



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

# STATICKÁ ANALÝZA VYBRANÉ KONSTRUKCE

STATIC ANALYSIS OF CHOSEN STRUCTURE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

SOŇA JANKOVIČOVÁ

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF MARTINÁSEK, Ph.D.

BRNO 2021



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3608R001 Pozemní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav stavební mechaniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Soňa Jankovičová
<b>Název</b>	Statická analýza vybrané konstrukce
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Josef Martinásek, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2020
<b>Datum odevzdání</b>	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

---

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

Kadlčák J., Kytýr J. Statika stavebních konstrukcí II

Kytýr J. a spol.: Statika II, Řešené příklady

Normy:

ČSN EN 1991-1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem

ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Cílem této práce je statická analýza konstrukce ocelové lávky pro pěší a cyklisty. Sestavení výpočetního modelu v programu SCIA Engineer. Posouzení a následné porovnání výsledků s ručními výpočty na vhodném zjednodušeném modelu.

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Josef Martinásek, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca sa zameriava na statickú analýzu oceľovej konštrukcie lávky, ktorá je inšpirovaná skutočne stojacou lávkou cez rieku Morava. Lávka bola navrhnutá ako Langerov trám, teda je tvorená dvojicou priehradových trémov, zosilnených o oceľové oblúky so závesmi. Podobný model je vytvorený v programe SCIA Engineer. Celková dĺžka lávky je 137,5 m v priemete a výška v najvyššom bode 9,13 m.

Táto bakalárska práca je spracovaná podľa platných noriem. Zaťaženie je spočítané ručne. Ďalej sú použité niektoré známe metódy pre výpočet staticky neurčitých konštrukcií pre určenie vnútorných síl. Pre ručné výpočty je použitý zjednodušený prúťový model na štyroch podporách. Následne sú výsledky porovnané.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

oceľová lávka, statická analýza, silová metóda, deformačná metóda, metóda trojmomentových rovníc, SCIA Engineer

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis focuses on static analysis of the steel footbridge, inspired by real footbridge over the Morava river. Bridge was designed as a solid ribbed arch, so it consists of a pair truss beams, reinforced by two steel arches with suspenders. A similar model is created the SCIA Engineer program. The total length of the footbridge is 137,5m in projection and the highest point of bridge is 9,13 m.

This bachelor thesis is processed according to valid standards. The structural load is calculated manually. Furthermore, some known methods are used to calculate statically indeterminate structures to find internal forces. For these calculations, is used a simplified bar model standing on four point supports. Afterwards, the results are compared.

## **KEYWORDS**

steel footbridge, static analysis, force method of analysis, stiffness method, three-torque equation, SCIA Engineer

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Soňa Jankovičová *Statická analýza vybrané konstrukce*. Brno, 2021. 53s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Josef Martinásek, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Statická analýza vybrané konstrukce* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 18. 5. 2021

---

Soňa Jankovičová  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Statická analýza vybrané konstrukce* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 18. 5. 2021

---

Soňa Jankovičová  
autor práce

## **POĎAKOVANIE**

Chcem sa veľmi poďakovať pánovi Ing. Josefovi Martináskovi, Ph.D., môjmu vedúcemu bakalárskej práce za jeho trpezlivosť, ochotu, rady a pripomienky pri konzultáciách nad touto prácou. Zároveň sa chcem poďakovať svojej rodine a priateľom za ich podporu.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>KONŠTRUKCIA</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>CHARAKTERISTIKA KONŠTRUKCIE</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2</b>	<b>MODEL KONŠTRUKCIE</b> .....	<b>3</b>
2.2.1	Prierezy .....	3
2.2.2	Vnútorne sily .....	4
<b>3</b>	<b>ZAŤAŽENIE</b> .....	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>STÁLE ZAŤAŽENIE</b> .....	<b>6</b>
3.1.1	Vlastná tiaž .....	6
3.1.2	Ďalšie stále zaťaženie .....	6
<b>3.2</b>	<b>PREMENNÉ ZAŤAŽENIE</b> .....	<b>6</b>
3.2.1	Chodci.....	6
3.2.2	Sústredené zaťaženie chodcov.....	7
3.2.3	Výskyt obslužného vozidla.....	7
3.2.4	Vietor .....	8
<b>4</b>	<b>POSÚDENIE</b> .....	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>RUČNÉ VÝPOČTY</b> .....	<b>15</b>
<b>5.1</b>	<b>VÝPOČOVÝ MODEL</b> .....	<b>15</b>
<b>5.2</b>	<b>SILOVÁ METÓDA</b> .....	<b>16</b>
5.2.1	Stupeň statickej neurčitosti.....	17
5.2.2	Základná staticky určitá sústava.....	17
5.2.3	Zaťažovacie stavy .....	18
5.2.4	Výpočet deformácií .....	21
5.2.1	Hodnoty staticky neurčitých veličín.....	26
5.2.2	Vnútorne sily .....	26
<b>5.3</b>	<b>METODA TROJMOMENTOVÝCH ROVNÍC</b> .....	<b>28</b>
5.3.1	Základná sústava .....	28
5.3.2	Odvodenie trojmomentovej rovnice .....	30
5.3.3	Vnútorne sily .....	31
<b>5.4</b>	<b>DEFORMAČNÁ METÓDA</b> .....	<b>34</b>
5.4.1	Stupeň pretvárnej neurčitosti.....	34
5.4.2	Primárny stav .....	35
5.4.3	Sekundárny stav.....	36



5.4.4	Koncové sily .....	39
<b>6</b>	<b>ZHODNOTENIE .....</b>	<b>43</b>
<b>6.1</b>	<b>POROVNANIE VÝSLEDKOV .....</b>	<b>43</b>
<b>6.1</b>	<b>POROVNANIE METÓD .....</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVER .....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>PRÍLOHY .....</b>	<b>46</b>

# 1 ÚVOD

V tejto bakalárskej práci je spracovaná statická analýza lávky pre peších a cyklistov, ktorá je tvarom inšpirovaná novopostavenou lávkou cez rieku Morava a spája tak Českú a Slovenskú republiku. Lávka je navrhnutá pre pohyb chodcov a cyklistov, čo je zohľadnené aj pri výpočte zaťaženia.

Nosnú konštrukciu tvorí dvojica priehradových parapetných trémov spojených mostovkou. Ku každému trému je pripojený oceľový oblúk so závesmi. Takýto model je spracovaný vo výpočtovom programe SCIA Engineer a posúdený na medzný stav únosnosti a medzný stav použiteľnosti. Posudky sú na základe platných noriem ČSN EN.

Zaťaženie pre výpočty je spočítané ručne. Uvažujeme stále zaťaženie od vlastnej tiaže a ďalšieho stáleho zaťaženia. Premenné zaťaženie tvorí pôsobenie vetra, chodci a mimoriadny výskyt vozidla. Hľadáme najnepriaznivejšie kombinácie týchto zaťažení.

Pre ručný výpočet volíme vhodnú idealizovanú konštrukciu prútu, spojitý nosník s tromi poľami. Vzniká tak model staticky neurčitej konštrukcie, na ktorú sú aplikované vybrané metódy z predmetov Statika I. a Statika II. na zistenie priebehu vnútorných síl.

V poslednej časti práce sú porovnané výsledky priestorového modelu s výsledkami zjednodušeného modelu a tak overená správnosť výpočtu vo vybranom programe. Na záver práca obsahuje zhodnotenie vybraných metód a ich použiteľnosť pre daný spojitý nosník.

## 2 KONŠTRUKCIA

### 2.1 CHARAKTERISTIKA KONŠTRUKCIE

Tvar konštrukcie je inšpirovaný lávkou, ktorá premost'uje rieku Morava na hranici medzi Slovenskou a Českou republikou. Táto lávka pôsobí ako Langerov trám. Celková dĺžka mostu je 137,5 m v jeho priemete. Spojitý nosník je rozdelený na tri časti. Prvá a posledná časť má 24,5 m. Trám pod oblúkom je dlhý 88,5 m. Výška nosníku je 1,73 m a výška uprostred rozpätia je 7,4 m. Celkovo sa tak lávka týči do výšky 9,13 m. Osová šírka nosníkov mostovky je oproti skutočnosti zvolená jednotne a to 6,2 m. Oblúkové časti sa z každej strany zužujú, vrchol každého oblúku je posunutý dovnútra o 1 m v horizontálnom smere. Oblúky sú spojené šiestimi nosníkmi vzdialených od seba o 12m.

Lávka stojí celkovo na ôsmych podporách. Jedna pevná a zvyšné sú posuvné. Zvolené sú tak aby bola konštrukcii dovolená rozťažnosť.

Všetky nosné prvky lávky sú z oceli S355. Nosníky mostovky sú zaliate železobetónom triedy C30/37-XF2+XD1. Doska modelu má konštantnú výšku 0,25 m. Zábradlie je z vodorovných oceľových lán umiestnených na vnútornej strane priehradových nosníkov vo výške 1,3 m.

Informácie o konštrukcii lávky boli získane z článku „Lávka přes řeku Moravu včetně přístupové komunikace v archeologickém parku Mikulčice – Kopčany“<sup>1</sup> od autorov: Ing. Vladimír Engler , Ing. František Hanuš , Ing. Petr Harazim.



