, tedy nejpozději do půlnoci 9.1.2023.

V Praze,  
16. listopadu 2022

---

vedoucí DP

---

převzala



### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Dynamická analýza koleje při průjezdu tramvají** zpracovala samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Lucie Semerádová



## **Poděkování**

V první řadě bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ondřeji Bretovi za jeho ochotu, rady a odborné vedení. Dále bych také chtěla poděkovat celé Katedře železničních staveb za zapůjčení měřicího přístroje, zejména pak Ing. Pavlu Voříškovi za pomoc s měřením. Nakonec bych ráda poděkovala svým blízkým za podporu během tvorby závěrečné práce i v průběhu celého studia.



---

# **Dynamická analýza koleje při průjezdu tramvají**

Dynamic analysis  
of tram track



## **Anotace**

Práce je rozdělena na dvě hlavní části. V první, rešeršní části, jsou uvedeny možnosti modelování chování kolejnice při průjezdu drážních vozidel a příklady dynamické analýzy a jejich výsledků na železničních drahách v ČR.

Druhá, stěžejní část, je zaměřena na provedení praktického měření průhybu kolejnice na tramvajových tratích v Praze, a to včetně vyhodnocení měření a zjišťování korelačních závislostí na daných a sledovaných parametrech. Zatímco měření dynamických účinků na železničních tratích proběhlo již velké množství, odborných měření na tramvajových tratích dosud proběhlo (bylo publikováno) minimum.

## **Klíčová slova:**

Tramvajová trať, průhyb kolejnic, dynamická analýza, in-situ měření



---

## Summary

The work is divided into two main parts. In the first part, the research part, the possibilities of modelling the rail behaviour during the passage of railway vehicles and examples of dynamic analysis and their results on railway lines in the Czech Republic are presented.

The second, the main part, is focused on performing practical measurements of rail deflection on tramways in Prague, including the evaluation of measurements and finding correlation dependencies on given and observed parameters. While a large number of measurements of dynamic effects on railway lines have already been carried out, only a minimum number of technical measurements on tram lines have been carried out (published).

## Key words:

Tramway track, rail deflection, dynamic analysis, in-situ measurement







## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>13</b>
1.1	Úvod .....	13
1.2	Cíle práce.....	14
<b>2</b>	<b>Rešeršní část .....</b>	<b>15</b>
2.1	Modelování průhybu kolejnic .....	15
2.1.1	Timošenko – Zimmermannův model .....	15
2.1.2	Pasternakův model .....	16
2.1.3	Dvouvrstvý systém .....	16
2.1.4	Dynamická soustava.....	17
2.2	Výběr z dynamických analýz koleje v ČR.....	17
2.2.1	Diplomová práce: Dynamická analýza koleje – Kulich Pavel .....	17
2.2.1.1	Pasternakův model – dynamická soustava.....	17
2.2.1.2	Dvouvrstvý systém – dynamická soustava .....	17
2.2.1.3	Dvouvrstvý systém – dynamická soustava II. ....	17
2.2.1.4	Porovnání modelů.....	18
2.2.2	Diplomová práce: Dynamická analýza koleje – Mojžíšek Dominik.....	19
2.2.2.1	Diskrétní model.....	19
2.2.2.2	Dvouvrstvý systém.....	19
2.2.2.3	Prut diskrétně podepřený se spojitým modelem podloží .....	21
2.2.2.4	Dynamické soustavy .....	21
2.2.2.5	Porovnání modelů.....	21
2.2.2.6	Závislost průhybu koleje na ojetí kolejnice.....	21
<b>3</b>	<b>Praktická část.....</b>	<b>22</b>
3.1	Pražský vozový park .....	22
3.1.1	T3R.P .....	23
3.1.2	KT8D5.RN2P .....	24
3.1.3	14T.....	24
3.1.4	15T.....	25
3.2	Popis lokalit měření.....	26
3.2.1	Braník .....	26
3.2.2	Modřany.....	28



---

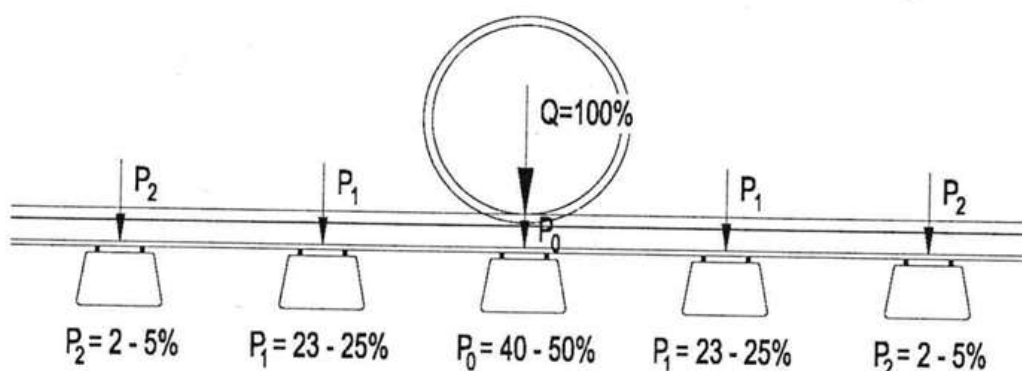
3.3	Popis měření .....	29
3.4	Předpokládaný průhyb.....	30
3.5	Zaznamenaná data.....	31
3.6	Průběh průhybu pro jeden průjezd.....	33
3.7	Závislost velikosti průhybu na rychlosti vozidla.....	34
3.8	Závislost velikosti průhybu na velikosti zatížení .....	36
<b>4</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Seznam grafů .....</b>	<b>45</b>



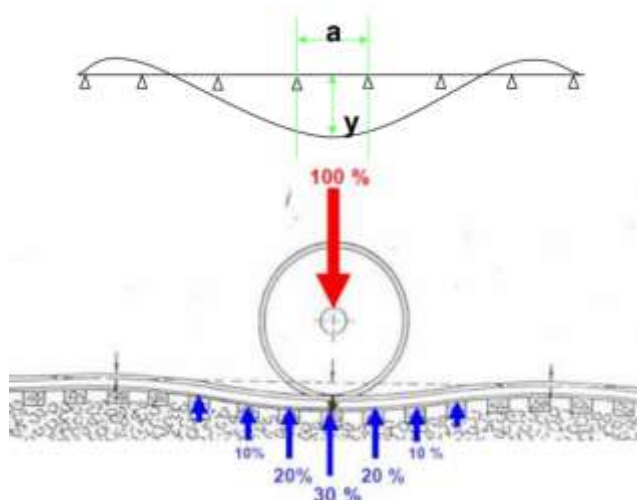
## 1 Úvod

### 1.1 Úvod

Základním úkolem kolejové trati je odolávat silovým účinkům na ni působícím, a zajistit vedení drážního kolejového vozidla. Celá konstrukce koleje je cyklicky vystavována dynamickému zatížení od projíždějících kolejových vozidel. Ta způsobují kromě gravitačních sil také například síly odstředivé, které působí na vozidlo projíždějící směrovým obloukem, rozjezdové a brzdné síly, síly způsobené pohybem kola po kolejnici s imperfekcemi a mnohé další. Celá konstrukce je navrhována tak, aby tyto síly co nejlépe přenesla do podloží a aby se omezily deformace konstrukce pod zatížením. Díky tomu je zajištěn plynulý a bezpečný průjezd vozu. Vnášení zatížení do trati se odehrává na styku kola a kolejnice. Roznos sil ovlivňuje v první řadě ohybová tuhost kolejnice. Dalším významným činitelem je tuhost podepření a vzdálenost kolejnicových podpor – uzlů upevnění. Největší část zatížení jednoznačně přenáší pražec, jenž se zrovna nachází přímo pod kolem. Zbytek zatížení se přeneše na ostatní pražce, které již dále přenášejí zatížení menší. [1] [2] [3]



Obr. 1: Roznos zatížení v koleji pod nápravou [1]



Obr. 2: Roznos zatížení v koleji pod nápravou [4]



Silovými a dynamickými účinky vozidel působících na kolej se již zabývala a dodnes zabývá velká řada výzkumných i jiných prací, od pojetí teoretického až po měření skutečných účinků v provozovaných kolejích. Většina z nich se však zaměřovala a zaměřuje na dynamickou analýzu koleje železničních tratí a tratě tramvajové spíše pomíjí. Tato bakalářská práce je zaměřena na praktické měření dynamických účinků působících na kolej právě u tramvajových tratí. Tramvajové tratě se od tratí železničních odlišují především konstrukčním uspořádáním, nižší rychlostí jízdy, menším zatížením na nápravu, a dále pro tramvaje specifickým uspořádáním pojezdu, tj. vzdáleností podvozků a náprav.

## 1.2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je provedení měření průhybu kolejnic na tramvajových tratích v různých podmínkách konstrukčního uspořádání trati, a to zejména s ohledem na použitý typ a tvar kolejnice, různou rychlost průjezdu tramvajových vlaků a zjištění případného vlivu těchto parametrů na dynamické účinky působící na kolej.



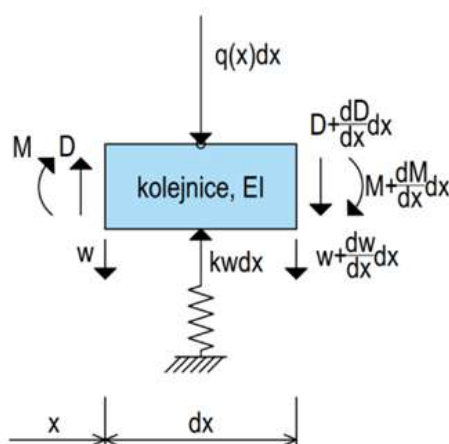
## 2 Rešeršní část

### 2.1 Modelování průhybu kolejnic

Predikce chování železničních konstrukcí při zatížení je cílem mnoha výzkumů dlouhodobě. Teoretická analýza zatížené kolejnice je například vhodná při posuzování únosnosti konstrukce, vlivu opakovaného zatěžování na vznik poškození nebo pro určení pružné deformace při zatížení. Pružná deformace při zatížení je pro tuto bakalářskou práci nejzásadnější. Ačkoliv v dnešní době již můžeme celý problém modelovat jako prostorovou úlohu, přesto jsou stále nejpoužívanější modely koncipovány jako rovinná úloha. Jsou charakteristické prvkem kolejnicového pásu, jenž je přímo napojen na podloží. Kolejnicový pás je pak ve svislém směru zatížen silou reprezentující vozidlo. Tyto modely se těší oblibě, protože i přes svoji jednoduchost jsou schopny vcelku věrně charakterizovat reálnou situaci. [1] [2] [3]

#### 2.1.1 Timošenko – Zimmermannův model

Tento model vychází z Winklerova modelu podloží, u nějž hlavním předpokladem je, že *reakce podloží je přímo úměrná zatlačení nosníku do podloží*. [11] I přestože samotný Winklerův model zanedbává smykové napětí a v místě hranice konstrukce neodpovídá realitě, v praxi se velmi využívá. Timošenko se dále věnoval specifickému příkladu takového modelu a Zimmermann tento konkrétní případ využil na kolejové stavby. Proto se dnes můžeme setkat s pojmenováním tohoto modelu podle obou pánů, Timošenka i Zimmermanna. Základem modelu je nekonečně dlouhý nosník uložený na pružném podloží. Zatěžující síla se zde nepohybuje, tudíž je možné celý systém brát jako statickou soustavu. V našem případě nekonečně dlouhý nosník zastupuje bezстыkovou kolej. Je u něj určena ohybová tuhost  $EI$ , tedy jedna z průřezových charakteristik použité kolejnice. Například kolejnice 60E1 (UIC60) má tuhost 1,673× větší než druhá u nás běžně používaná 49E1 (S49). [5] [6] [8] [9] [10] [11] [12]

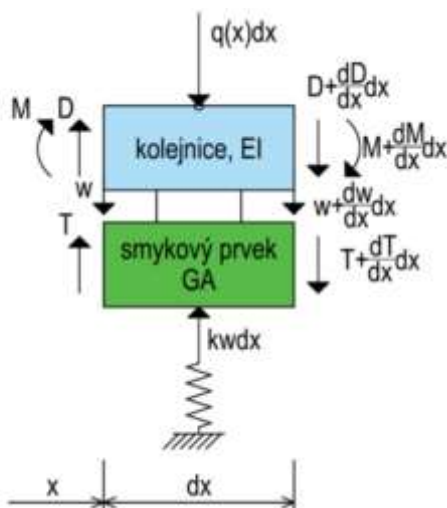


Obr. 3: Schéma Zimmermanova modelu [6]



### 2.1.2 Pasternakův model

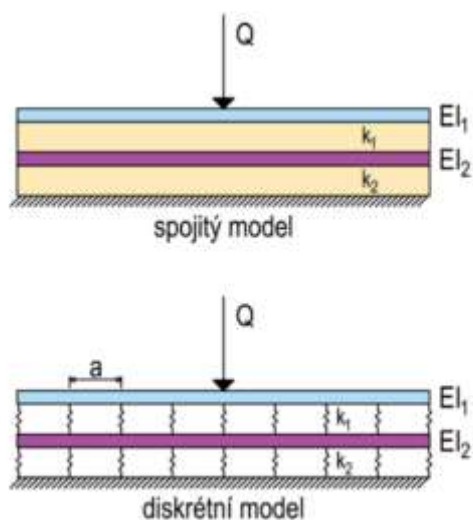
Další model spadající do statických soustav je Pasternakův model. Jedná se o vylepšení Zimmermannova modelu. Modifikace spočívá v přidání smykového prvku dokonale tuze připevněnému k nekonečnému nosníku. Jeho deformace vznikne pouze následkem příčných smykových sil. [5] [6]