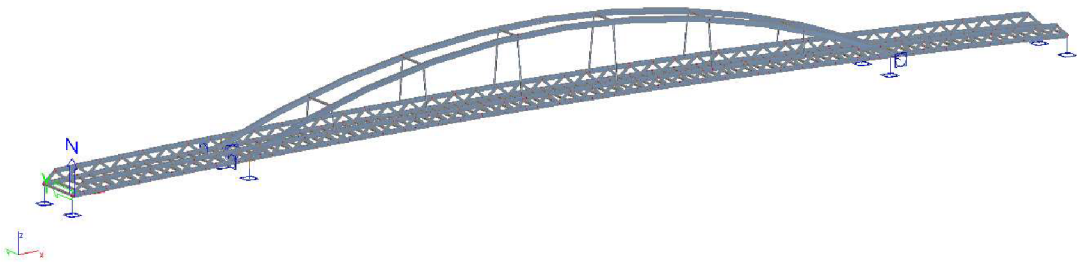
Obrázok 1: Lávka cez rieku Morava

<sup>1</sup> <https://silnice-zeleznice.cz/silnicni-infrastruktura/lavka-pres-reku-moravu-vcetne-pristupove-komunikace-v-arheologickem-parku-mikulcice-kopcany-23>

## 2.2 MODEL KONŠTRUKCIE

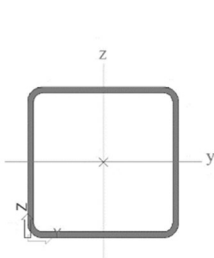
Priestorový model konštrukcie bol vytvorený v programe SCIA Engineer. Jeho tvar bol inšpirovaný lávkou cez rieku Morava. Použité sú rôzne oceľové dielce obdĺžnikového, kruhového a I-tvaru, inšpirované skutočnými, ktoré podľa článku „Lávka přes řeku Moravu včetně přístupové komunikace v archeologickém parku Mikulčice – Kopčany“ od autorov: Ing. Vladimír Engler , Ing. František Hanuš , Ing. Petr Harazim, boli navrhnuté na lávke.

Pre modelovanie ďalej bolo potrebné určiť pôsobiace zaťaženie, ktorému je venovaná kapitola 3. Jednotlivé kombinácie od zaťažovacích stavov už boli počítané automaticky programom. Použili sme kombináciu pre medzný stav únosnosti (ďalej len MSÚ) a medzný stav použiteľnosti (ďalej len MSP).

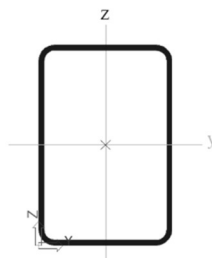


Obrázok 2: Model lávky pre peších a cyklistov v SCIA Engineer

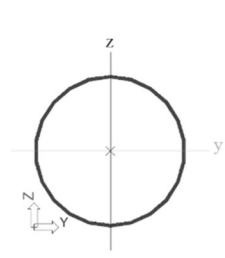
### 2.2.1 Prierezy



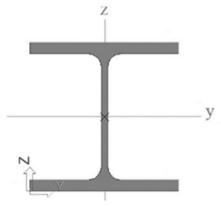
Obrázok 4: Diagonála  
Tenkostenný prierez 250x250x10



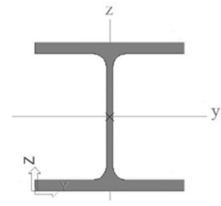
Obrázok 3: Oblúk  
Tenkostenný prierez 600x400x16



Obrázok 5: Záves  
Tenkostenný prierez 127x2,5



**Obrázok 7: Mostovkový nosník (pole pod oblúkom) HEB 200**

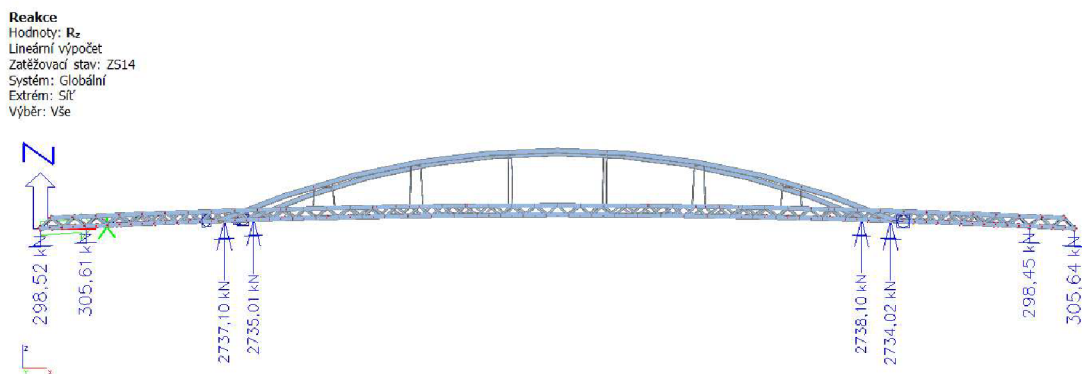


**Obrázok 6: Mostovkový nosník (krajné polia) HEM 180**

## 2.2.2 Vnútorne sily

### Reakcie

Určíme si sumu reakcií pôsobiacich v ľavej a pravej polovici. Tie sú určujúce pre možné porovnanie s ručnými výpočtami na 2D modeli. Výsledné reakcie v jednotlivých podporách sú vypočítané programom (viď obrázok 8).



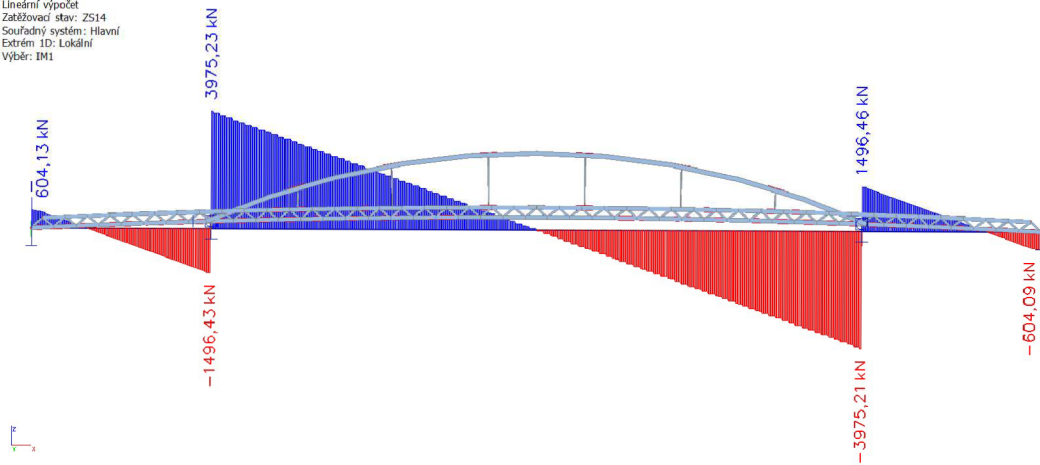
**Obrázok 8: Reakcie od zaťaženia na modele lávky**

$$\sum R_L = 305,61 + 298,52 + 2\,735,01 + 2\,737,1 = 6\,076,24 \text{ kN}$$

$$\sum R_P = 305,64 + 298,45 + 2\,734,02 + 2\,738,1 = 6\,076,21 \text{ kN}$$

## Posúvajúce sily

1D vnútřní síly  
Hodnoty:  $V_z$   
Lineární výpočet  
Zatěžovací stav: ZS14  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Lokální  
Výběr: IM1



Obrázok 9: Posúvajúce sily od zaťaženia na modele lávky

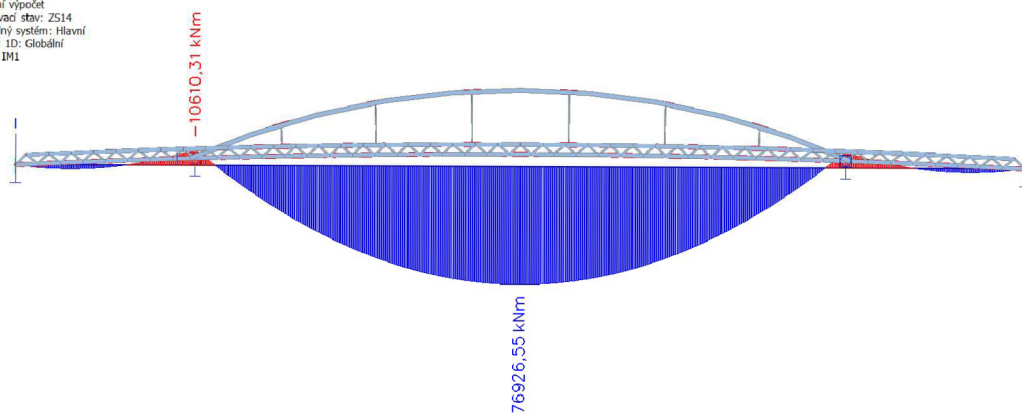
$$V_a = 604,13 \text{ kN}$$

$$V_{b,L} = -1\,496,43 \text{ kN}$$

$$V_{b,P} = 3\,975,23 \text{ kN}$$

## Ohybové momenty

1D vnútřní síly  
Hodnoty:  $M_v$   
Lineární výpočet  
Zatěžovací stav: ZS14  
Souřadný systém: Hlavní  
Extrém 1D: Globální  
Výběr: IM1



Obrázok 10: Ohybové momenty od zaťaženia na modele lávky

$$M_a = 0 \text{ kNm}$$

$$M_b = -10\,610,31 \text{ kNm}$$

$$M_{max} = 76\,926,55 \text{ kNm}$$

### 3 ZAŤAŽENIE

#### 3.1 STÁLE ZAŤAŽENIE

##### 3.1.1 Vlastná tiaž

Celková vlastná tiaž konštrukcie je získaná ako suma z výpočtového programe SCIA Engineer.

$$G_k = 2\,077,43 \text{ kN}$$

##### 3.1.2 Ďalšie stále zaťaženie

Okrem vlastnej tiaže ocelevej konštrukcie lávky, musíme uvažovať aj mostovku tvorenú železobetónovou doskou hrubou 0,25 m. Objemová hmotnosť pre železový betón má hodnotu 25 kN/m<sup>3</sup>.

$$G_{b,k} = \gamma * t = 0,25 * 25 = 6,25 \text{ kN/m}^2$$

#### 3.2 PREMENNÉ ZAŤAŽENIE

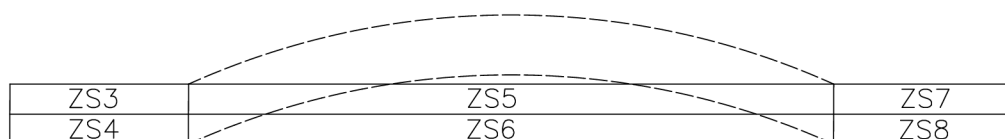
##### 3.2.1 Chodci

Uvažovaná premenná zaťažovacia sila od chodcov a cyklistov je prevzatá z normy ČSN EN 1991-2 Zatížení mostů dopravou (kap.5). Jej hodnota je  $q_{fk} = 5,0 \text{ kN/m}^2$ . Je to hodnota pre chodcov, cyklisti však pôsobia menším zaťažením, preto stačí počítať s touto hodnotou.

V praxi je pohyb ľudí po moste väčšinou nepravidelný. Teda zaťaženie je rozdelené na ploche mostovky nerovnomerne. Z tohto dôvodu je potrebné vytvoriť niekoľko zaťažovacích stavov pre určenie kritického rozmiestnenia účinkov síl na konštrukciu lávky. Celkovú plochu sme pre tieto účely rozdelili na šesť oblastí (viď obrázok 11):

Zaťažovacie stavy (viď schéma) :

- ZS3 – chodci na kraji lávky v hornej polovici
- ZS4 – chodci na kraji lávky v dolnej polovici
- ZS5 – chodci v strede lávky v hornej polovici
- ZS6 – chodci v strede lávky v dolnej polovici
- ZS7 – chodci na opačnom kraji lávky v hornej polovici
- ZS8 – chodci na opačnom kraji lávky v dolnej polovici



Obrázok 11: Schéma rozdelenia zaťaženia chodcami

### 3.2.2 Sústredené zaťaženie chodcov

Túto hodnotu nám udáva národná norma ČSN EN 1991-2 Zatížení mostů dopravou (kap.5).  $Q_{fwk} = 10 \text{ kN}$ , ktorá pôsobí na ploche  $0,1 \times 0,1 \text{ m}$ .

V modeli lávky ju uvažujeme ako osamelú silu. Pre zjednodušenie bola umiestnená do stredu nosníka mostovky, ktorý sa nachádza presne v strede lávky. Jeho umiestnenie nebolo počítané, pretože to nie je cieľom tejto práce.

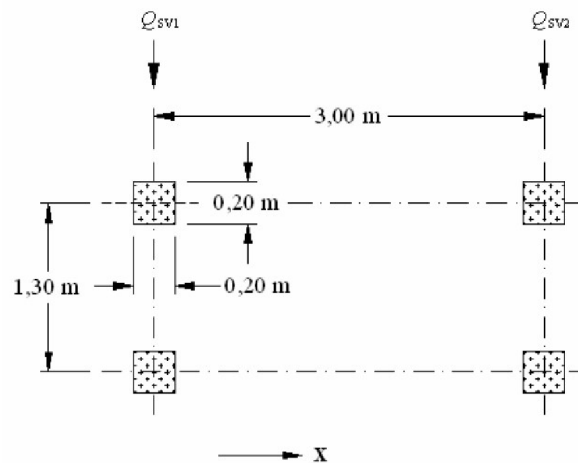
### 3.2.3 Výskyt obslužného vozidla

Lávka je určená pre chodcov a cyklistov, ale je dostatočne široká aj pre vozidlo. Keďže pred vstupom na lávku nie je žiadna pevná prekážka, môže sa stať, že v mimoriadnych situáciách vojde vozidlo na konštrukciu a preto je potrebné zobrať toto zaťaženie v úvahu.

Podľa ČSN EN 1991-2 (kap.5) uvažujeme sústavu síl od dvojnáprav vzdialených osovo 3 m. Rozchod kôl od seba vo vzdialenosti 1,3 m (viď obrázok 12).

$$Q_{sv1} = 80 \text{ kN}$$

$$Q_{sv2} = 40 \text{ kN}$$



Obrázok 12: Pozícia kolies obslužného vozidla, [2]



## 3.2.4 Vietor

### 3.2.4.1 Rýchlosť vetru a dynamický tlak

Pre výpočet zaťaženia na lávku nie je nutné počítat dynamický tlak, postačí nám zjednodušená metóda výpočtu. Výpočet je stanovený podľa ČSN EN 1991-1-4:2007 (kap.4).

#### Základná rýchlosť vetra $v_b$

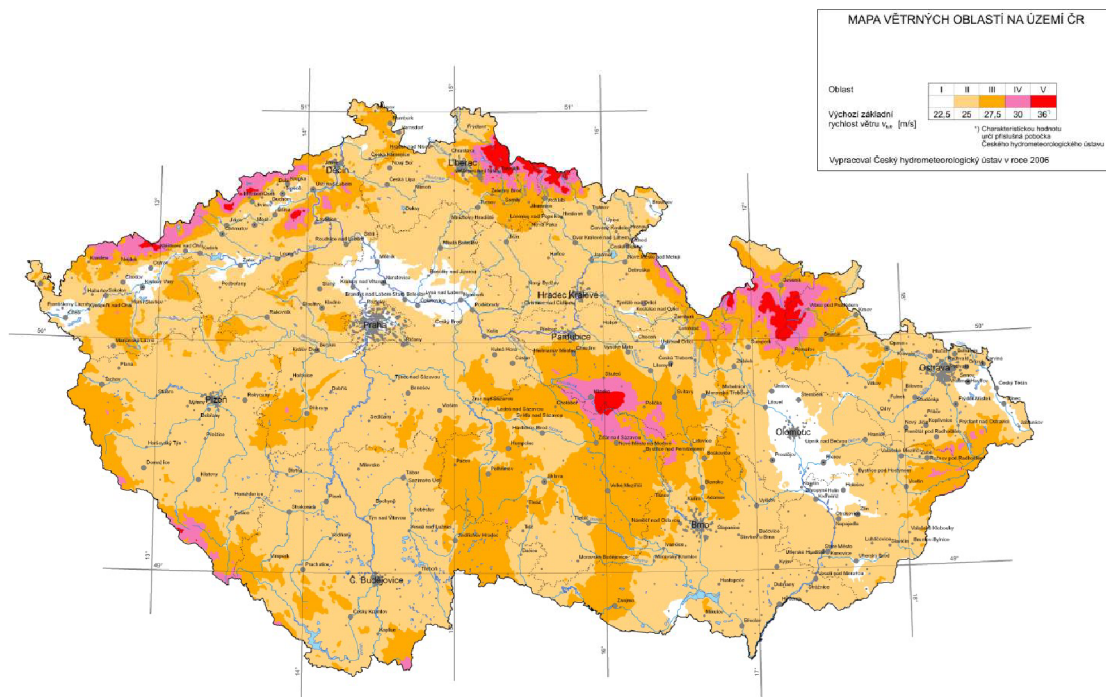
podľa [2] - kap. 4.2 (4.1)

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} = 1,0 * 1,0 * 25 = 25 \text{ m/s}$$

$c_{dir}$  súčiniteľ smeru vetra;  $c_{dir} = 1,0$

$c_{season}$  súčiniteľ ročného obdobia;  $c_{season} = 1,0$

$v_{b,0}$  základná rýchlosť vetra, pre ve+6ternú oblasť II.  $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$   
určená z mapy veterných oblastí Českej republiky



Obrázok 13: Mapa veterných oblastí Českej republiky

### Středná rychlost větra $v_m(z)$

podľa [2] - kap. 4.3.1 (4.3)

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b = 0,331 * 1,0 * 25 = 8,285 \text{ m/s}$$

$c_r(z)$     súčiniteľ drsnosti terénu [–]

$c_0(z)$     súčiniteľ orografie;  $c_0(z) = 1,0$

$v_b$         základná rýchlosť vetra [m/s]

### Drsnosť terénu $c_r(z)$

podľa [2] - kap. 4.3.2 (4.4 a 4.5)

Pre  $z_{min} \leq z \leq z_{max}$  platí:

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,215 * \ln\left(\frac{10,44}{0,3}\right) = 0,331$$

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 * \left(\frac{0,3}{0,05}\right)^{0,07} = 0,215$$

$z$          výška lávky [m]

$z_0$         parameter drsnosti terénu, z tab.1, [m]

$z_{0,II}$      parameter drsnosti terénu, pre kategóriu terénu II, z tab.1, [m]

$z_{min}$      minimálna výška definovaná v tabuľke 1, [m]

$z_{max}$      maximálna výška, uvažuje sa 200 m

$k_r$         súčiniteľ drsnosti terénu [–]

Kategorie terénu	$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
0 Moře nebo pobřežní oblasti vystavené otevřenému moři	0,003	1
I Jezera nebo vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací a bez překážek	0,01	1
II Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenost je větší než 20násobek výšky překážek	0,05	2
III Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami nebo s izolovanými překážkami, jejichž vzdálenost je maximálně 20násobek výšky překážek (jako jsou vesnice, předměstský terén, souvislý les)	0,3	5
IV Oblasti, ve kterých je nejméně 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška je větší než 15 m	1,0	10
POZNÁMKA Kategorie terénu jsou zobrazeny v A.1.		