Obr. 4: Schéma Pasternakova modelu [6]

### 2.1.3 Dvouvrstvý systém

Jinou modifikací Zimmermannova modelu, a tedy i statickou soustavou, je dvouvrstvý systém. Na rozdíl od předchozích variant zahrnuje i vliv podpor kolejnice. První vrstva opět zastupuje nekonečně dlouhou kolejnici a její tuhost  $EI$ . Pod ní je dále připevněna vrstva zastupující podpory kolejnice, tedy příčné pražce, popřípadě pevnou jízdní dráhu. Připojení obou vrstev je zajištěno pomocí pružin. Rozmístění pružin je dáno rozdělením pražců a upevněním kolejnic. Tento model od sebe odlišuje tuhost podloží a tuhost upevnění. Je tedy zvlášť zahrnut průhyb podloží a průhyb samotné kolejnice. [5] [6]

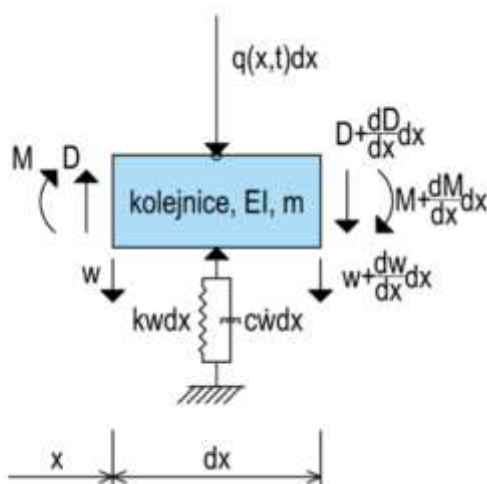


Obr. 5: Schéma Dvouvrstvého systému [6]



#### 2.1.4 Dynamická soustava

Ukázalo se, že pohyb zatížení ovlivňuje průhyby a vnitřní síly na kolejnicích. To vedlo ke vzniku dynamických soustav zohledňujících vliv pohybu vozidel. Nejjednodušší model vychází z Timošenkova modelu, který se jako první zabýval pohyblivou zatěžovací silou. Dále model rozšířil Frýba, jenž model obohatil o účinek tlumení. [5] [6] [7]



Obr. 6: Schéma Dynamické soustavy [6]

## 2.2 Výběr z dynamických analýz koleje v ČR

V rámci rešerše byly dohledány analýzy prováděné v rámci jiných závěrečných prací. Dále je uveden jejich přehled.

### 2.2.1 Diplomová práce: Dynamická analýza koleje – Kulich Pavel

Tématem analytického popisu dynamických jevů v koleji se zabýval student Pavel Kulich. Ve své diplomové práci představil rozšíření běžně používaných analytických modelů. Následně je porovnal, jak mezi sebou, tak i s daty naměřenými v Plané nad Lužnicí při průjezdu prvního podvozku hnacího vozidla rychlostí 77 km/h. [5]

#### 2.2.1.1 Pasternakův model – dynamická soustava

První rozšířený model vychází z Pasternakova modelu, který je doplněn o pohyblivé zatížení. To z celé soustavy dělá soustavu dynamickou. [5]

#### 2.2.1.2 Dvouvrstvý systém – dynamická soustava

Dalším představeným modelem je dvouvrstvý systém, který byl taktéž rozšířen o pohyblivou sílu. [5]

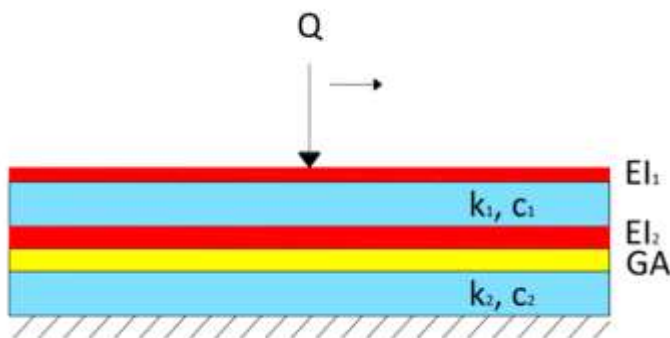
#### 2.2.1.3 Dvouvrstvý systém – dynamická soustava II.

Poslední představený model vychází stejně jako jeho předchůdce z dvouvrstvého systému a je také zatížen pohyblivou silou. Navíc je však rozšířen o vrstvu pod druhým





nosníkem schopnou odolávat i smyku. Tento model zohledňuje skutečnost, že příčné prazce ani kolejové lože nepřenáší ohybové momenty. [5]



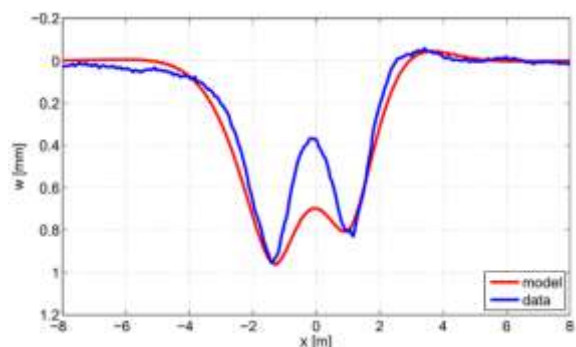
Obr. 7: Schéma modelu (2.2.1.3) [5]

#### 2.2.1.4 Porovnání modelů

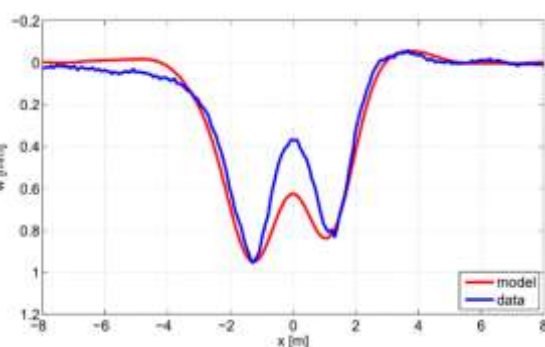
Z práce [5] vyplývá, že pohyblivá síla má zásadní vliv na křivku průhybu. Přestože v místě druhé nápravy jsou rozdíly mezi dynamickými soustavami a Timošenko – Zimmermanovým modelem (tedy statickou soustavou) pouze minimální, ve zbylých částech jsou rozdíly již markantní. [5]

Průhybová křivka dvouvrstvého systému popsaného v části 2.2.1.2 se značně vymyká zbylým dynamickým soustavám. Nelze na ní ani náznakem pozorovat dvounápravové zatížení. Je to dáno ohybovou tuhostí druhé vrstvy negativně ovlivňující model. Průhybové křivky zbylých dynamických soustav mají od sebe navzájem převážně jen mírné odchylky. Zajímavější rozdíly mezi nimi se nachází pouze ve střední části, tedy v prostoru mezi nápravami. [5]

Při porovnání modelů s reálnými naměřenými daty byl pro danou aplikaci jako vhodný vyhodnocen model Pasternakův popsaný v části 2.2.1.1, a také dvouvrstvý systém s prvkem přenášejícím smykové zatížení popsaný v části 2.2.1.3. [5]



Obr. 8: Průhybová křivka modelu (2.2.1.1) a naměřených dat [5]



Obr. 9: Průhybová křivka modelu (2.2.1.3) a naměřených dat [5]

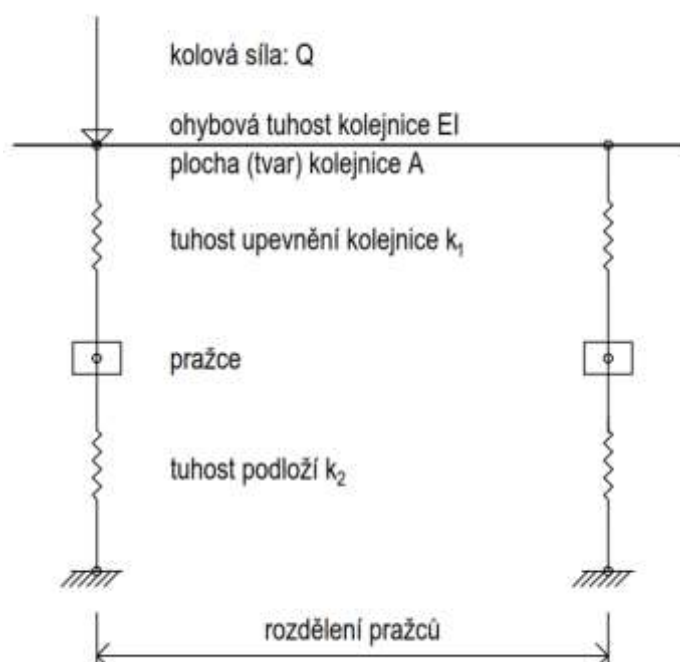


## 2.2.2 Diplomová práce: Dynamická analýza koleje – Mojžíšek Dominik

Další student, který svou diplomovou práci zasvětil tématu dynamické analýzy koleje, je Dominik Mojžíšek. Ve své práci vytvořil šest numerických modelů, tři statické soustavy a tři dynamické soustavy. [6]

### 2.2.2.1 Diskrétní model

První popsaná statická soustava je diskrétní model. Základem modelu je prut, kterému jsou přiřazeny vlastnosti kolejnice, tedy ohybová tuhost  $EI$  a její plocha  $A$ . Prut je podepřen pružinami představujícími upevnění kolejnice na pražci. Vzdálenost mezi pružinami odpovídá rozdělení pražců v koleji. Pod pružinami se nachází prvky reprezentující pražce. Na každý „pražec“ je připevněna další pružina zakončená vetknutím. Tato pružina vyjadřuje tuhost podloží, tedy pražcové podloží zahrnující kolejové lože, konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku a zemní těleso. Celý model předpokládá pouze svislé posunutí. Z faktu, že je model zatížen nepohyblivou silou a tím pádem spadá mezi statické soustavy, vyplývá, že na výsledek nemá vliv hmotnost kolejnice ani pražce. [6]



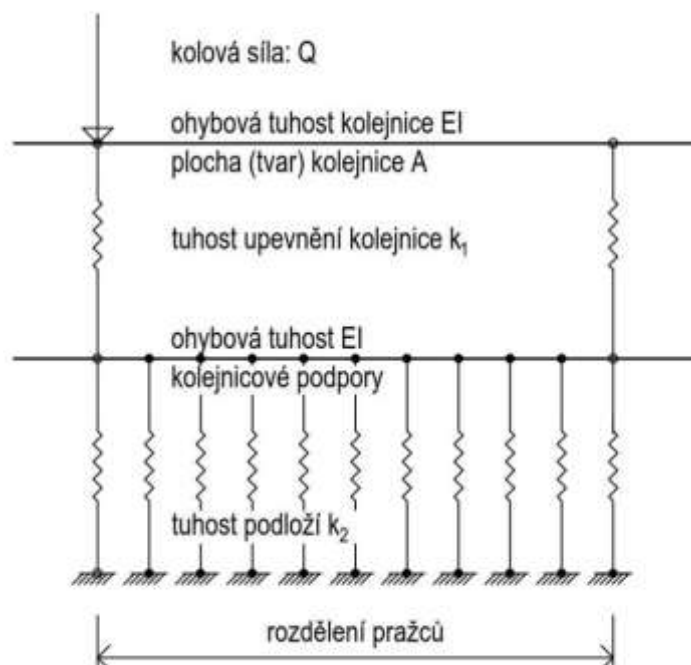
Obr. 10: Schéma Diskrétního modelu [6]

### 2.2.2.2 Dvouvrstvý systém

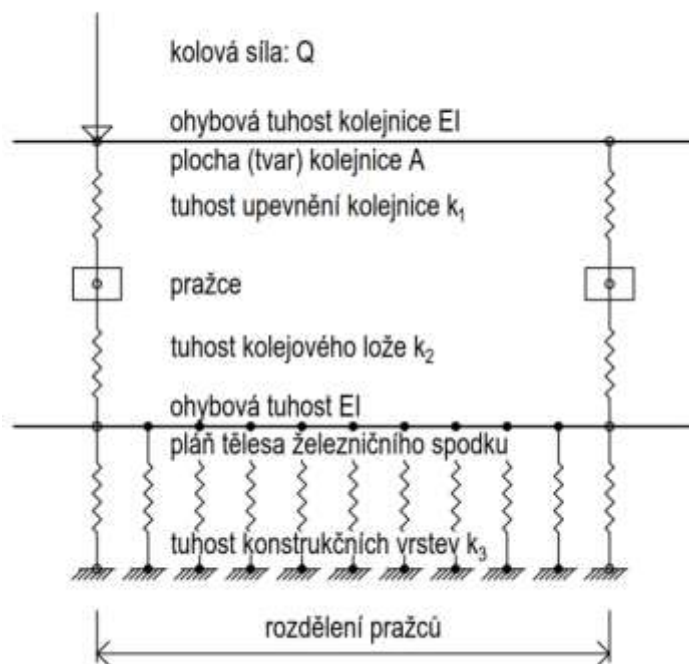
Inspirací pro tento numerický model je dvouvrstvý systém popsaný v kapitole 2.1.3. Základem modelu je opět prut reprezentující kolejnici podepřený pružinami, kde vzdálenost mezi nimi odpovídá vzdálenosti mezi pražci v koleji stejně jako u předchozího modelu. Pružiny jsou dále připevněny na spojitý prut simulující kolejnicové podpory. Prut je pak dále podepřen pružinami, jež jsou na druhé straně vetknuté. Tyto pružiny zastupují tuhost podloží a v modelu se jich nachází 10× více než pružin znázorňujících



upevnění kolejnice. Zatížení je zde opět nepohyblivé a jedná se tedy o statickou soustavu. [6]



Obr. 11: Schéma Dvouvrstvého systému [6]



Obr. 12: Schéma modelu (2.2.2.3) [6]



### 2.2.2.3 Prut diskrétně podepřený se spojitým modelem podloží

Poslední představená statická soustava je do jisté míry kombinací předchozích dvou numerických modelů. Stejně jako u diskrétního modelu je zde prut zastupující kolejnici, na něj jsou připevněny dle rozdělení pražců pružiny simulující upevnění kolejnice a pak následuje prvek představující pražec. Další pružina, která je zespodu připevněna na prvek pražce, zastupuje narozdíl od diskrétního modelu pouze kolejové lože pod pražcem. Tato pružina je dále připevněna na prut, jež zde supluje plášť tělesa železničního spodku. Prut je stejně jako u dvouvrstvého systému podepřen zespodu vetknutými pružinami, jež vyjadřují tuhost železničního spodku. [6]

### 2.2.2.4 Dynamické soustavy

Autor dále vytvořil tři numerické modely dynamických soustav. Ty vychází vždy z již popsaných statických soustav, tedy diskrétního modelu, dvouvrstvého systému a diskrétně podepřeného prutu se spojitým modelem podloží. Zásadním rozdílem oproti statickým soustavám je zatížení pohyblivým zatížením. Také se v modelech nevyskytují samostatné pružiny, ale vždy je k nim paralelně připojen tlumič. Důležitý je i fakt, že v dynamických soustavách již do výpočtu zásadně vstupují hmotnosti kolejnice a pražců. [6]

### 2.2.2.5 Porovnání modelů

V práci byly porovnány numerické modely statické soustavy s Timošenko – Zimmermannovým modelem popsaným v kapitole 2.1.1. Z porovnání je zřejmé, že rozdíly mezi jednotlivými numerickými modely jsou jen nepatrné. Rozdíly v průhybu je možné pozorovat hlavně mezi jednotlivými nápravami. Zato rozdíl mezi numerickými modely a analytickým modelem dle Timošenka je již znatelnější. [6]

Numerické modely dynamické soustavy autor porovnával s reálnými daty naměřenými na trati Plzeň – Nezvěstice při průjezdu lokomotivy řady 242 jedoucí 100 km/h. Z porovnání na první pohled vyplývá, že diskrétní model a dvouvrstvý systém se od sebe nikterak zásadně neliší. Zato rozdíly s modelem prutu diskrétně podepřeným se spojitým modelem podloží jsou již výraznější. Tento model také nejlépe vystihuje naměřená data v úseku mezi koly nápravy. [6]

Autor se rozhodl porovnat numerický model a analytický model s naměřenými daty. Naměřená data nejlépe vystihuje numerický model prutu diskrétně podepřeného se spojitým modelem podloží. Autor ho porovnal s analytickým modelem dvouvrstvého systému přenášejícím smykové zatížení, jenž byl diplomovou prací Pavla Kulicha [5] zvolen jako nejvhodnější. Analytický model lépe koresponduje v místě zdvihové vlny před nápravou, zato numerický model lépe obstál v části kola a mezi nápravami. [6]

### 2.2.2.6 Závislost průhybu koleje na ojetí kolejnice

Poslední, čím se Mojžíšek ve své diplomové práci [6] zabýval byla závislost průhybu koleje na míře ojetí kolejnice. Z práce vyplývá, že rozdíl v průhybu mezi neopotřebovanou kolejnicí a kolejnicí opotřebovanou tak, že splňuje krajní hodnoty normy, je v rozmezí desetiny milimetru. [6]



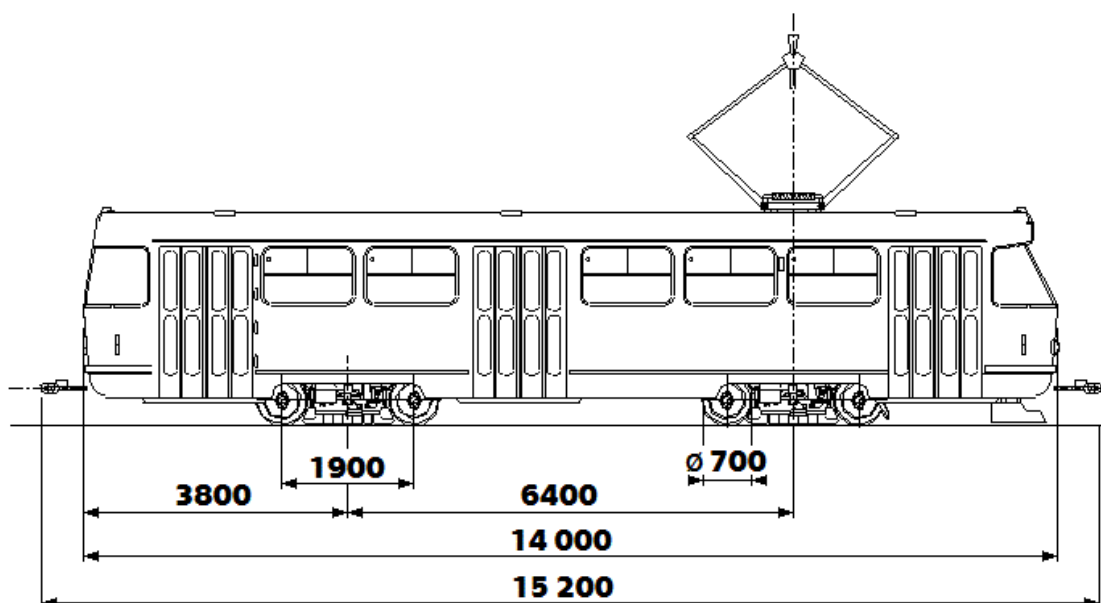
### 3 Praktická část

S ohledem na to, že prováděné měření bylo realizováno výhradně na síti DP Praha, a dále analyzovány jsou tedy průhyby koleje pod současnými vozidly Dopravního podniku hlavního města Prahy, je v následující části proveden základní přehled v Praze provozovaných typů tramvajových vozů.

#### 3.1 Pražský vozový park

Pražská hromadná doprava má bohatou historii. Nezastupitelnou část tvoří právě tramvajová doprava stojící již u samotného počátku pražské hromadné dopravy. Jako první byla v Praze v roce 1875 zprovozněna 3,4 km dlouhá trať koňky, neboli tramvajový vůz tažený koňským spřežením. Koně byli v Praze jako pohon tramvají využíváni až do roku 1905. Dalším převratným rokem pro Prahu byl rok 1891, kdy byla představena první česká elektrická tramvaj. Zásahu na tomto úspěchu nesl převážně František Křížík. Další období se následně vyznačovalo nejednotnou kolejovou sítí, která neměla ani stejného majitele. K sjednocení došlo v roce 1907 vytvořením firmy Elektrické podniky. [13]

Dopravní podnik hlavního města Prahy v současné době vlastní a provozuje celkem 770 tramvajových vozů a spravuje tramvajovou síť se současnou délkou 142 km, což Prahu z hlediska rozsáhlosti sítě, řadí na přední místa v Evropě. Hlavní část vozového parku tvoří podtypy a zrekonstruované varianty tramvaje T3 a moderní tramvaje 15T. Konkrétně se jedná o 36 vozů T3M nebo T3SU, 35 nízkopodlažních tramvají T3R.PLF a 337 kusů vozů T3R.P. Nejmodernější tramvají vyskytující se v Praze, je nízkopodlažní článkový vůz 15T, celkem jich Dopravní podnik hlavního města Prahy vlastní 250 kusů. Zbýlá část vozového parku obsahuje 55 vozů 14T, 53 vozů KT8N2, 2 tramvaje T6A5, a také 2 kusy vozu T2. Data jsou platná k 30.9.2022. [14] [15]



Obr. 13: Schéma tramvaje T3R.P [30]



### 3.1.1 T3R.P

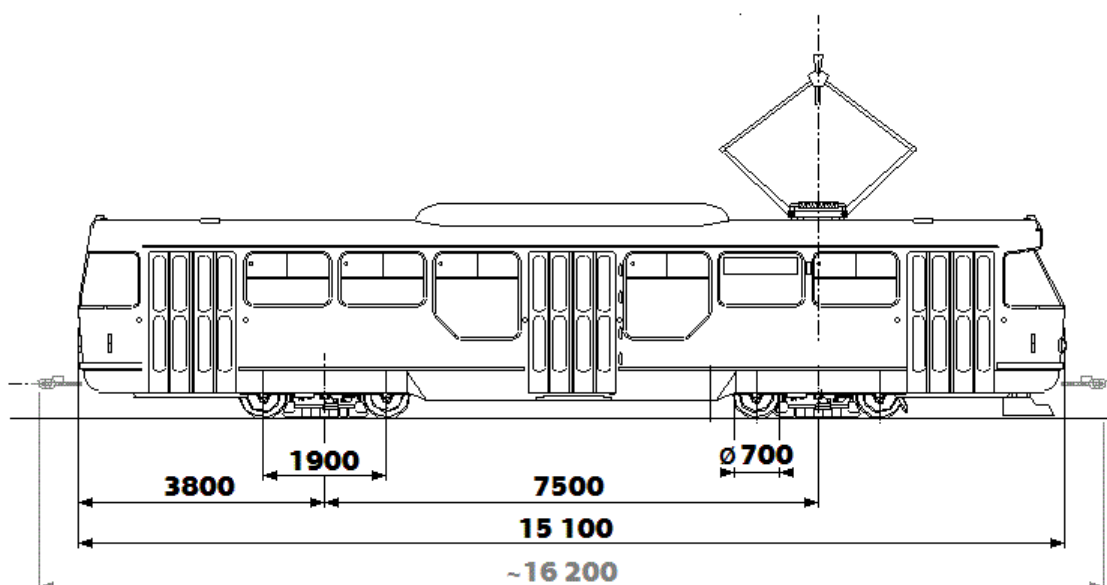
Tramvaj je jednočlánková s dvěma otočnými podvozky. Vozy T3 R.P vznikly rekonstrukcí vozů T3. Byla to nejrozsáhlejší renovace tramvají v Praze a bylo uvažováno, že po tomto zásahu budou v dalším provozu dobře sloužit. Velká modernizace započala v roce 2001 a prováděla ji společnost Pars Nova a posléze Dopravní podnik hlavního města Prahy. Pracovníci se mimo skříň zaměřili také na elektrickou výzbroj a podvozky. Evidenční čísla T3R.P spadají do intervalu od 8211 až do 8249 a 8300 až 8579. Maximálně tramvaj pojme 160 osob, z toho 22 míst je určeno na sezení. [16] [17] [18] [19] [20] [30]

Z pohledu účinků vozidla na kolej jsou klíčové parametry: hmotnost – 16,25 tun, počet náprav - 4 a jejich rozvor 1900 mm, vzdálenost podvozků je 6,4 m. [30]

### T3R.PLF

Tramvaj je jednočlánková s dvěma otočnými podvozky. Myšlenkou byla stavba bezbariérové tramvaje, za účelem modernizovat stávající vozový park. A tak se renovace starých T3 jevila jako optimální řešení. Cena takového zákroku se pohybuje okolo 8,4 mil. Kč. Nové vozové skříň se středním nízkopodlažním prostorem dodala firma ČKD Pragoimex. Oproti svým předchůdcům je tak tramvaj přibližně o jeden metr delší a má tedy i adekvátně větší hmotnost. Nátěr vozu je odlišný z důvodu snadného rozeznání při potkávání protijedoucích vozů kvůli většímu vybočení skříň v obloucích. Přestože hodnota vybočení je menší než u vozů s profilem KT8, musí se řidič řídit stejnými pravidly provozu. Využívají se od počátku roku 2007. Dopravní podnik hlavního města Prahy má v současné době 35 vozů T3R.TLF, avšak bylo rozhodnuto o modernizaci dalších 65 kusů T3R.P na T3R.TLP. Evidenční čísla T3R.PLF se nachází v intervalu od 8251 do 8299. [16] [17] [21] [22] [23] [30]

Z pohledu účinků vozidla na kolej jsou klíčové parametry: hmotnost – 21,5 tun, počet náprav - 4 a jejich rozvor 1900 mm, vzdálenost podvozků je 7,5 m. [30]



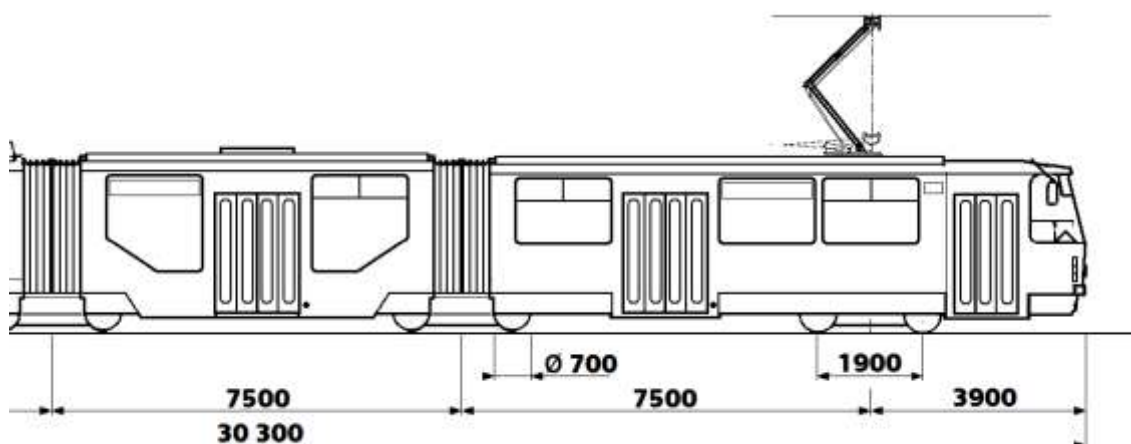
Obr. 14: Schéma tramvaje T3R.PLF [30]