Obrázok 14: Kategórie terénu a ich parametre, [2]

### Intenzita turbulencie $I_v$

podľa [2] - kap. 4.4 (4.7)

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 * \ln\left(\frac{10,44}{0,3}\right)} = 0,282$$

- $k_I$       súčiniteľ turbulencie;  $k_I = 1,0$   
 $c_0(z)$     súčiniteľ orografie;  $c_0(z) = 1,0$   
 $z$         výška lávky [m]  
 $z_0$       parameter drsnosti terénu, z tab.1, [m]

### Maximálny dynamický tlak $q_p(z)$

podľa [2] - kap. 4.5 (4.8)

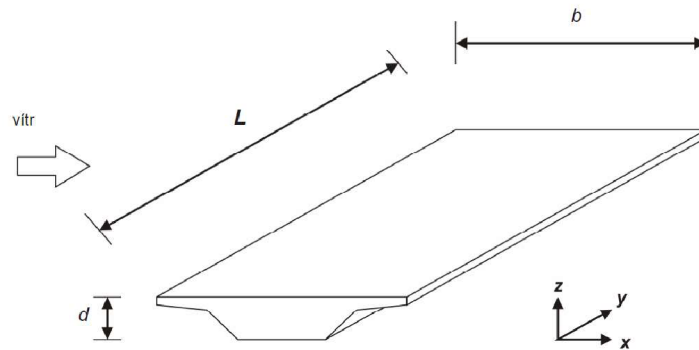
$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z)$$
$$q_p(z) = [1 + 7 * 0,282] * \frac{1}{2} * 1,25 * 8,285^2 = 0,127 \text{ kPa}$$

- $\rho$         hustota vzduchu;  $\rho = 1,25 \text{ kN/m}^2$   
 $I_v(z)$     intenzita turbulencie [-]  
 $v_m^2(z)$     stredná rýchlosť vetra [m/s]

### 3.2.4.2 Sily od vetra

Sily od zaťaženia vetrom rozdelíme do troch smerov podľa obrázku 15, kde

- Smer x rovnobežný so šírkou mostu, teda kolmý na jeho rozpätie L
- Smer y v smere rozpätia mostu L
- Smer z vertikálny



Obrázok 15: Smer y zaťaženia vetrom na mostoch, [2]

### 3.2.4.3 Pričný vietor – vietor v smere x:

Pre náš prípad uvažujeme len vietor v smere x.

#### • Základný dynamický tlak $q_b$

podľa [2] - kap. 4.5 (4.10)

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2(z) = \frac{1}{2} * 1,25 * 25^2 = 390,625 \text{ Pa}$$

$\rho$  hustota vzduchu;  $\rho = 1,25 \text{ kN/m}^2$

$v_b$  základná rýchlosť vetra [m/s]

### • Súčiniteľ zaťaženia vetrom C

podľa [2] - kap. 4.5 (4.9)

$$c_e = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{127,587}{390,625} = 0,327$$

podľa [2] - kap. 8.3.2

$$c_{f,x} = c_{f,x,0} = 1,3$$
$$C = c_e * c_{f,x} = 0,327 * 1,3 = 0,425$$

$c_e$	súčiniteľ expozície [–]
$c_{f,x}$	súčiniteľ síl pre zaťaženie nosnej konštrukcie mostu vetrom v smere x [–]
$c_{f,x,0}$	súčiniteľ sily bez vplyvu prúdenia okolo voľných koncov, $c_{f,x,0} = 1,3$
$q_p(z)$	maximálny dynamický tlak [Pa]
$q_b$	základný dynamický tlak [Pa]

### Sila vetra v smere x

$$A_{ref,x} = L * d_{tot} = 1,0 * 1,8 = 1,8 \text{ m}^2$$

podľa [2] - kap. 8.3.2 (8.2)

$$F_{w,x} = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 * c * A_{ref,x} = \frac{1}{2} * 1,25 * 25^2 * 0,425 * 1,8 = 0,3 \text{ kN/bm}$$

$$d_{tot} = 0,225 + 0,6 = 0,285 \text{ m}$$

$\rho$	hustota vzduchu; $\rho = 1,25 \text{ kN/m}^2$
$v_b$	základná rýchlosť vetra [m/s]
$c$	súčiniteľ zaťaženia vetrom [–]
$A_{ref,x}$	referenčná plocha v smere x [m <sup>2</sup> ]
$L$	dĺžka, počítaná na 1bm
$d_{tot}$	výška mostovky vrátane zábradlia, z tabuľky na obrázku 16, [m]

Silniční záchytný systém	Na jedné straně	Na obou stranách
Prodyšné zábradlí nebo svodidlo se svodnicí	$d + 0,3 \text{ m}$	$d + 0,6 \text{ m}$
Neprodyšné zábradlí nebo plné svodidlo	$d + d_1$	$d + 2d_1$
Prodyšné zábradlí a svodidlo se svodnicí	$d + 0,6 \text{ m}$	$d + 1,2 \text{ m}$

**Obrázok 16: Výšky použité pre  $A_{ref,x}$ , [2]**

Vietor budeme uvažovať v dvoch stavoch:

ZS10 – vietor zľava

ZS11 – vietor sprava

## 4 POSÚDENIE

Oceľová lávka bola posudzovaná na medzný stav únosnosti a medzný stav použiteľnosti priamo v programe SCIA Engineer. Pre posúdenie sme vybrali vhodné kombinácie zaťaženií pre príslušné stavy. Ich parametre koeficientov program určuje automaticky na základe platných noriem.

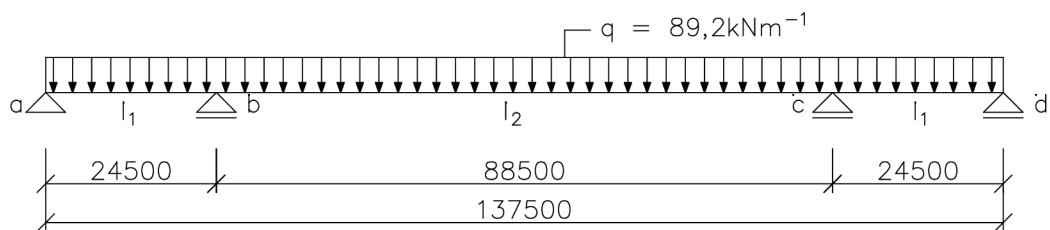
Protokol s výsledkami posudkov je uvedený v prílohe 4. Na základe tohto protokolu, môžeme určiť, že konštrukcia lávky na MSÚ nevyhovuje.

Správnosť práce s výpočtovým programom je teda vhodné overiť ručnými výpočtami na zjednodušenom prúťovom modeli.

## 5 RUČNÉ VÝPOČTY

### 5.1 VÝPOČOVÝ MODEL

Pre ručné výpočty volíme vhodnú statickú schému, ktorá slúži ako idealizácia nosnej konštrukcie. Pre posudzovanú lávku je zvolený symetrický spojitý nosník s tromi poľami, ukotvený na troch posuvných podporách a jednej pevnej podpore. Pre zjednodušenie je zvolený priamy prút, keďže sklon dotýčnice lávky na začiatku je  $3^\circ$ , toto zakrivenie bude mať len malý vplyv na výpočty. Nosník je zaťažovaný rovnomerným spojitým zaťažením po celej dĺžke. Aby bolo dosiahnuté rovnakého správania modelu s konštrukciou lávky, kde v strednej časti pôsobí naviac oblúk, v krajných poliach je zvolený prierez menších rozmerov, ako v strednom poli.



Obrázok 17. Statická schéma idealizovanej konštrukcie lávky

$$L_1 = 24,5 \text{ m}$$

$$L_2 = 88,5 \text{ m}$$

$$L = 137,5 \text{ m}$$

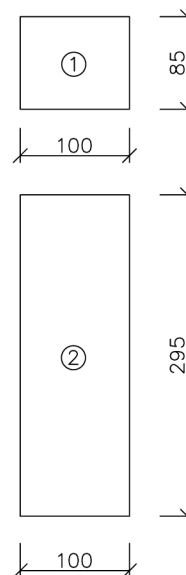
$$A_1 = bh = 0,1 * 0,085 = 8,5 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_2 = bh = 0,1 * 0,295 = 29,5 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I_1 = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12} * 0,1 * 0,085^3 = 5,118 * 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12} * 0,1 * 0,295^3 = 2,139 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$E = 9,706 * 10^{11} \text{ kPa}$$



Obrázok 18: Rozmery prierezov na prúte



Idealizovaná konštrukcia bola zaťažená spojitým zaťažením, ktoré sme vypočítali z výslednej reakcie od všetkých kombinácií. Jej hodnota bola získaná podielom celkovej reakcie prevzatej z výpočtového programu SCIA Engineer a celkovej dĺžky nosníku.

$$q = \frac{R_{celková}}{L} = \frac{12\,265,53}{137,5} = 89,2 \text{ kN/m}$$

Prierezové charakteristiky boli vypočítané z rovnosti maximálneho priehybu priestorového modelu a priehybu na zjednodušenom prúťovom modeli. V modeli lávky bol nájdený zvlášť maximálny priehyb na kratšej časti a na časti s oblúkom. Potom z rovnice pre priehyb staticky určitej konštrukcie s previslým koncom sme hľadali také hodnoty  $EI$ , aby zodpovedali reálnemu priehybu na danej časti od spojitého zaťaženia a zároveň mali konštantné charakteristiky po dĺžke. Našli sme hodnoty:

$$E = 9,706 * 10^{11} \text{ kPa}$$

$$A_1 = bh^2 = 0,1 * 0,1 = 10 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_2 = bh^2 = 0,1 * 0,3 = 30 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Na doporučenie vedúceho bakalárskej práce, boli hodnoty upravené, na hodnoty s ktorými počítame (viď vyššie).