### 3.1.2 KT8D5.RN2P

Tramvaj má tři články a čtyři otočné podvozky. Z důvodu dlouhodobého nedostatku nízkopodlažních tramvají bylo v roce 2004 rozhodnuto o modernizaci vozů KT8D5. Původní trakční výzbroj byla vyměněna za novou. Hlavní a nejdůležitější částí je ovšem připojení středního nízkopodlažního článku. Vzniklo tak tříčlánekové vozidlo s délkou 30,3 m. Mají dveře po pravé i levé straně a umožňují tak obousměrný provoz. Při pohledu na čelo tramvaje lze bezpečně a snadno vůz rozpoznat. Za tímto účelem byly přidány dálkové světlomety. Pomocí samozřejmě může i evidenční číslo. Pro tento typ byla čísla volena z intervalu od 9050 až do 9105. Celková kapacita vozu je 318 míst z toho je 46 na sezení. [16] [17] [24] [30]

Z pohledu účinků vozidla na kolej jsou klíčové parametry: hmotnost – 42 tun, počet náprav - 8 a jejich rozvor 1900 mm, vzdálenost podvozků je 7,5 m. [30]

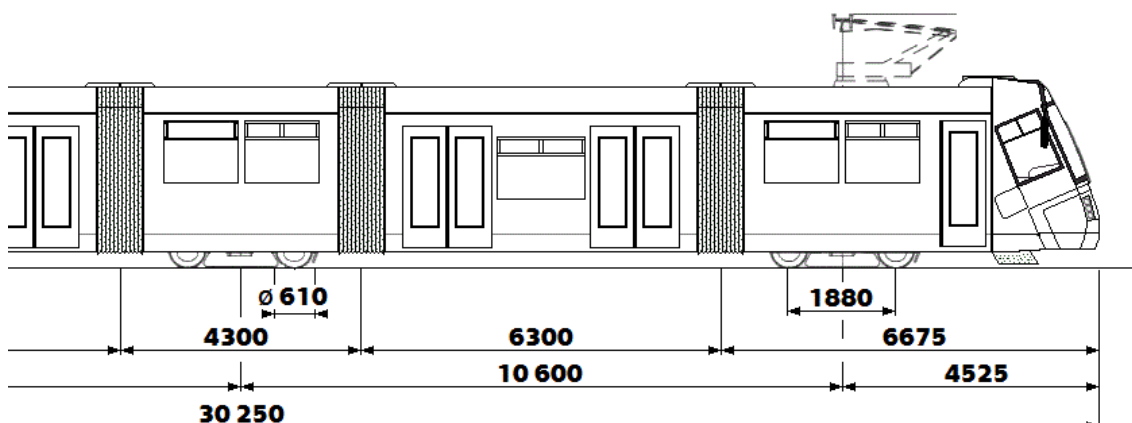


Obr. 15: Schéma tramvaje KT8D5.RN2P [30]

### 3.1.3 14T

Tramvaj se skládá z pěti článků. Druhý a čtvrtý článek jsou nesený prvním, třetím a pátým článkem. Na lichých článcích se nachází dvounápravový neotočný podvozek. Průjezd obloukem je možné realizovat díky otáčení jednotlivých článků vůči sobě. Tramvaj od firmy Škoda Transportation jezdí v Praze od roku 2006. Byla od samého počátku koncipována jako částečně nízkopodlažní. Všechny dveře jsou přesuvné. Tramvaj 14T je v některých ohledech poněkud kontroverzní, převážně kvůli neotočným pevným podvozkům nevhodným pro malé poloměry oblouků. Na některých křižovatkách způsobily až neúměrné opotřebení materiálu na kolech a kolejnicích. Evidenční čísla tohoto typu spadají do intervalu od 9111 až do 9170. Při plné obsazenosti pojme tramvaj až 279 lidí, z nichž 69 na sezení. [16] [17] [25] [26] [30]

Z pohledu účinků vozidla na kolej jsou klíčové parametry: hmotnost – 39 tun, počet náprav - 6 a jejich rozvor 1880 mm, vzdálenost podvozků je 10,6 m. [30]

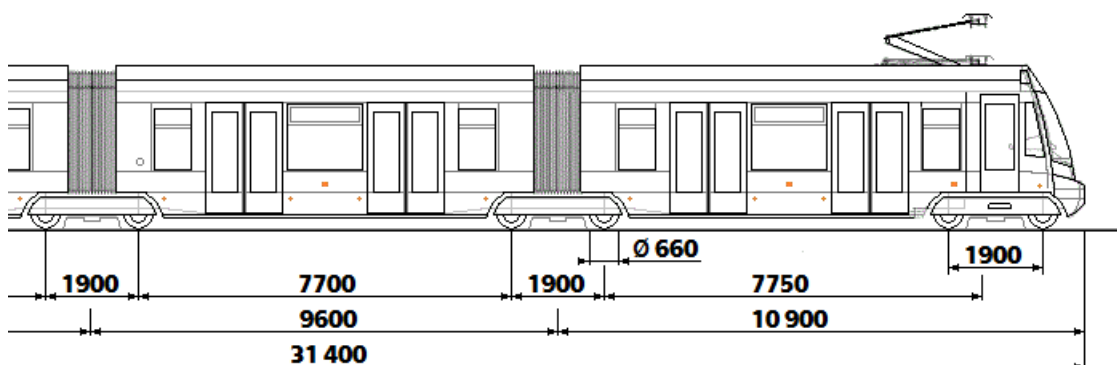


Obr. 16: Schéma tramvaje 14T [30]

### 3.1.4 15T

Nejmodernější pražskou tramvaj, Škodu 15T ForCity, stejně jako její předchůdkyni (Škodu 14T) vyrobila firma Škoda Transportation. V provozu je od roku 2010. Pro urychlení výstupu a nástupu slouží šest dveří. Unikátnost tohoto vozu spočívá v kompletní nízkopodlažnosti a zároveň otočných podvozcích. Jako první na světě splňuje tato kritéria a je vyráběna sériově. Právě stoprocentní nízkopodlažnosti bylo možné docílit zásluhou obzvláště nízkých podvozků. Při jejím navrhování byly využity zkušenosti z provozu tramvají 14T, a navíc byly rozměry voleny podle kritických míst nacházejících se v pražské kolejové síti.[17] Velmi krátké předstávky zmenšují vybočení vozidla při průjezdu směrovým obloukem, což napomáhá plynulosti dopravy v místech, kde není tramvajový pás zcela oddělen od silniční dopravy. Pražská vozidla jsou tříčláňková. Tramvaj celkem nesou čtyři otočné podvozky. Dva mezičláňkové a dva krajní. Každé kolo má vlastní pohon. Tento systém nezhoršuje opotřebení kol a kolejnic při průjezdu obloukem. Evidenční čísla pro 15T jsou volena z intervalu od 9201 až do 9450. Při plném obsazení pojme až 300 osob, z toho 61 na sezení. [16] [17] [27] [28] [30]

Z pohledu účinků vozidla na kolej jsou klíčové parametry: hmotnost – 42 tun, počet náprav - 8 a jejich rozvor 1900 mm, vzdálenost podvozků je 9,6 m. [30]



Obr. 17: Schéma tramvaje 15T [30]





### 3.2 Popis lokalit měření

Pro měření byly vybrány dvě lokality. Lokality byly zvoleny s ohledem na možnost vzájemného srovnání naměřených dat, s ohledem na možnost porovnání a minimalizaci počtu proměnných činitelů. Samotné měření bylo situováno do přímé koleje. Měření proběhla v dopoledních hodinách 29.11.2022. V den měření se teplota pohybovala okolo 4 °C s občasným mírným mrholením. Všechna měření proběhla na tramvajové kolejové síti Dopravního podniku hlavního města Prahy. Zvolené lokality se liší zejména použitým tvarem kolejnic a dále stářím konstrukce.

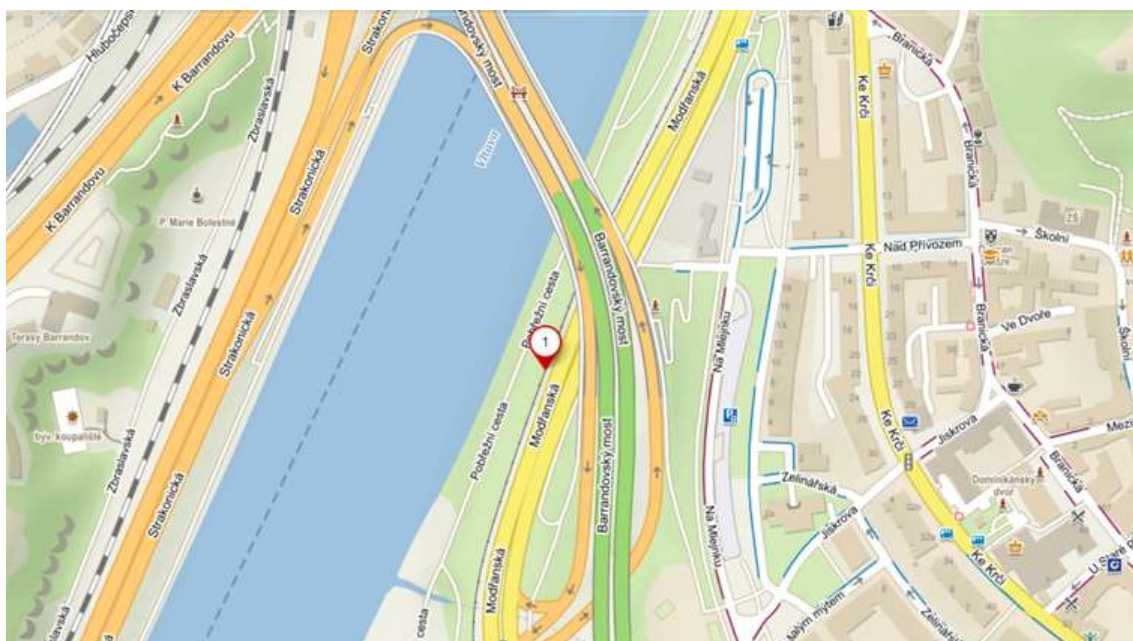
Průběh měření v lokalitě Braník je patrný na obrázku 18.



Obr. 18: Měření v Braníku [Zdroj: Autor]

#### 3.2.1 Braník

První měření proběhlo mezi zastávkou Přístaviště a Pobřežní cesta. Měřicí stanoviště se nacházelo přibližně v polovině mezistaničního úseku v blízkosti Barrandovského mostu. Trať je zde dvojkolejná s otevřeným štěrkovým ložem frakce 32/63. Na betonové pražce TB93 vyrobené roku 2008 s rozdělením 700 mm jsou upevněním W14 pružně uchyceny žlábkové kolejnice NT1. Moment setrvačnosti této kolejnice je 3598,7 cm<sup>4</sup>. [31] V tomto místě probíhalo měření od 9:30 do 10:45. V pravidelném provozu zde jezdí tramvajové linky 2, 3, 17 a 21, tj. ve špičce cca 37 spojů v hodině. V době našeho měření mimo největší dopravní špičku se zde vyskytovaly jen 3 linky, a to konkrétně linka 2 a 3, obě s intervalem 10 minut a také linka 17 v intervalu 5 minut.



Obr. 19: První lokalita na Mapy.cz



Obr. 20: Měření v Braníku [Zdroj: Autor]

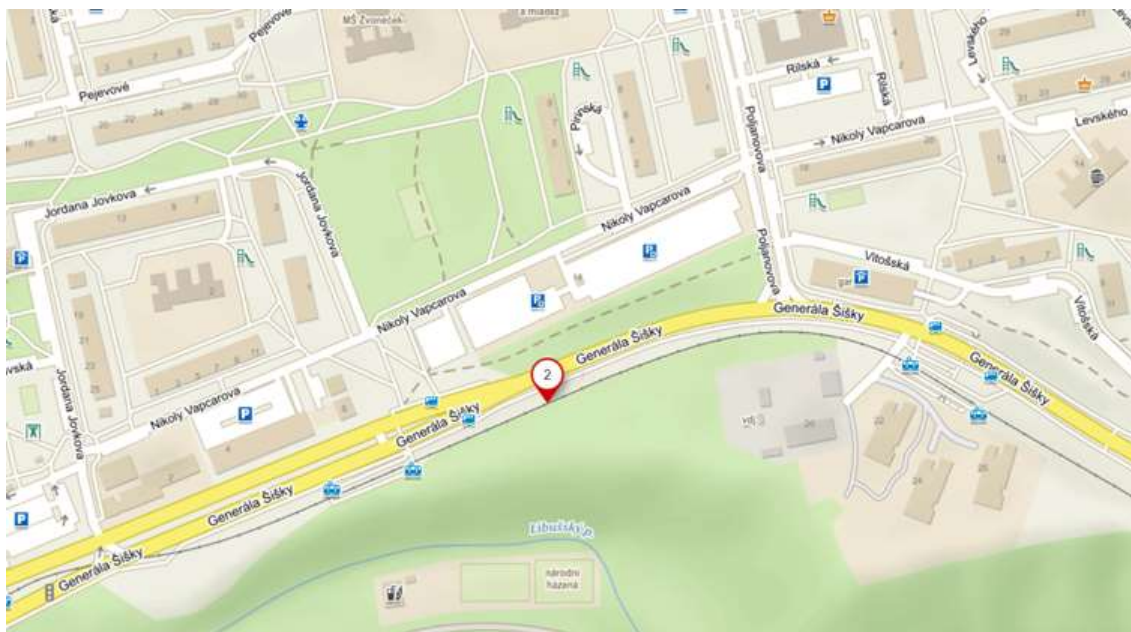


### 3.2.2 Modřany

Druhé měření proběhlo mezi zastávkou Modřanská rokle a U Libušského potoka. Měřicí stanoviště se nacházelo přibližně v jedné třetině mezistaničního úseku, blíže k zastávce U Libušského potoka. Trať je zde dvojkolejná s otevřeným šterkovým ložem frakce 32/63. Na betonové pražce B 03-DP 01 vyrobené roku 2022 s rozdělením „c“ tedy 674,5 mm jsou upevněním W14 pružně uchyceny žlábkové kolejnice 49E1. Moment setrvačnosti této kolejnice je  $1816 \text{ cm}^4$ . [31] V tomto místě probíhalo měření od 11:30 do 12:30. V pravidelném provozu zde jezdí tramvajové linky 3, 17 a 21, tj, ve špičce cca 30 spojů v hodině. V době našeho měření mimo dopravní špičku se zde vyskytovaly spoje jen jedné linky. Konkrétně linky 17 s intervalem 5 minut.