## 5.2 SILOVÁ METÓDA

Silová metóda patrí medzi dve základné metódy, ktorými je možné vypočítať priebehy síl na staticky neurčitej konštrukcii. Určujúce pre túto metódu je, že za neznáme parametre sú zvolené sily alebo momenty. Deformácie  $\delta_i$  je následne možné vyjadriť ako funkcie neznámych síl  $X_i$  od jednotlivých zaťažovacích stavov na základnej staticky určitej sústave.

## 5.2.1 Stupeň statickej neurčitosti

Na výpočet vnútorných síl pomocou silovej metódy je potrebné najskôr určiť stupeň statickej neurčitosti, ktorý vyjadruje počet neznámych veličín a zároveň určí aj počet riešených rovníc.

$$n_s = a + 3r_u - 3 - p_k = 5 + 0 - 3 - 0 = 2$$

$a$  počet zložiek reakcií vonkajších väzieb [–]

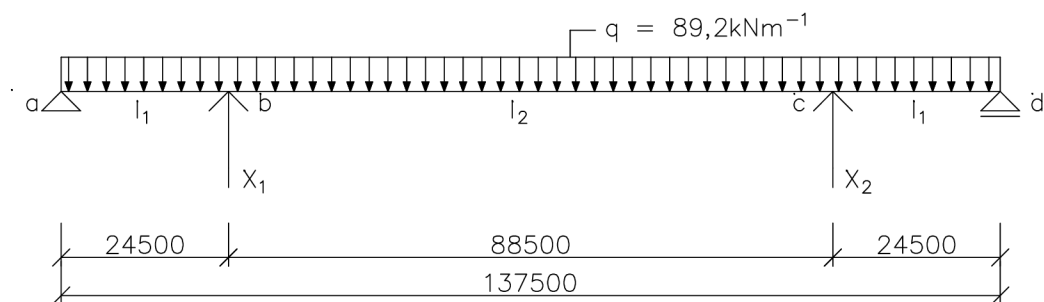
$r_u$  počet uzavretých rámov [–]

$p_k$  počet jednoduchých vnútorných kĺbov [–]

Spojité nosník je 2krát staticky neurčitý.

## 5.2.2 Základná staticky určitá sústava

Aby bolo možné prút počítať, treba vytvoriť základnú sústavu, ktorá bude staticky určitá. V tomto prípade je potrebné odobrať 2 stupne voľnosti a to tak, že na mieste vnútorných podpor, sú zvolené neznáme sily  $X_1$  a  $X_2$ . Tieto sily zároveň predstavujú výsledné reakcie v podporách. Vďaka symetrii konštrukcie a zaťaženia je možné predpokladať, že  $X_1 = X_2$ .



Obrázok 19: Schéma staticky určitej sústavy pre výpočet silovou metódou

### 5.2.3 Zat'azovacie stavy

Na základnej sústave je následne možné zostaviť deformačné podmienky od troch zat'azovacích stavov.

#### Nultý zat'azovací stav

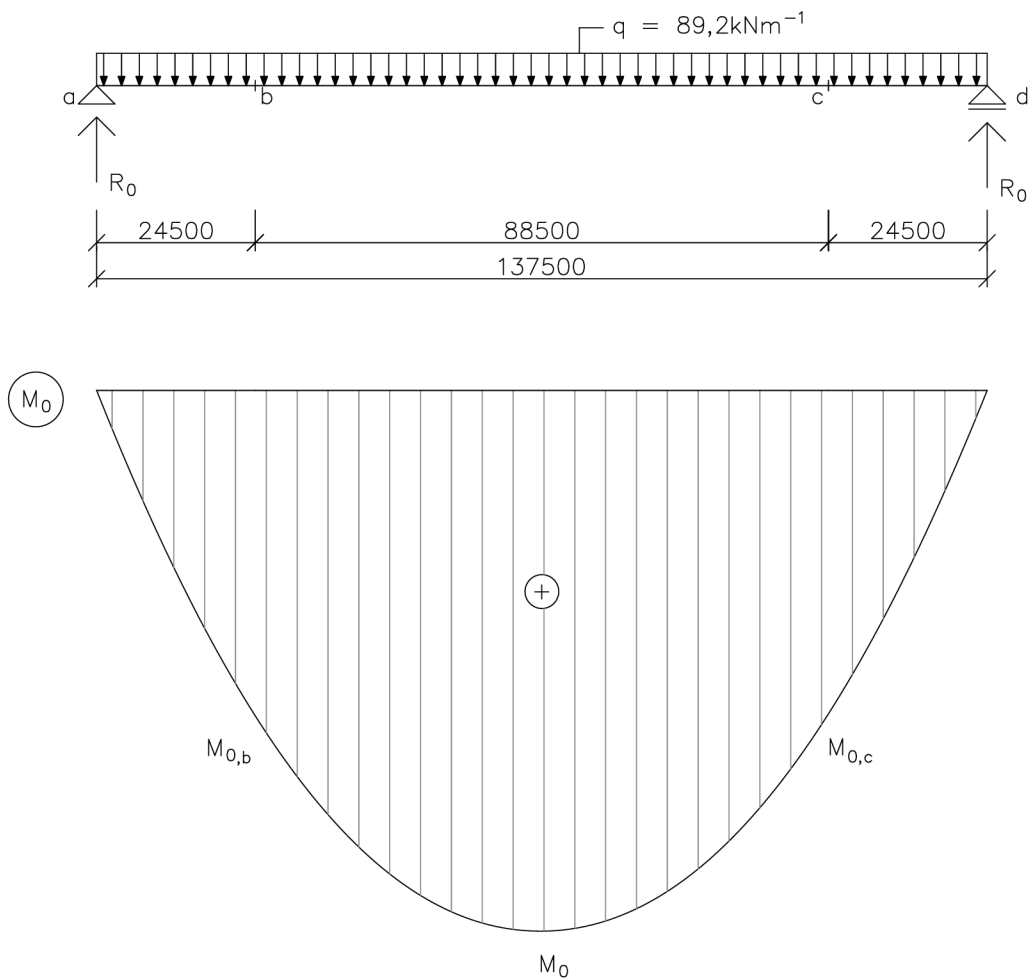
Momenty od pôsobiaceho zaťaženia (viď ďalšia strana).

$$R_0 = \frac{qL}{2} = \frac{89,2 * 137,5}{2} = 6\,132,500 \text{ kN}$$

$$M_{0,b} = M_{0,c} = R * L_1 - \frac{qL_1^2}{2}$$

$$M_{0,b} = 6132,5 * 24,5 - \frac{89,2 * 24,5^2}{2} = 123\,475,100 \text{ kNm}$$

$$M_0 = \frac{qL^2}{8} = \frac{89,2 * 137,5^2}{8} = 210\,804,688 \text{ kNm}$$



Obrázok 20: Priebek momentov od nultého zaťažovacieho stavu

### Prvý zaťažovací stav

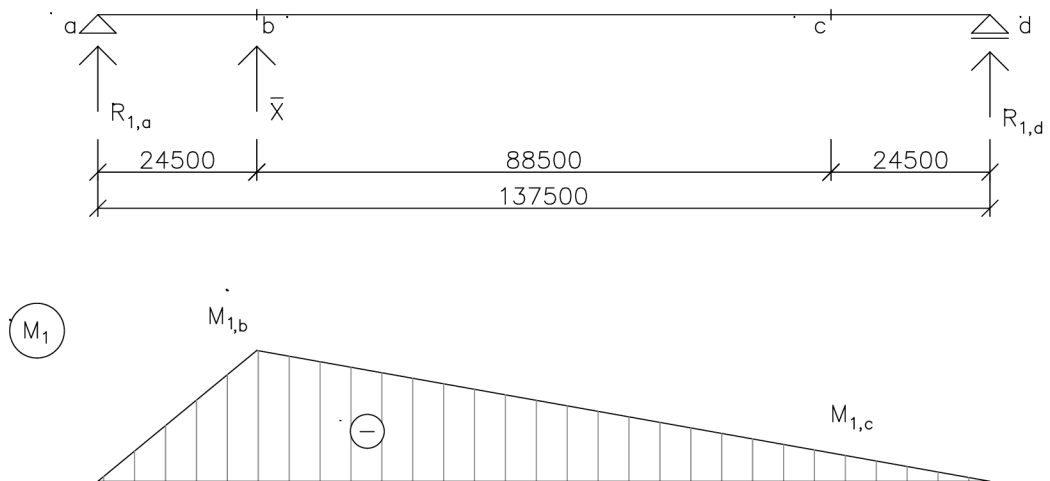
Momenty od jednotkovej  $\bar{X}$  sily v podpore b (viď ďalšia strana).

$$R_{1,a} = \frac{-\bar{X} * (L_1 + L_2)}{L} = \frac{-1 * (88,5 + 24,5)}{137,5} = -0,822 \text{ kN}$$

$$R_{1,d} = -\bar{X} - R_{1,a} = -1 + 0,822 = -0,178 \text{ kN}$$

$$M_{1,b} = R_{1,a} * L_1 = -0,822 * 24,5 = -20,139 \text{ kNm}$$

$$M_{1,c} = R_{1,d} * L_1 = -0,178 * 24,5 = -4,361 \text{ kNm}$$



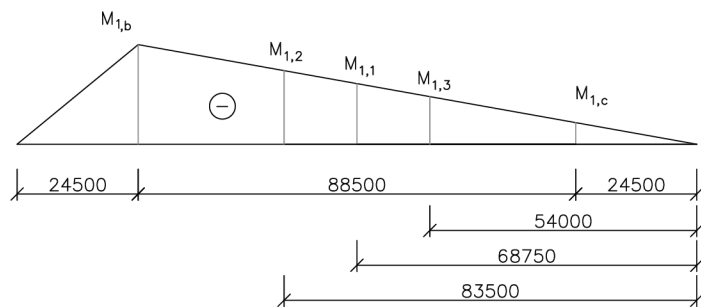
Obrázok 21: Priebeh momentov od prvého zaťažovacieho stavu