Obr. 21: Měření v Modřanech [Zdroj: Autor]



Obr. 22: Druhá lokalita na Mapy.cz



Obr. 23: Měřicí přístroj [Zdroj: Autor]

### 3.3 Popis měření

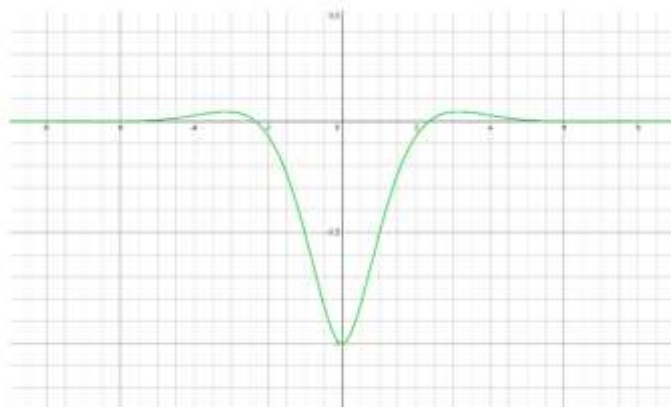
Základem měření je pevný bod, vůči kterému je měření možné provést. Pro měření v rámci bakalářské práce byl pevný bod zajištěn pomocí ocelové tyče kolmo zatlučené



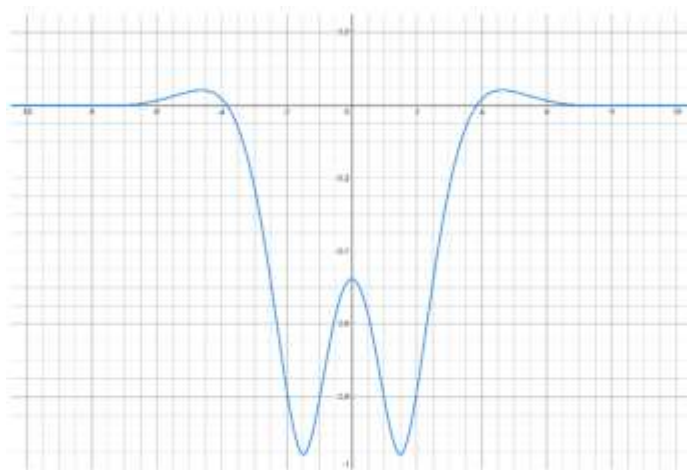
do kolejového lože jeden metr od vnějšího kolejnicového pásu. Na svislou tyč byla kolmo připevněna další tyč směřující přímo na kolejnicový pás. Na konci vodorovné tyče se nacházel snímač polohy Ahlborn FW A025-T, jenž přiléhal ke speciálnímu nástavci. Nástavec byl pevně připevněn na patu kolejnice a kopíroval tak svislý pohyb kolejnice. Měření průhybu probíhalo v polovině mezi dvěma pražci, jelikož v tomto místě lze očekávat největší průhyb. Snímač zaznamenává vždy konkrétní čas a aktuální průhyb o velikosti až 25 mm. Snímání probíhá v intervalu 0,002 sekundy. Přesnost měření je 0,001 mm. Pro uložení dat z měření byl využit datalogger Ahlborn ALMEMO, který byl kabelem napojen na snímač.

### 3.4 Předpokládaný průhyb

Díky současným poznatkům můžeme předpovídat, jak bude průhyb koleje v závislosti na pohybu zatěžovací síly na jednom konkrétním místě vypadat. Ukazuje nám to například příčinková čára na Zimmermannově modelu. To je zobrazeno na obrázku 24. Vzhledem k tomu, že jednu nápravu lze reprezentovat jako dvojici sil s konstantním rozestupem, lze očekávaný průběh získat za pomoci superpozice. To je zobrazeno na obrázku 25. Předpoklad konstantní rychlosti vozidla během průjezdu daným místem umožňuje srovnávat naměřená data s konkrétní polohou tramvaje.



Obr. 24: Příčinková čára průhybu [32]



Obr. 25: Tvar příčinkové čáry průhybu pro podvozek [32]



### 3.5 Zaznamenaná data

Během měření na první lokalitě bylo celkem zaznamenáno 24 průjezdů tramvajových vlaků. Konkrétně se jednalo o 9 tramvají 15T, 8 vozů 14T, 5 tramvají T3RP, jednu soupravu v dvou vozů T3RP, a jednou zde projel vůz T3RPLF. Rychlost vozů byla velmi rozmanitá. Nejpomalejší zaznamenaná rychlost vozu bylo 19 km/h, oproti tomu největší rychlost byla 60 km/h.

U měření na druhé lokalitě bylo celkem zaznamenáno 13 průjezdů. Konkrétně se jednalo o 4 soupravy dvou vozů T3RP, 5 tramvají 14T a 4 vozy 15T. V tomto případě byla rychlost vozů vyrovnanější, pohybovala se v intervalu 30 až 40 km/h.

Na místě bylo mimo dat získaných přímo z přístroje také zaznamenáno:

- čas průjezdu tramvaje,
- typ tramvaje,
- evidenční číslo vozu,
- rychlost vozu zjištěna pomocí rychlostního radaru,
- pohledem zjištěný odhad obsazenosti spoje.

Tabulka 1: Hodnoty naměřené v Braníku [Zdroj: Autor]

Číslo měření	čas	Rychlost [km/h]	Typ vozidla	Evidenční číslo	Max. průhyb [mm]
1	9:50	42	14T	9145	0,609
2	9:52	39	15T	9239	0,490
3	9:54	30	14T	9125	0,506
4	9:55	21	T3R.P	8422	0,386
5	9:59	54	14T	9152	0,549
6	10:00	58	14T	9159	0,492
7	10:01	49	T3R.P	8525	0,354
8	10:02	51	15T	9223	0,439
9	10:09	40	T3R.P	8217	0,428
10	10:09	27	15T	9227	0,458
11	10:11	40	15T	9235	0,472
12	10:14	49	15T	9240	0,462
13	10:15	20	T3R.P	8324	0,367
14	10:17	31	14T	9130	0,499
15	10:24	23	15T	9205	0,489
16	10:24	32	15T	9254	0,461
17	10:25	60	T3R.PLF	8276	0,354
18	10:28	22	15T	9212	0,498
19	10:29	22	14T	9161	0,484
20	10:35	32	14T	9144	0,531
21	10:37	19	T3R.P	8343	0,396



22	10:37	39	14T	9133	0,536
23	10:40	45	15T	9238	0,477
24	10:43	21	2× T3R.P	8385 + 8387	0,420

Tabulka 2: Hodnoty naměřené v Modřanech [Zdroj: Autor]

Číslo měření	čas	Rychlost [km/h]	Typ vozidla	Evidenční číslo	Max. průhyb [mm]
1	11:30	34	2× T3R.P	8482 + 8483	0,239
2	11:36	41	14T	9151	0,212
3	11:42	35	15T	9242	0,280
4	11:46	35	2× T3R.P	8490 + 8491	0,197
5	11:51	32	14T	9162	0,291
6	11:57	38	15T	9206	0,292
7	12:01	36	15T	9252	0,262
8	12:06	41	14T	9149	0,285
9	12:11	31	2× T3R.P	8493 + 8437	0,200
10	12:16	41	14T	9169	0,240
11	12:22	33	2× T3R.P	8390 + 8391	0,217
12	12:26	32	15T	9239	0,230
13	13:32	29	14T	9145	0,337

Pro účely vyhodnocování byly vyřazeny dva záznamy z měření v Modřanech. Konkrétně se jedná o záznam 3 a 13. Oba záznamy byly vyřazeny, jelikož dané spoje měly jednu či více plochých („obutých“) kol. Dále byl z měření v Braníku vyřazen průjezd vozu T3R.PLF (záznam 17), neboť za dobu měření projel v této kategorii jen jediný spoj. Ze stejného důvodu byl vyřazen průjezd soupravy 2x T3R.P (záznam 24).

Na základě pozorování obsazenosti jednotlivých spojů se počet cestujících po dobu měření pohyboval nejvýše do deseti osob. Obě měření probíhala v době dopoledního sedla, blízko koncových úseků, a to v Braníku před konečnou zastávkou Nádraží Braník ve směru z centra, a v Modřanech v blízkosti výchozí zastávky Levského do centra. Z toho důvodu jsou při vyhodnocení uvažovány nápravové tlaky tramvají ve vztahu k pohotovostní hmotnosti.

Tabulka 3: Hmotnost jednotlivých vozů [30]

Typ vozu	Pohotovostní hmotnost	Hmotnost obsazeného vozu
T3R.P	16,25	27 – 30
T3R.PLF	21,5	33 – 35
14T	39	55 – 62
15T	42	61 – 64



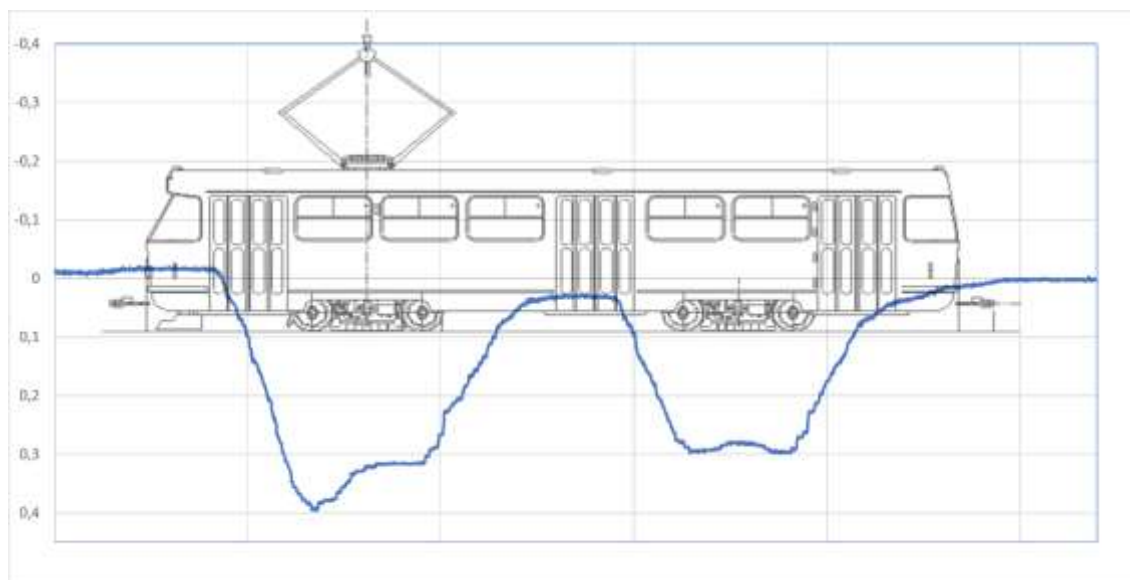
Tabulka 4: Hmotnost na jednu nápravu [30]

Typ vozidla	Zatížení [t] na nápravu			
	1. náprava	2. náprava	3. náprava	4. náprava
T3R.P	4,4	4,0	-	-
T3R.PLF	5,1	4,5	-	-
14T	7,2	6,7	6,6	-
15T	5,1	5,9	6,0	4,9

Naměřené skutečné hodnoty průhybu kolejnice byly dále analyzovány z hlediska různých sledovaných proměnných.