Doplňujúce momenty potrebné pre ďalšie výpočty pomocou Vereščaginovho pravidla:

$$M_{1,1} = -12,263 \text{ kN}$$

$$M_{1,2} = -14,888 \text{ kN}$$

$$M_{1,3} = -9,637 \text{ kN}$$



Obrázok 22: Doplnujúce momenty od prvého zaťažovacieho stavu

### Druhý zaťažovací stav

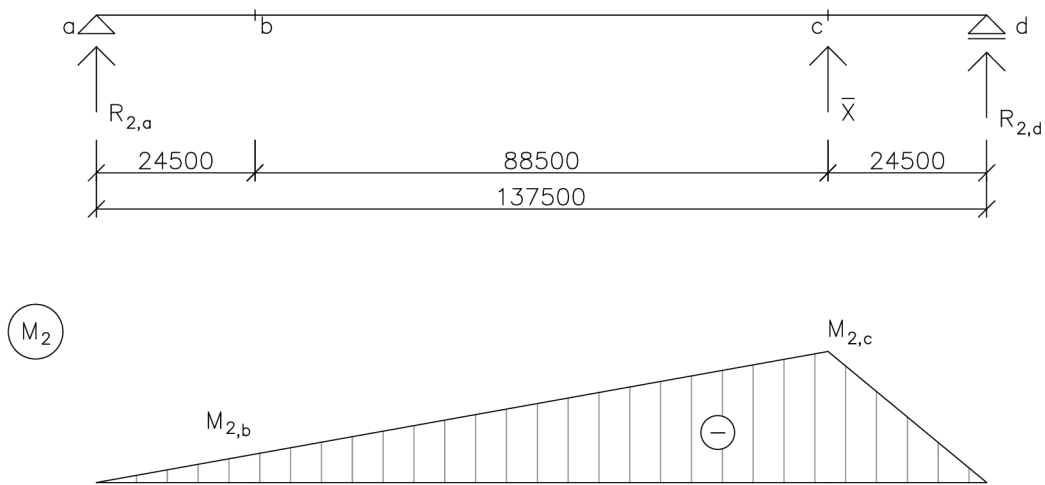
Momenty od jednotkovej  $\bar{X}$  sily v podpore c.

$$R_{2,d} = \frac{-\bar{X} * (L_1 + L_2)}{L} = \frac{-1 * (88,5 + 24,5)}{137,5} = -0,822 \text{ kN}$$

$$R_{2,a} = -\bar{X} - R_{1,a} = -1 + 0,822 = -0,178 \text{ kN}$$

$$M_{2,c} = R_{1,a} * L_1 = -0,822 * 24,5 = 20,139 \text{ kNm}$$

$$M_{2,b} = R_{1,d} * L_1 = -0,178 * 24,5 = -4,361 \text{ kNm}$$



Obrázok 23: Priebeh momentov od druhého zaťažovacieho stavu

## 5.2.4 Výpočet deformácií

Na výpočet jednotlivých deformácií na prúte je použitý zjednodušený Maxwell – Mohrov vzorec, ktorý má tvar:

$$\delta_i = \int_0^s \frac{M\bar{M}}{EI} ds$$

$S$	plocha $m^2$
$M$	moment od zaťaženia $[kNm]$
$\bar{M}$	moment od virtuálneho zaťaženia $[kNm]$
$E$	modul pružnosti v ťahu a tlaku $[kPa]$
$I$	moment zotrvačnosti $m^4$

Ostatné členy rovnice si dovoľíme zanedbať, pretože hodnoty normálových síl na prúte sú nulové. Posuvné sily, síce pôsobia, ale pôsobia na malom priereze,  $I \ll A$  a to

mnohonásobne, o viac ako 3 rády. Keďže sa tieto členy nachádzajú v menovateli, k integrálu posúvajúcich síl, ktoré sú podelené takouto plochou by mali len minimálny prírastok k integrálu od momentom. Preto ich vplyv zanedbáme. Teplotu neuvažujeme.

EI je konštanta, ktorú je možné vybrať pred integrál, potom takýto integrál súčinu dvoch funkcií budeme počítat Vereščaginovým pravidlom. To hovorí, že určitý integrál je možné vyčísliť súčinom dvoch hodnôt. Prvá hodnota je rovná ploche A, ktorú násobíme druhou hodnotou, ktorá je jej príslušnou poradnicou v ťažisku. V našom prípade hodnotou virtuálneho momentu  $\bar{M}$ . Pravidlo je možné použiť ak je funkcia poradnice monotónna, spojitá a lineárna. Funkcia zodpovedajúca ploche, nesmie mať jej plochu nulovú. Táto podmienka je splnená. Potom platí:

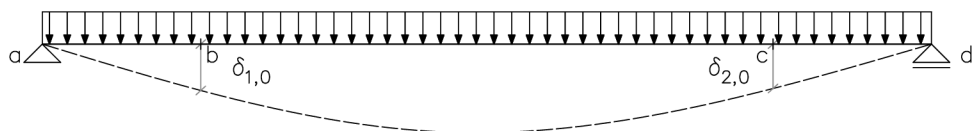
$$\delta_i = \int_0^s \frac{M\bar{M}}{EI} ds = \frac{1}{EI} [A_M * \bar{M}_T]$$

### Pretvorenie $\delta_{1,0}$ , $\delta_{2,0}$

Vyjadrujú hodnoty deformácie od spojitého zaťaženia. Vďaka symetrii konštrukcie sú si  $\delta_{1,0}$  a  $\delta_{2,0}$  rovné. Treba však zohľadniť zmenu prierezu a to tak, že integrál je rozdelený na dva. V prúte a-b a c-d použijeme moment zotrvačnosti  $I_1$ , na prúte b-c bude moment zotrvačnosti  $I_2$ .

Uplatníme Vereščaginovo pravidlo, kde násobíme plochu z nultého zaťažovacieho stavu spolu s príslušnou poradnicou v zaťažovacom stave jedna od jednotkovej sily v bode b.

$$\delta_{1,0} = \delta_{2,0}$$



Obrázok 24: Deformácie od spojitého zaťaženia

$$\delta_{1,0} = \frac{1}{EI_1} \left[ \frac{1}{2} M_{0,b} L_1 * \frac{2}{3} M_{1,b} + \frac{2}{3} M_{1,3} L_1 * \frac{1}{2} M_{1,b} + \frac{1}{2} M_{0,b} L_1 * \frac{2}{3} M_{1,c} + \frac{2}{3} M_{1,3} L_1 * \frac{1}{2} M_{1,c} \right] + \frac{1}{EI_2} \left[ M_{0,b} L_2 * M_{1,1} + \frac{2}{3} (M_0 - M_{0,b}) L_2 * M_{1,1} \right]$$

Po úprave dostaneme:

$$\delta_{1,0} = \frac{L_1}{3EI_1} [M_{0,b}(M_{1,b} + M_{1,c}) + M_{1,3}(M_{1,b} + M_{1,c})] + \frac{L_2}{EI_2} \left[ M_{0,b} * M_{1,1} + \frac{2}{3} (M_0 - M_{0,b}) * M_{1,1} \right]$$

Dosadíme:

$$\delta_{1,0} = \frac{24,5}{3EI_1} [123\,475,1(-20,139 - 4,361) + 6\,692,788(-20,139 - 4,361)] + \frac{88,5}{EI_2} \left[ 123\,475,1 * (-12,263) + \frac{2}{3} (210\,804,688 - 123\,475,1) * (-12,263) \right]$$

$$\delta_{1,0} = \frac{24,5 * (-3\,189\,113,256)}{3 * 9,706 * 10^{11} * 5,118 * 10^{-6}} + \frac{88,5 * (-2\,228\,123,643)}{9,706 * 10^{11} * 2,139 * 10^{-4}}$$

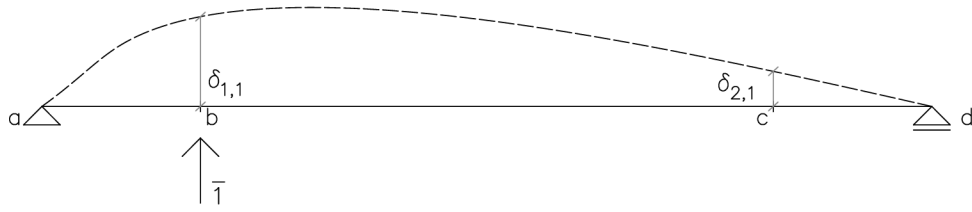
$$\delta_{1,0} = -5,243 - 0,950 = -6,193$$

### **Pretvorenie $\delta_{1,1}$ , $\delta_{2,1}$**

Vyjadrujú deformácie od sily  $X_1$ . Výsledné pretvorenia dostávame tak, že  $\delta_{1,1}$  počítame s plochou aj poradnicou zo zaťažovacieho stavu jedna. U  $\delta_{2,1}$  kombinuje plochu z druhého stavu a poradnicu z prvého stavu.

Opäť zohľadňujeme zmenu prierezu za pomoci momentov zotrvačnosti  $I_1$  a  $I_2$  na príslušných úsekoch na prúte.





Obrázok 25: Deformácie od jednotkovej sily v bode b

$$\delta_{1,1} = \frac{1}{EI_1} \left[ \frac{1}{2} M_{1,b} L_1 * \frac{2}{3} M_{1,b} + \frac{1}{2} M_{1,c} L_1 * \frac{2}{3} M_{1,c} \right] +$$

$$+ \frac{1}{EI_2} \left[ M_{1,c} L_2 * M_{1,1} + \frac{1}{2} (M_{1,b} - M_{1,c}) L_2 * M_{1,2} \right]$$

Po úprave dostaneme:

$$\delta_{1,1} = \frac{L_1}{3EI_1} [M_{1,b}^2 + M_{1,c}^2] + \frac{L_2}{EI_2} \left[ M_{1,c} * M_{1,1} + \frac{1}{2} (M_{1,b} - M_{1,c}) * M_{1,2} \right]$$

Dosadíme:

$$\delta_{1,1} = \frac{24,5}{3EI_1} [(-20,139)^2 + (-4,361)^2] +$$

$$+ \frac{88,5}{EI_2} \left[ -4,361 * (-12,263) + \frac{1}{2} (-20,139 + 4,361) * (-14,888) \right]$$

$$\delta_{1,1} = \frac{24,5 * (424,598)}{3 * 9,706 * 10^{11} * 5,118 * 10^{-6}} + \frac{88,5 * (170,930)}{9,706 * 10^{11} * 2,139 * 10^{-4}}$$

$$\delta_{1,1} = 6,980 * 10^{-4} + 7,286 * 10^{-5} = 7,709 * 10^{-4}$$

$$\delta_{2,1} = \frac{1}{EI_1} \left[ \frac{1}{2} M_{1,b} L_1 * \frac{2}{3} M_{1,c} + \frac{1}{2} M_{1,c} L_1 * \frac{2}{3} M_{1,b} \right] +$$

$$+ \frac{1}{EI_2} \left[ M_{1,c} L_2 * M_{1,1} + \frac{1}{2} (M_{1,b} - M_{1,c}) L_2 * M_{1,3} \right]$$

Po úprave dostaneme:

$$\delta_{2,1} = \frac{L_1}{3EI_1} [(M_{1,b} * M_{1,c})^2] + \frac{L_2}{EI_2} \left[ M_{1,c} * M_{1,1} + \frac{1}{2} (M_{1,b} - M_{1,c}) * M_{1,3} \right]$$

Dosadíme:

$$\begin{aligned} \delta_{2,1} &= \frac{24,5}{3EI_1} [2 * (20,139 * (-4,361))] + \\ &+ \frac{88,5}{EI_2} \left[ (-4,361 * (-12,263)) + \frac{1}{2} (-20,139 + 4,361) * (-9,637) \right] \\ \delta_{2,1} &= \frac{24,5 * (175,652)}{3 * 9,706 * 10^{11} * 5,118 * 10^{-6}} + \frac{88,5 * (129,505)}{9,706 * 10^{11} * 2,139 * 10^{-4}} \\ \delta_{2,1} &= 2,888 * 10^{-4} + 5,521 * 10^{-5} = 3,440 * 10^{-4} \end{aligned}$$

Celkovú deformáciu  $\delta_1$  od sily  $X_1$  je možné vyjadriť:

$$\delta_1 = \delta_{1,1} + \delta_{2,1} = 7,709 * 10^{-4} + 3,440 * 10^{-4} = 11,149 * 10^{-4}$$

### **Pretvorenie $\delta_{1,2}$ , $\delta_{2,2}$**

Na základe symetrie konštrukcie platí , že:

$$\delta_{1,1} = \delta_{2,2}$$

Zároveň platí Bettiho veta o vzájomnosti virtuálnych prác, ktorá hovorí o tom, že deformácia od virtuálnej sily v prvej sústave, má totožnú hodnotu ako deformácia od sily v druhej sústave, pôsobiacej v mieste deformácie prvej sústavy, a teda:

$$\delta_{2,1} = \delta_{1,2}$$

### 5.2.1 Hodnoty staticky neurčitých veličín

Konštrukcia modelu je dvakrát staticky neurčitá a dostávame preto dve kanonické rovnice s dvomi neznámymi  $X_1$  a  $X_2$ . Keďže sme zhodnotili, že na základe symetrie, budú mať tieto dve veličiny rovnakú hodnotu, stačí nám ich vyčísliť len z jednej z rovníc.

$$\delta_{1,0} + \delta_1 X_1 = 0$$

$$\delta_{2,0} + \delta_2 X_2 = 0$$

Z toho platí:

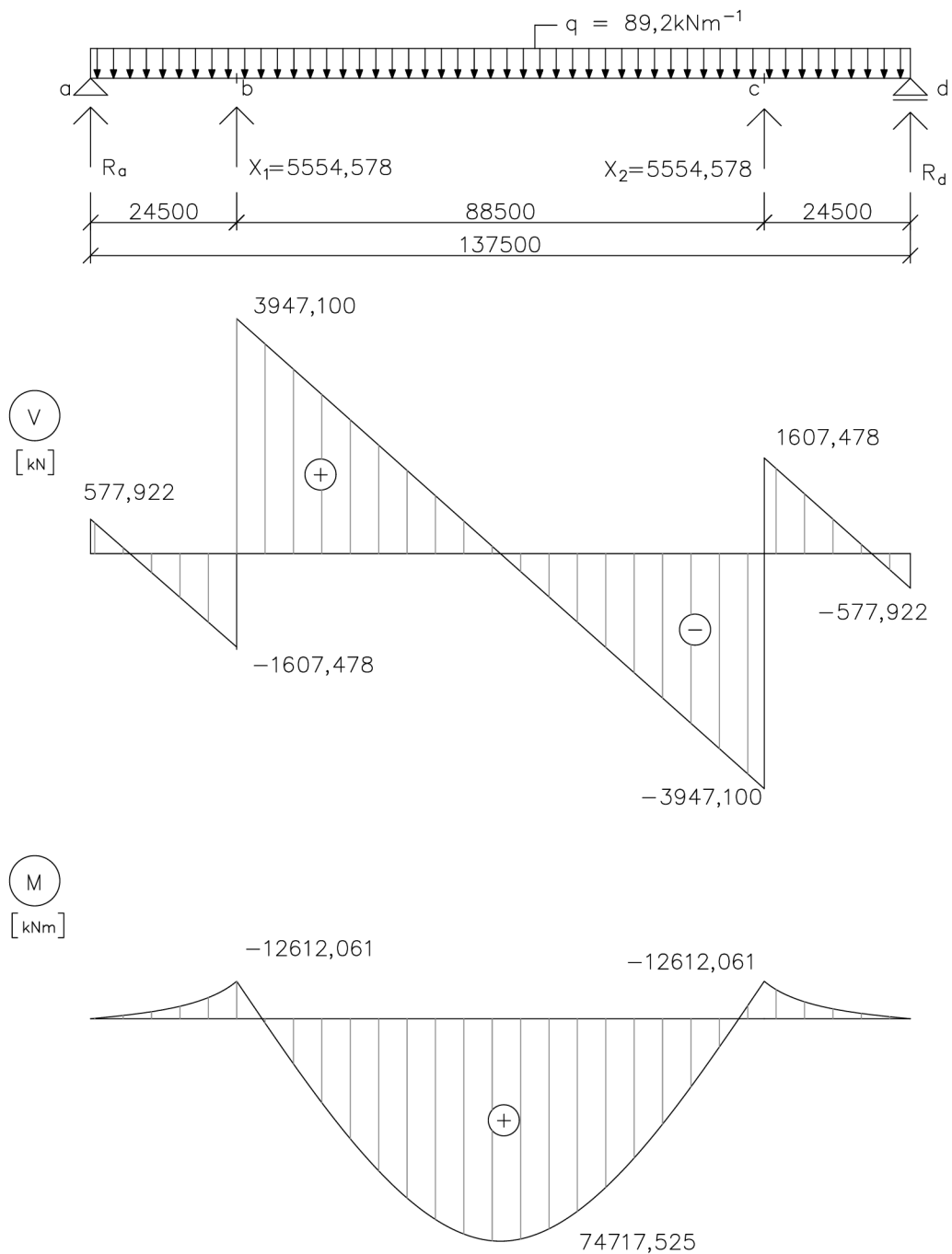
$$X_1 = \frac{\delta_{1,0}}{\delta_1} = \frac{-6,193}{11,149 * 10^{-4}} = -5\,554,578 \text{ kN}$$

### 5.2.2 Vnútorne sily

Teraz je možné vypočítať konštrukciu ako staticky určitú, zaťaženu spojitém zaťažením a dvomi osamelými silami.