### 3.6 Průběh průhybu pro jeden průjezd

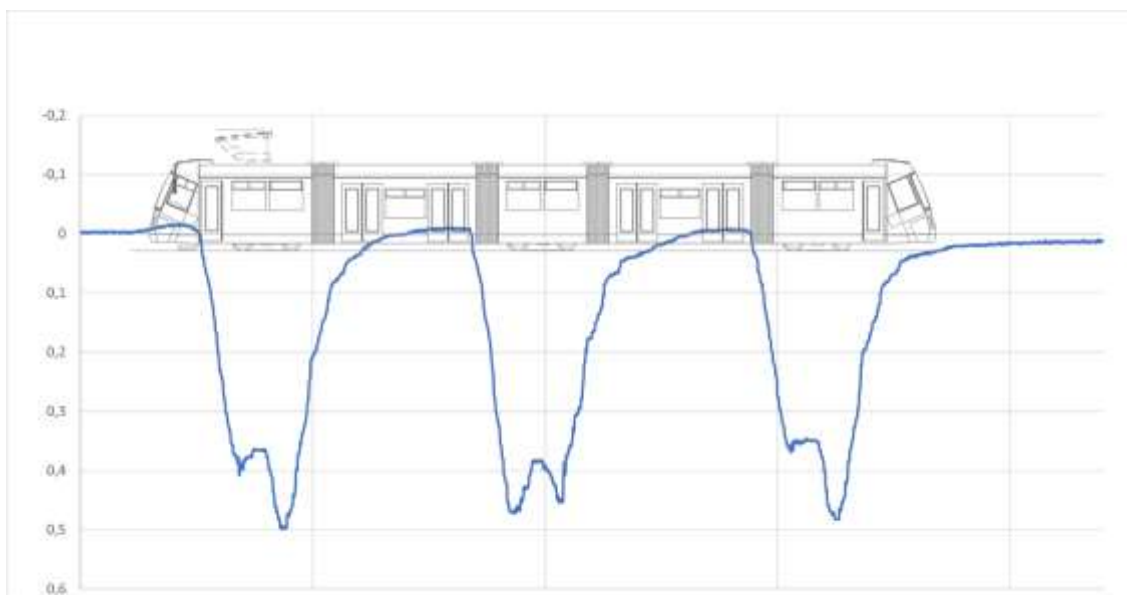
Ze zaznamenaných hodnot průhybu v čase je patrná závislost průběhu průhybu na geometrii a hmotnosti vozidla, způsobující daný průhyb kolejnice. To lze jednoznačně pozorovat v místě jednotlivých náprav, kde se pod každým kolem vždy nachází lokální maximum. Na obrázcích 26 – 28 je pro názornost do grafu průběhu průhybu přidáno schéma konkrétního typu tramvaje. Na obrázcích je v hodnotě sledovaného průhybu mimo jiné jasně patrný vliv nápravového zatížení, kdy je dále patrný jiný (větší) průběh u vozidel 14T a (menší) vozidel T3R.P. To zcela odpovídá rozdílnému nápravovému zatížení těchto vozů rozebraným v kapitole 3.1.



Obr. 26: Průběh průhybu pro T3R.P [Zdroj: Autot]

Dále jsou vybrány další charakterové průhyby od dalších průjezdů měřícím profilem.





Obr. 27: Průběh průhybu pro 14T [Zdroj: Autor]



Obr. 28: Průběh průhybu pro 15T [Zdroj: Autor]

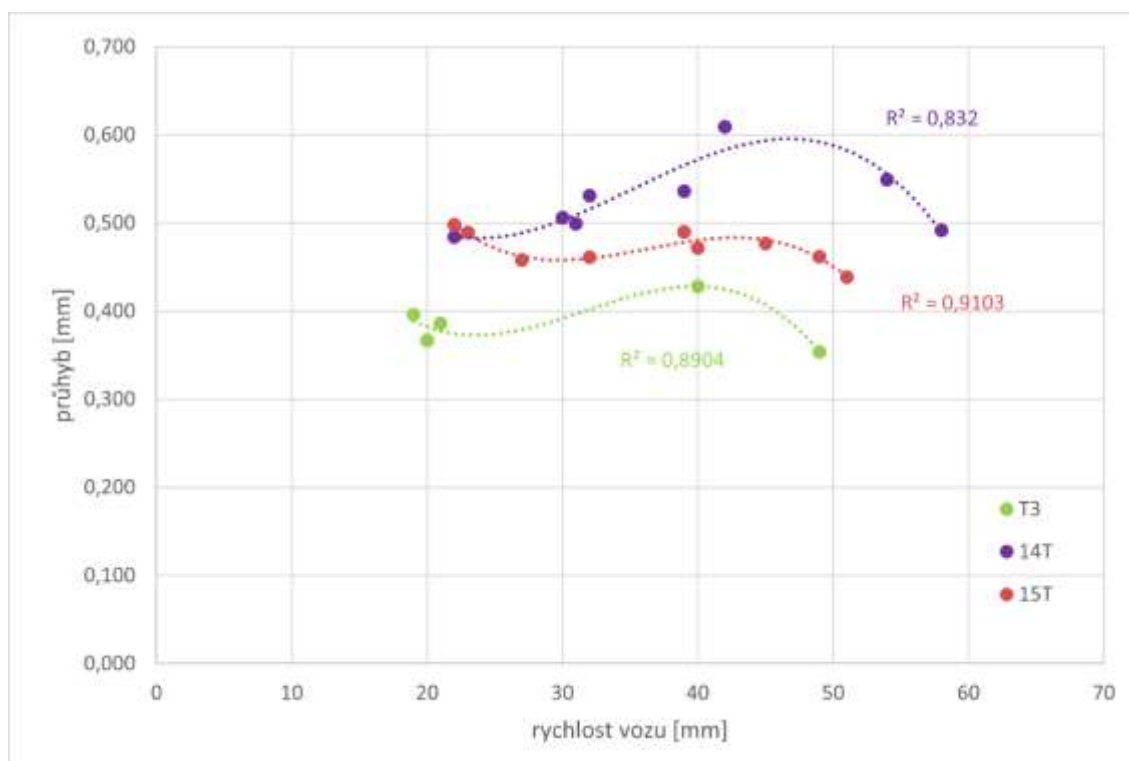
### 3.7 Závislost velikosti průhybu na rychlosti vozidla

Graf 1 vychází z hodnot zaznamenaných při měření v Braníku. Na rozdíl od lokality Modřany, kde všechny sledované průjezdy vozidel proběhly přibližně ve shodné rychlosti, na lokalitě Braník bylo docíleno možnosti sledování průjezdu vozidel s rozdílnou rychlostí. V průběhu měření byly měřeny soupravy s rychlostí od 19 km/h do rychlosti 60 km/h. Tato závislost byla dále sledována na uvedeném grafu 1. Ten ukazuje závislost maximálního průhybu na rychlosti tramvaje ve sledovaném profilu, přičemž jednotlivé typy vozů jsou od sebe odlišeny barevně.



Statistická analýza dat byla prováděna v programu Microsoft Excel. Byla prováděna regresní analýza a naměřenými daty, respektive hodnotami, byly prokládány různé matematické funkce, od lineární, přes kvadratické až po exponenciální. V rámci této analýzy byly sledovány hodnoty parametru  $R^2$ , tedy koeficientu determinace (druhá mocnina koeficientu korelace). Koeficient determinace  $R^2$  je popisná míra vhodnosti použití regresní rovnice pro predikování. Hodnoty blízké nule naznačují, že zvolená funkce není vhodná. Naopak, hodnoty blízké 1 naznačují, že rovnice je velmi vhodná pro extrapolaci. Malá hodnota ale nemusí znamenat nízký stupeň závislosti mezi proměnnými, ale může signalizovat špatně zvolenou regresní funkci. Tedy čím jsou tyto koeficienty blíže číslu jedna, tím je korelace mezi veličinami silnější. Jiným pohledem je možné říct, že hodnota  $R^2$  vyjadřuje procento sdíleného rozptylu (pokud se vynásobí 100), tedy například hodnota  $R^2 = 0,85$  značí, že proměnné sdílí 85 % rozptylu. [33] [34]

Po proložení jednotlivých záznamů v grafu 1 polynomickou křivkou třetího stupně je z grafu patrná nezanedbatelná závislost průhybu na rychlosti. Koeficient  $R^2$  pro všechny typy tramvají dosahuje poměrně vysokých čísel, konkrétně: 0,8904 pro T3R.P, 0,8320 pro 14T a 0,9103 pro 15T. Rovnice proložení pro T3R.P je  $y = -0,00003x^3 + 0,0025x^2 - 0,0738x + 1,0717$ . Rovnice proložení pro 14T je  $y = -0,00002x^3 + 0,0019x^2 - 0,0612x + 1,0854$ . Rovnice proložení pro 15T je  $y = -0,00002x^3 + 0,0026x^2 - 0,0910x + 1,5000$ . Na první pohled je také patrné, že proložené křivky mají podobný tvar.

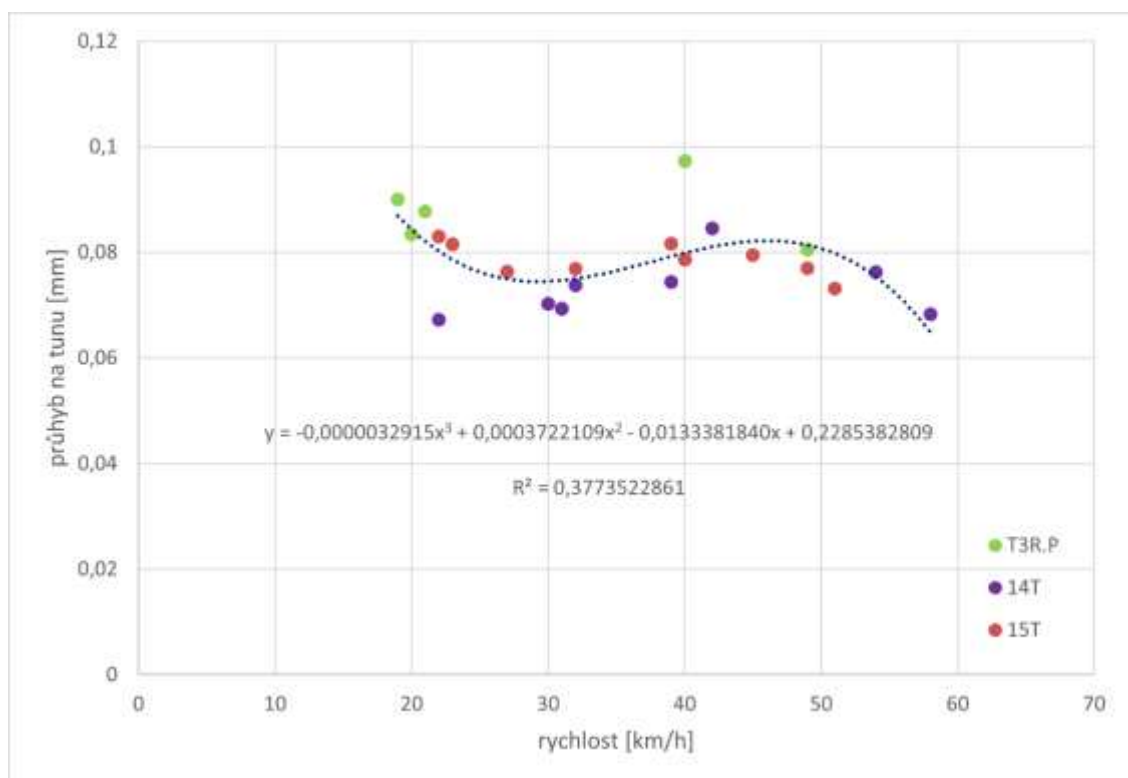


Graf 1: Závislost průhybu na rychlosti [Zdroj: Autor]



### 3.8 Závislost velikosti průhybu na velikosti zatížení

Mimo vliv rychlosti je z grafu 1 také jasně patrný vliv velikosti zatížení, respektive nápravového tlaku. Vozidla 14 T mají pro shodné rychlosti větší průhyb kolejnice, než vozidla typu 15T nebo T3R.P. Proto pro další použití byl vytvořen graf 2 Tento graf používá stejné hodnoty jako graf 1, avšak tyto hodnoty jsou poděleny největší hmotností na jednu nápravu daného typu tramvaje a vznikly tak znormovaná data na jednu tunu. Všechna analyzovaná data lze pak proložit už jen jednou jedinou křivkou, jejíž průběh znázorňuje vliv rychlosti na průhyb pro 1 tunu na nápravu.



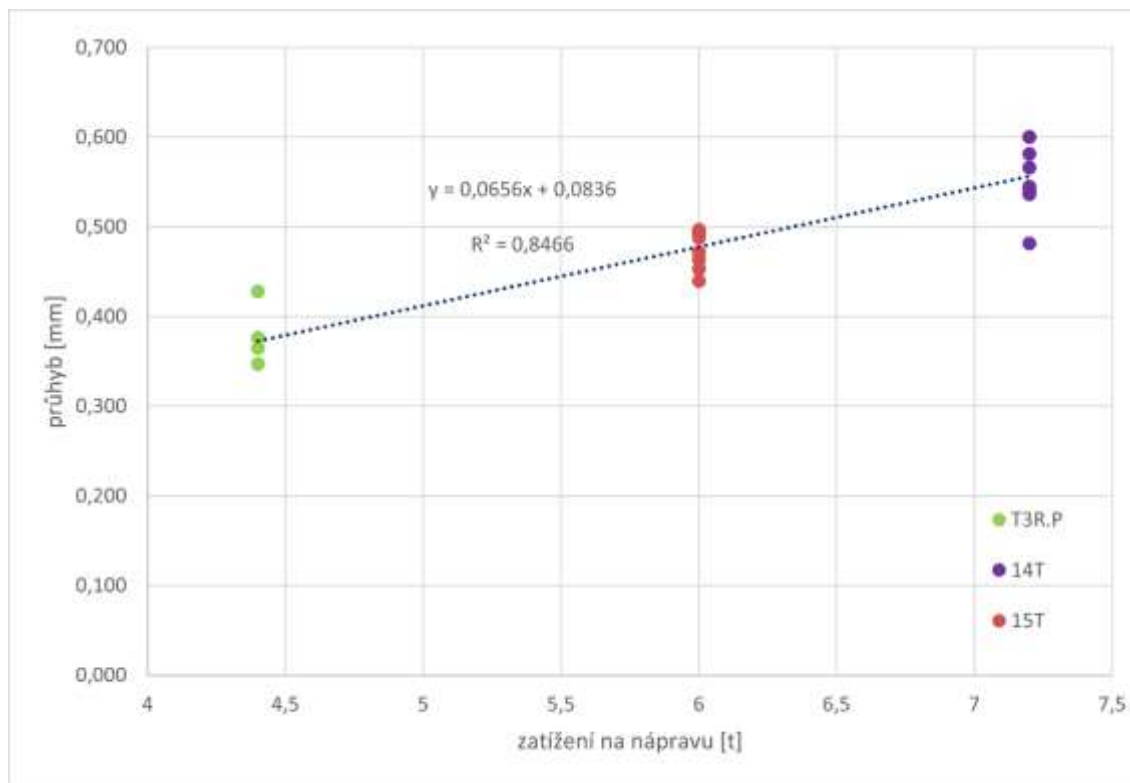
Graf 2: „Znormovaná“ závislost průhybu na rychlosti [Zdroj: Autor]

Pro porovnání dynamických účinků jednotlivých typů tramvají tak bylo dále potřeba zohlednit rychlost průjezdu sledovaných souprav. K tomuto účelu byla použita rovnice z Grafu 2:  $y = -0,0000032915x^3 + 0,0003722109x^2 - 0,0133381840x + 0,2285382809$ . Byla zvolena rychlost 40 km/h blíží se k průměrné rychlosti měřených tramvají. Následně byla pro každou tramvaj spočítána předpokládaná změna pohybu při změně rychlosti právě pro 40 km/h. Tyto hodnoty byly přičteny k naměřeným hodnotám. Tyto „znormované“ hodnoty jsou použité pro vyhodnocení. V grafech je nalezneme na svislé ose. Vodorovná osa ukazuje největší hmotnost na nápravu daného typu tramvaje.

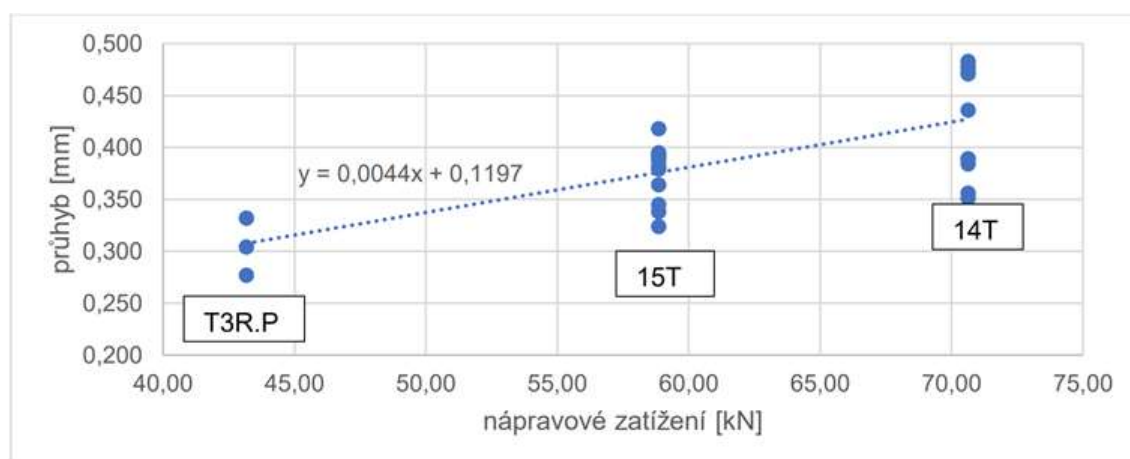
Pokud hodnoty naměřené v Braníku proložíme přímkou, dostaneme lineární funkci  $y = 0,0656x + 0,0836$ . (Graf 3) Hodnota  $R^2$  dosáhne v tomto případě 0,8466. Toto lze porovnat s grafem 4 přejatým z práce Jakuba Šurovského [32]. Ze směrnice přímky lze vyčíst znatelně strmější nárůst průhybu při zvětšování zatížení. Je potřeba brát v potaz,



že při měření hodnot z grafu 4 nebyla zaznamenávána rychlost vozu, a tudíž je její vliv zde naprosto zanedbán.

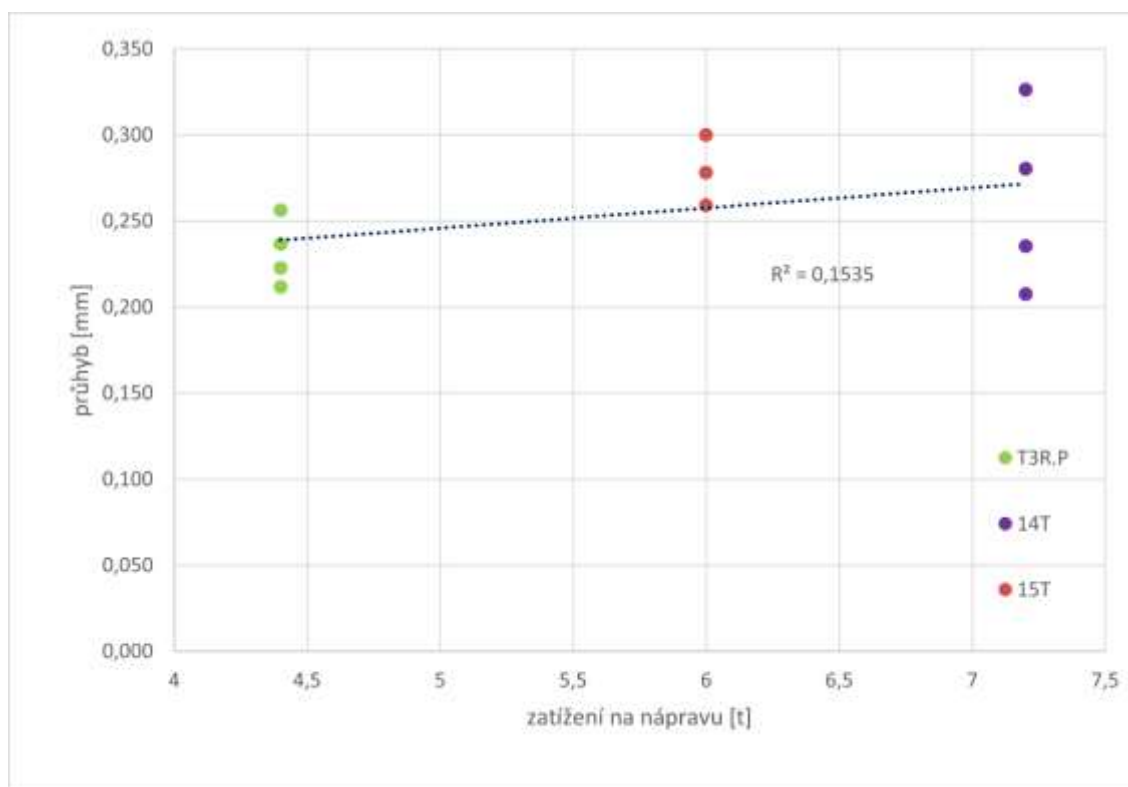


Graf 3: Závislost průhybu na zatížení [Zdroj: Autor]

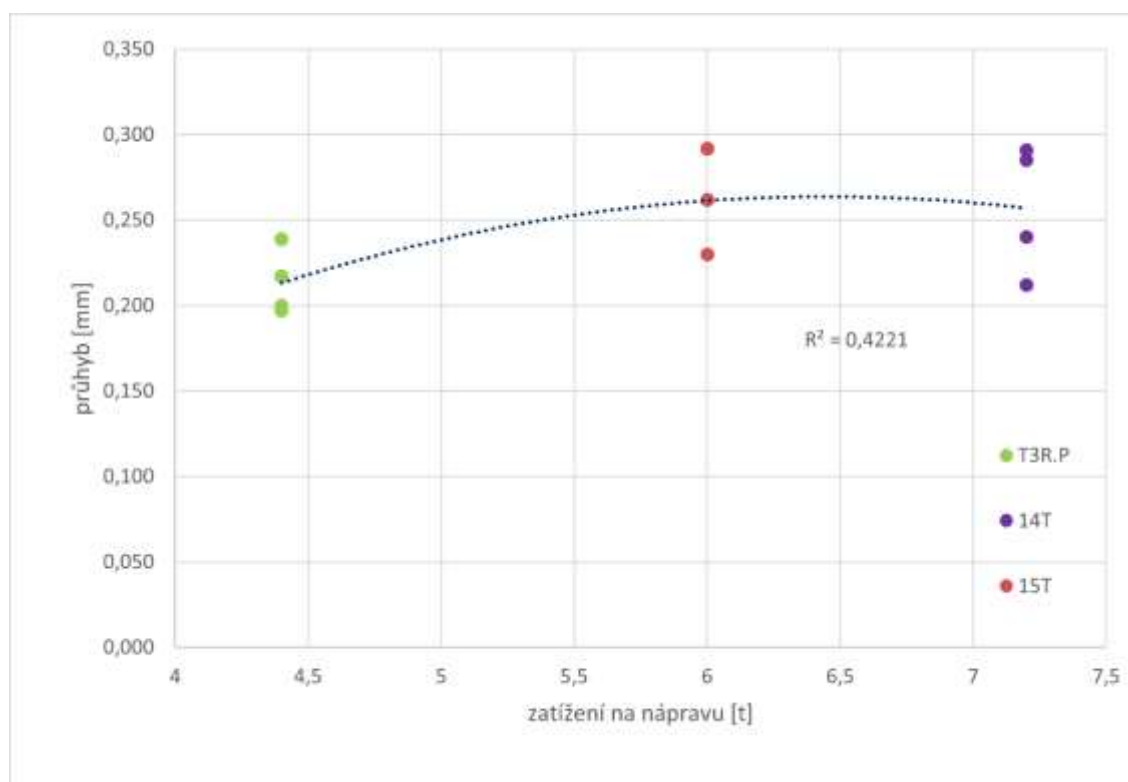


Graf 4: Závislost průhybu na zatížení [32]

Z hodnot naměřených v Modřanech bohužel nelze usuzovat jednoznačný trend. Koeficient  $R^2$  pro lineární funkci na „znormovaných“ datech dosahuje pouze hodnoty  $R=0,1535$  (Graf 5.). O něco lépe lze proložit „neznormovaná“ data, jež zanedbávají vliv rychlosti. Pro polynomickou funkci druhého stupně je koeficient  $R^2=0,4221$ . (Graf 6.) Z grafů 5. a 6. lze vypočítat největší problém u tramvají 14T. Oproti očekávání se „znormováním“ rychlosti rozptýl průhybů markantně zvýšil.



Graf 5: Závislost průhybu na zatížení [Zdroj: Autor]



Graf 6: Závislost průhybu na zatížení [Zdroj: Autor]



## 4 Závěr

V rámci této práce byla provedena měření průhybu kolejnic tramvajových tratí na dvou lokalitách na síti Dopravního podniku hlavního města Prahy. Lokality se liší stářím trati, typem použité kolejnice, typem pražců a jejich rozdělením.

V rámci měření, které proběhlo dne 29.11.2022, byl zaznamenáván svislý průhyb kolejnic (v polovině vzdálenosti mezi upevněními) pod jednotlivými tramvajemi, měřena a zaznamenávána jejich rychlost, a dále sledován typ jednotlivých vozů a jejich přibližná obsazenost. Na lokalitě Braník (kolejnice NT1, pražce TB93, rozdělení 700 mm) bylo zaznamenáno celkem 24 průjezdů, z nichž 22 bylo využito pro následující hodnocení. Na lokalitě Modřany (kolejnice 49E1, pražce B03, rozdělení „c“ – tedy 674,5 mm) bylo zaznamenáno celkem 13 průjezdů, z nichž 11 bylo využito pro následující hodnocení. Během statistické analýzy byl sledován zejména vliv rychlosti jednotlivých vozů a vliv nápravového zatížení, které je u jednotlivých typů tramvají odlišné.

Vzhledem k velkému rozptylu rychlostí vozů u dat naměřených v Braníku bylo možné pozorovat vliv rychlosti vozu na velikost průhybu. Pro jednotlivé typy tramvají byly nalezeny funkce, které s naměřenými daty korelují s koeficientem determinace  $R^2$  0,8 a vyšším. Největší průhyb způsobovaly vozy jedoucí rychlostí přibližně od 40 do 50 km/h. Tato „kritická“ rychlost se lišila dle typu vozu, respektive velikosti zatížení. Průhyb pro tramvaje jedoucí vyšší rychlostí se postupně zmenšoval. Naopak pro rychlosti menší než „kritická“ rychlost se průhyb zmenšoval pozvolněji. Zajímavé jsou pak také rychlosti okolo 20 km/h, kde se velikost průhybu opět lehce zvětšuje.

Jak již bylo v předchozím odstavci naznačeno, velikost zatížení má významný vliv na velikost průhybu. Z měření vyplývá, že intuitivní předpoklad, čím větší zatížení, tím větší průhyb, je validní.

V této práci nebyl porovnán průhyb mezi jednotlivými lokalitami, a to z důvodu velkého množství rozdílných parametrů. Lokality se liší rozdílným typem kolejnice, stářím konstrukce a jiným rozdělením pražců. Z tohoto důvodu by nebylo možné určit vliv jednotlivých veličin.

Provedené měření ukázalo zajímavé výsledky, které je možné rozvíjet v dalších fázích měření. Jako možný směr ke sledování se jeví vliv tvaru kolejnice a potvrzení hypotézy, že tuhost kolejnice je přímo úměrná s dosahovaným průhybem kolejnice při shodné rychlosti.



## 5 Seznam použitých zdrojů

- [1] PLÁŠEK, Otto a spol. *Železniční stavby železniční spodek a svršek*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004. ISBN: 80-214-2620-9.
- [2] MORAVČÍK, Milan a MORAVČÍK, Martin. *Mechanika železničních tratí 1 Teoretická analýza a simulácia úloh mechaniky železničných tratí*. Žilinská univerzita v Žiline/EDIS – vydavateľstvo ŽU., 2002. ISBN: 80-7100-983-0.
- [3] MORAVČÍK, Milan a MORAVČÍK, Martin. *Mechanika železničních tratí 2 Teoretická analýza a simulácia úloh mechaniky železničných tratí*. Žilinská univerzita v Žiline/EDIS – vydavateľstvo ŽU., 2002. ISBN: 80-7100-984-9.
- [4] HARTMANN, Miroslav. *Vnější vlivy působící na kolejnici a jejich kompenzace vhodným systémem upevnění kolejnic*. [online] Vossloh Fastening Systems. [vid. 30-12-2022] Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/50157007/d11-wroblewski-vossloh.pdf>
- [5] KULICH, Pavel. *Dynamická analýza koleje*. [online] Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2018. [vid. 01-11-2022] Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/70672?locale-attribute=cs>
- [6] MOJŽÍŠEK, Dominik. *Dynamická analýza koleje*. [online] Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2017. [vid. 01-11-2022] Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/64328>
- [7] PLÁŠEK, Otto. *Železniční konstrukce I, Modul 2, Mechanika kolejové jízdní dráhy*. [online] Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2007. [vid. 01-11-2022] Dostupné z: [http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CN01-Zeleznici%20konstrukce%20I/M02-Mechanika%20kolejov%C3%A9%20j%C3%ADzdn%C3%AD%20dr%C3%A1hy.pdf?fbclid=IwAR1XYcvh5-cFeWuAqpHyMZ3v7TsZyLVbuiakqg4ZpEmiQcdH3vfZJMtU\\_nl](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CN01-Zeleznici%20konstrukce%20I/M02-Mechanika%20kolejov%C3%A9%20j%C3%ADzdn%C3%AD%20dr%C3%A1hy.pdf?fbclid=IwAR1XYcvh5-cFeWuAqpHyMZ3v7TsZyLVbuiakqg4ZpEmiQcdH3vfZJMtU_nl)
- [8] VOŘECHOVSKÝ, Miroslav. *Pružnost a plasticita, Modul CD03-MO1, Průvodce*. [online] Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2005. [vid. 01-11-2022] Dostupné z: [http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CD03-Pruznost%20a%20plasticita/CD03-Pruznost%20a%20plasticita%20%20P01-Pruznost%20a%20plasticita%20-%20pruvodce%20predmetem.pdf?fbclid=IwAR0bcG0Lcq0SGG1ZdCfT7nnC2NmNiVb2hjX2XK4aaqKLFZDINSCyUr\\_Hu-c](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CD03-Pruznost%20a%20plasticita/CD03-Pruznost%20a%20plasticita%20%20P01-Pruznost%20a%20plasticita%20-%20pruvodce%20predmetem.pdf?fbclid=IwAR0bcG0Lcq0SGG1ZdCfT7nnC2NmNiVb2hjX2XK4aaqKLFZDINSCyUr_Hu-c)
- [9] MACHÁČEK, Michael. *Interakce základových pasů se základovou půdou*. [online] Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, 2011. [vid. 01-11-2022] Dostupné z:



<https://portal.fsv.cvut.cz/svoc/2012/vysledky/s1.pdf?fbclid=IwAR09ui-wpi2Btx2-7H8NK4RH3EbqdPrgZIOrgOD4PAQTG8bnfIIAaiWtoQ>

- [10] SVOBODOVÁ, Nikola. *Analýza metodiky pro navrhování pražcového podloží*. [online] Studentská vědecká odborná činnost, Školní rok 2011-2012. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2021. [vid. 01-11-2022] Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/196011/final-thesis.pdf?sequence=-1>
- [11] KREJSA, Martin. *Pružnost a plasticita II, 3. ročník bakalářského studia*. [online] VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební. [vid. 01-11-2022] Dostupné z: [http://fast10.vsb.cz/krejsa/studium/pp2\\_tema\\_08.pdf](http://fast10.vsb.cz/krejsa/studium/pp2_tema_08.pdf)
- [12] SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY. *Předpis SŽDC S3, Železniční svršek Díl IV Kolejnice*. [online] účinnost od 1.října 2008. [vid. 19-12-2022] Dostupné z: [file:///C:/Users/lusem/Downloads/SZDC\\_S3\\_Dil\\_04\\_sezm1az3\\_20190301.pdf](file:///C:/Users/lusem/Downloads/SZDC_S3_Dil_04_sezm1az3_20190301.pdf)
- [13] DOPRAVNÍ PODNIK HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY, a. s. *Historie městské hromadné dopravy v Praze*. [online]. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: [https://www.dpp.cz/zabava-a-zazitky/historie-dpp/historie-mestske-hromadne-dopravy-v-praze?fbclid=IwAR1gQ68w-N0Dabi3icMH5XOW4VN21o2GdXVtgapI9\\_FxqZebXt1O-nnd9FA](https://www.dpp.cz/zabava-a-zazitky/historie-dpp/historie-mestske-hromadne-dopravy-v-praze?fbclid=IwAR1gQ68w-N0Dabi3icMH5XOW4VN21o2GdXVtgapI9_FxqZebXt1O-nnd9FA)
- [14] PRAŽSKÁ INTEGROVANÁ DOPRAVA. *Tramvaje*. [online]. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://pid.cz/tramvaje/>
- [15] DOPRAVNÍ PODNIK HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY, a. s. *DPP v datech*. [online] 2022. [vid. 10-10-2022] Dostupné z: <https://www.dpp.cz/spolecnost/o-spolecnosti/dpp-v-datech>
- [16] BROUŠKA, Michael a spol. *Praha dokončila největší modernizaci tramvají. Podívejte se na kuriozity z vozoven*. [online] 2019. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: [https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/doprava/prehled-typu-tramvaji-provozovanych-v-praze-zajimavosti/r~bc517c582eb311e98854ac1f6b220ee8/?fbclid=IwAR2p\\_n2KNkKleTDngxt7ds9-EePSH3U5BlrVy21hRSv2FiuaAunk881Vw-k](https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/doprava/prehled-typu-tramvaji-provozovanych-v-praze-zajimavosti/r~bc517c582eb311e98854ac1f6b220ee8/?fbclid=IwAR2p_n2KNkKleTDngxt7ds9-EePSH3U5BlrVy21hRSv2FiuaAunk881Vw-k)
- [17] PORTÁL HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY. *Pražské tramvaje*. [online] 2011. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/mhd/prazske-tramvaje.html>
- [18] PRAŽSKÉ TRAMVAJE. *T3R.P.* [online]. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://www.prazsketramvaje.cz/view.php?cisloclanku=2006040818>
- [19] OPRAVNA TRAMVAJÍ. *T3R.P.* [online]. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <http://www.opravnatramvaji.cz/cz/reference/tramvaje/t3r-p>
- [20] CHOUR, Martin. *Tatra T3R.P/PV*. [online] 2015. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://www.tram-bus.cz/mhd-praha/tramvaje/vozy/tatra-t3/tatra-t3r-ppv/>





- [21] PRAŽSKÉ TRAMVAJE. *T3R.PLF*. [online]. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://www.prazsketramvaje.cz/view.php?cisloclanku=2007040801>
- [22] PORTÁL HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY. *Zmodernizovaná tramvaj T3R.PLF vyjela do provozu s cestujícími*. [online] 2017. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: [https://www.praha.eu/jnp/cz/o\\_meste/zivot\\_v\\_praze/praha\\_bezbarierova/zmodernizovana\\_tramvaj\\_typu\\_t3r\\_plf5465-export.html](https://www.praha.eu/jnp/cz/o_meste/zivot_v_praze/praha_bezbarierova/zmodernizovana_tramvaj_typu_t3r_plf5465-export.html)
- [23] SŮRA, Jan. *Zakázku na proměnu tramvají T3 na „wany“ v Praze vyhrál Pragoimex*. [online] 2022. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://zdopravy.cz/zakazku-na-promenu-tramvaji-t3-na-wany-v-praze-vyhral-pragoimex-111454/>
- [24] PRAŽSKÉ TRAMVAJE. *KT8D5.RN2P*. [online]. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://www.prazsketramvaje.cz/view.php?cisloclanku=2006040801>
- [25] PRAŽSKÉ TRAMVAJE. *14T*. [online]. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://www.prazsketramvaje.cz/view.php?cisloclanku=2006082001>
- [26] DOLEJŠÍ, Milan. *Znovu a možná lépe. Začíná obnova neoblíbených tramvají 14T, do tří let mají jezdit všechny*. [online] 2018. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/regiony/2380405-znovu-a-mozna-i-lepe-zacina-obnova-neoblíbených-tramvaji-14t-do-tri-let-maji-jezdit?fbclid=IwAR2zeDaNRUfKRhNfd5xg-aqWzxFDsNf6x4HchwOYST7XcLgl2xoLETfU9U>
- [27] PRAŽSKÉ TRAMVAJE. *Škoda 15T ForCity se představuje...* [online]. [vid. 20-10-2022] Dostupné z: <https://www.prazsketramvaje.cz/view.php?cisloclanku=2008041001>
- [28] ZÁRUBA, Tomáš. *Finanční náročnost obnovy tramvajového parku pro Prahu*. [online] Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2020. [vid. 10-11-2022] Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/76383/ZarubaT\\_FinancniNarocnost\\_V\\_M\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/76383/ZarubaT_FinancniNarocnost_V_M_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [29] ČERNÝ, M. a spol. *Malý atlas městské dopravy 2002*. Praha: Gradis Bohemia, s. r. o., 2002. ISBN: 80-902791-5-5.
- [30] BRET, Ondřej a VAŇKOVÁ, Petra. *Pomůcka pro měření (nejen) hluku z tramvajové dopravy*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT v Praze, 2019. ISBN: 978-80-01-06537-2.
- [31] TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY – MORAVIA STEEL. *Kolejnice*. [online]. [vid. 29-12-2022] Dostupné z: <https://www.trz.cz/vyroby/16/kolejnice>
- [32] ŠUROVSKÝ, Jakub. *Analýzu průhybu tramvajové koleje v závislosti na typu vozu*. Studentská vědecká odborná činnost. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2022.



- 
- [33] *Regresní a korelační analýza*. [online] České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní. [vid. 01-01-2023] Dostupné z: [https://www.fd.cvut.cz/department/k611/pedagog/k611tho\\_soubory/0\\_regrese.pdf](https://www.fd.cvut.cz/department/k611/pedagog/k611tho_soubory/0_regrese.pdf)
- [34] *(Lineární) regrese*. [online] Univerzita Karlova, Filozofická fakulta. [vid. 01-01-2023] Dostupné z: <https://ksoc.ff.cuni.cz/wp-content/uploads/sites/76/2018/09/6.-Statistika2-Line%C3%A1rn%C3%AD-regrese.pdf>



## 6 Seznam obrázků

Obr. 1: Roznos zatížení v koleji pod nápravou [1].....	13
Obr. 2: Roznos zatížení v koleji pod nápravou [4].....	13
Obr. 3: Schéma Zimmermanova modelu [6].....	15
Obr. 4: Schéma Pasternakova modelu [6].....	16
Obr. 5: Schéma Dvouvrstvého systému [6].....	16
Obr. 6: Schéma Dynamické soustavy [6].....	17
Obr. 7: Schéma modelu (2.2.1.3) [5].....	18
Obr. 8: Průhybová křivka modelu (2.2.1.1) a naměřených dat [5].....	18
Obr. 9: Průhybová křivka modelu (2.2.1.3) a naměřených dat [5].....	18
Obr. 10: Schéma Diskrétního modelu [6].....	19
Obr. 11: Schéma Dvouvrstvého systému [6].....	20
Obr. 12: Schéma modelu (2.2.2.3) [6].....	20
Obr. 13: Schéma tramvaje T3R.P [30].....	22
Obr. 14: Schéma tramvaje T3R.PLF [30].....	23
Obr. 15: Schéma tramvaje KT8D5.RN2P [30].....	24
Obr. 16: Schéma tramvaje 14T [30].....	25
Obr. 17: Schéma tramvaje 15T [30].....	25
Obr. 18: Měření v Braníku [Zdroj: Autor].....	26
Obr. 19: První lokalita na Mapy.cz.....	27
Obr. 20: Měření v Braníku [Zdroj: Autor].....	27
Obr. 21: Měření v Modřanech [Zdroj: Autor].....	28
Obr. 22: Druhá lokalita na Mapy.cz.....	29
Obr. 23: Měřicí přístroj [Zdroj: Autor].....	29
Obr. 24: Příčinková čára průhybu [32].....	30
Obr. 25: Tvar příčinkové čáry průhybu pro podvozek [32].....	30
Obr. 26: Průběh průhybu pro T3R.P [Zdroj: Autor].....	33
Obr. 27: Průběh průhybu pro 14T [Zdroj: Autor].....	34
Obr. 28: Průběh průhybu pro 15T [Zdroj: Autor].....	34



---

## 7 Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty naměřené v Braníku [Zdroj: Autor].....	31
Tabulka 2: Hodnoty naměřené v Modřanech [Zdroj: Autor].....	32
Tabulka 3: Hmotnosti jednotlivých vozů [30].....	32
Tabulka 4: Hmotnosti na jednu nápravu [30].....	33

## 8 Seznam grafů

Graf 1: Závislost průhybu na rychlosti [Zdroj: Autor].....	35
Graf 2: „Znormovaná“ závislost průhybu na rychlosti [Zdroj: Autor].....	36
Graf 3: Závislost průhybu na zatížení [Zdroj: Autor].....	37
Graf 4: Závislost průhybu na zatížení [32].....	37
Graf 5: Závislost průhybu na zatížení [Zdroj: Autor].....	38
Graf 6: Závislost průhybu na zatížení [Zdroj: Autor].....	38