Dopočítame reakcie  $R_a$  a  $R_d$ :

$$R_a = R_d = -X_1 + \frac{qL}{2} = 5\,554,578 + \frac{89,2 * 137,5}{2} = 577,922 \text{ kN}$$



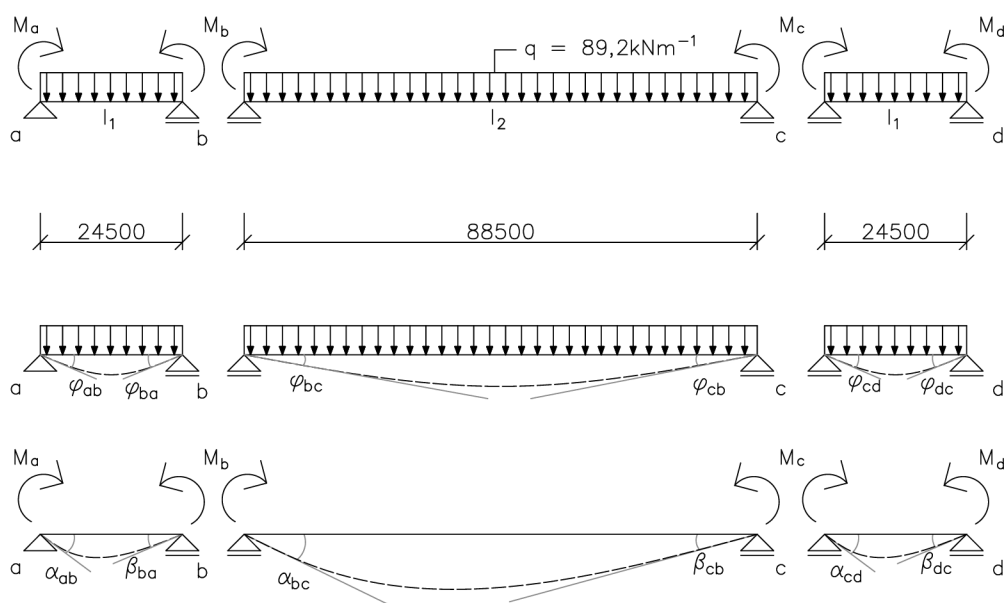
**Obrázok 26: Pribeh vnútorných síl získaných silovou metódou**

## 5.3 METODA TROJMOMENTOVÝCH ROVNÍC

Metóda trojmomentových rovníc je forma silovej metódy pre spojité nosníky, kde sa základná sústava tvorí vkladáním klbov do votknutí a vnútorných podpôr. Nad týmito klbmi potom vznikajú dvojice momentov, ktoré sú hľadanými staticky neurčitými veličinami. Základnú sústavu potom tvorí sled prostých nosníkov, ktorých počet určuje počet polí prútu. V podporách teda vznikajú neznáme ohybové momenty spôsobujúce deformácie, ktoré je možné vypočítať z rovností pootočení vo vložených klboch. V každej zostavenej rovnici sú maximálne tri neznáme momenty. Z toho plynie aj názov tejto metódy.

### 5.3.1 Základná sústava

Konštrukcia je rozdelená na tri staticky určité nosníky na ktoré pôsobí rovnomerné spojité zaťaženie v celej dĺžke a ohybové momenty v podporách. Takto rozdelenú základnú sústavu vidíme na obrázku 20.<sup>2</sup> Od týchto namáhání vznikajú deformácie, definované ich kladnými uhlami od prútu a dotýčnice k ohybovej čiare.



Obrázok 27: Schéma základnej sústavy pre metódu trojmomentových rovníc, [3]

<sup>2</sup> Obrázok je inšpirovaný schémou z publikácie J.Kadlčáka a J. Kytýra: Statika stavebných konštrukcií II., na strane 116.

Momenty v krajných podporách musia byť nulové, preto:

$$M_a = 0 \text{ kNm}$$

$$M_d = 0 \text{ kNm}$$

Určujeme uhly v podporách s neznámymi ohybovými momentami. V tabuľkových hodnotách (viď príloha 1) sú zvolené vzorce pre prúty s rovnomerným spojitým zaťažením na celej ich dĺžke.

$$\alpha^q_{ba} = \alpha^q_{cd} = \frac{1}{3} \frac{L_1}{EI_1} = \frac{24,5}{3 * 9,706 * 10^{11} * 5,118 * 10^{-6}} = 1,644 * 10^{-6}$$

$$\alpha^q_{bc} = \alpha^q_{cb} = \frac{1}{3} \frac{L_2}{EI_2} = \frac{88,5}{3 * 9,706 * 10^{11} * 2,139 * 10^{-4}} = 1,421 * 10^{-7}$$

$$\beta^q_{bc} = \beta^q_{cb} = \frac{1}{6} \frac{L_2}{EI_2} = \frac{88,5}{6 * 9,706 * 10^{11} * 2,139 * 10^{-4}} = 7,105 * 10^{-8}$$

$$\varphi^q_{ba} = \varphi^q_{cd} = \frac{1}{24} \frac{qL_1^3}{EI_1} = \frac{89,2 * 24,5^3}{24 * 9,706 * 10^{11} * 5,118 * 10^{-6}} = 11,003 * 10^{-3}$$

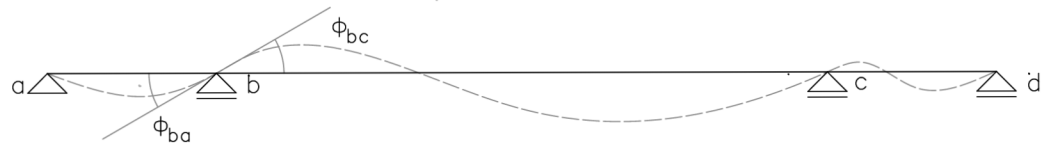
$$\varphi^q_{bc} = \varphi^q_{cb} = \frac{1}{24} \frac{qL_2^3}{EI_2} = \frac{89,2 * 88,5^3}{24 * 9,706 * 10^{11} * 2,139 * 10^{-4}} = 12,409 * 10^{-3}$$

$\varphi_{xy}$  uhol medzi prútom a dotyčnicou ohybovej čiary od zaťaženia

$\alpha_{xy}$  uhol medzi prútom a dotyčnicou ohybovej čiary od momentov v mieste podpory, kde daný moment pôsobí

$\beta_{xy}$  uhol medzi prútom a dotyčnicou ohybovej čiary od momentov v mieste druhej podpory, kde daný moment nepôsobí

### 5.3.2 Odvodenie trojmomentovej rovnice



Obrázok 28: Schéma pre všeobecnú deformáciu v podpore b

Z obrázku všeobecnej deformácie je možné odvodiť, že akýkoľvek uhol od dotyčnice v jednej podpore má na každú stranu rovnakú číselnú hodnotu, len opačného znamienka. Teda:

$$\Phi_{ba} = -\Phi_{bc}$$

Potom pre podporu b platí:

$$\Phi_{ba} + \Phi_{bc} = 0$$

$$\Phi_{ba} = M_b \alpha_{ba} + M_a \beta_{ba} + \varphi_{ba}$$

$$\Phi_{bc} = M_b \alpha_{bc} + M_c \beta_{bc} + \varphi_{bc}$$

Po dosadení:

$$M_b(\alpha_{ba} + \alpha_{bc}) + M_a \beta_{ba} + M_c \beta_{bc} + \varphi_{ba} + \varphi_{bc} = 0$$

$$M_b(1,644 * 10^{-6} + 1,421 * 10^{-7}) + 0 + M_c * 7,105 * 10^{-8} + 11,003 * 10^{-3} + 12,409 * 10^{-3} = 0$$

Rovnako platí aj pre podporu c:

$$\Phi_{cb} + \Phi_{cd} = 0$$

$$\Phi_{cb} = M_c \alpha_{cb} + M_b \beta_{cb} + \varphi_{cb}$$

$$\Phi_{cd} = M_c \alpha_{cd} + M_d \beta_{cd} + \varphi_{cd}$$

Po dosadení:

$$M_c(\alpha_{cb} + \alpha_{cd}) + M_b\beta_{cb} + M_d\beta_{cd} + \varphi_{cb} + \varphi_{cd} = 0$$

$$M_c(1,421 * 10^{-7} + 1,644 * 10^{-6}) + M_b * 7,105 * 10^{-8} + 0 + 12,409 * 10^{-3} + 11,003 * 10^{-3} = 0$$

Z dvoch rovníc o dvoch neznámych dostaneme:

$$M_b = -12\,606,413 \text{ kNm}$$

$$M_c = -12\,606,413 \text{ kNm}$$

### 5.3.3 Vnútorne sily

Dopočítame maximálny moment v strede prútu, posúvajúce sily a reakcie.

#### Moment na prúte b-c

Moment uprostred prostého nosníku zistíme sčítaním maximálneho momentu od zaťaženia a strednou hodnotou momentu na prúte základnej sústavy. V našom prípade je tento moment zároveň momentom maximálnym.

$$M_{max} = M^q + \frac{(-M_b - M_c)}{2} = 87\,329,588 - 12\,606,413 = 74\,723,175 \text{ kNm}$$

Kde moment od spojitého zaťaženia

$$M^q = \frac{qL_2^2}{8} = \frac{89,2 * 88,5^2}{8} = 87\,329,588 \text{ kNm}$$



### Posúvajúce sily

$$V_{a,b} = R_{a,b}^q + \frac{M_b - M_a}{L_1} = 1092,7 + \frac{-12\,606,413 - 0}{24,5} = 578,153 \text{ kN}$$

$$V_{b,a} = V_{a,b} - qL_1 = 578,153 - 89,2 * 24,5 = -1\,607,247 \text{ kN}$$

$$V_{b,c} = R_{b,c}^q + \frac{M_c - M_b}{L_2} = 3\,947,1 + \frac{12\,606,413 - 12\,606,413}{88,5} = 3\,947,100 \text{ kN}$$

$$V_{c,b} = V_{b,c} - qL_2 = 3\,947,100 - 89,2 * 88,5 = -3\,947,100 \text{ kN}$$

$$V_{c,d} = R_{c,d}^q + \frac{M_d - M_c}{L_1} = 1\,092,7 + \frac{0 + 12\,606,413}{24,5} = 1\,607,247 \text{ kN}$$

$$V_{d,c} = V_{c,d} - qL_1 = 1\,607,247 - 89,2 * 24,5 = -578,153 \text{ kN}$$

Kde reakcie od spojitého zaťaženia

$$R_{a,b}^q = R_{c,d}^q = \frac{qL_1}{2} = \frac{89,2 * 24,5}{2} = 1\,092,700 \text{ kN}$$

$$R_{b,c}^q = \frac{qL_2}{2} = \frac{89,2 * 88,5}{2} = 3\,947,100 \text{ kN}$$

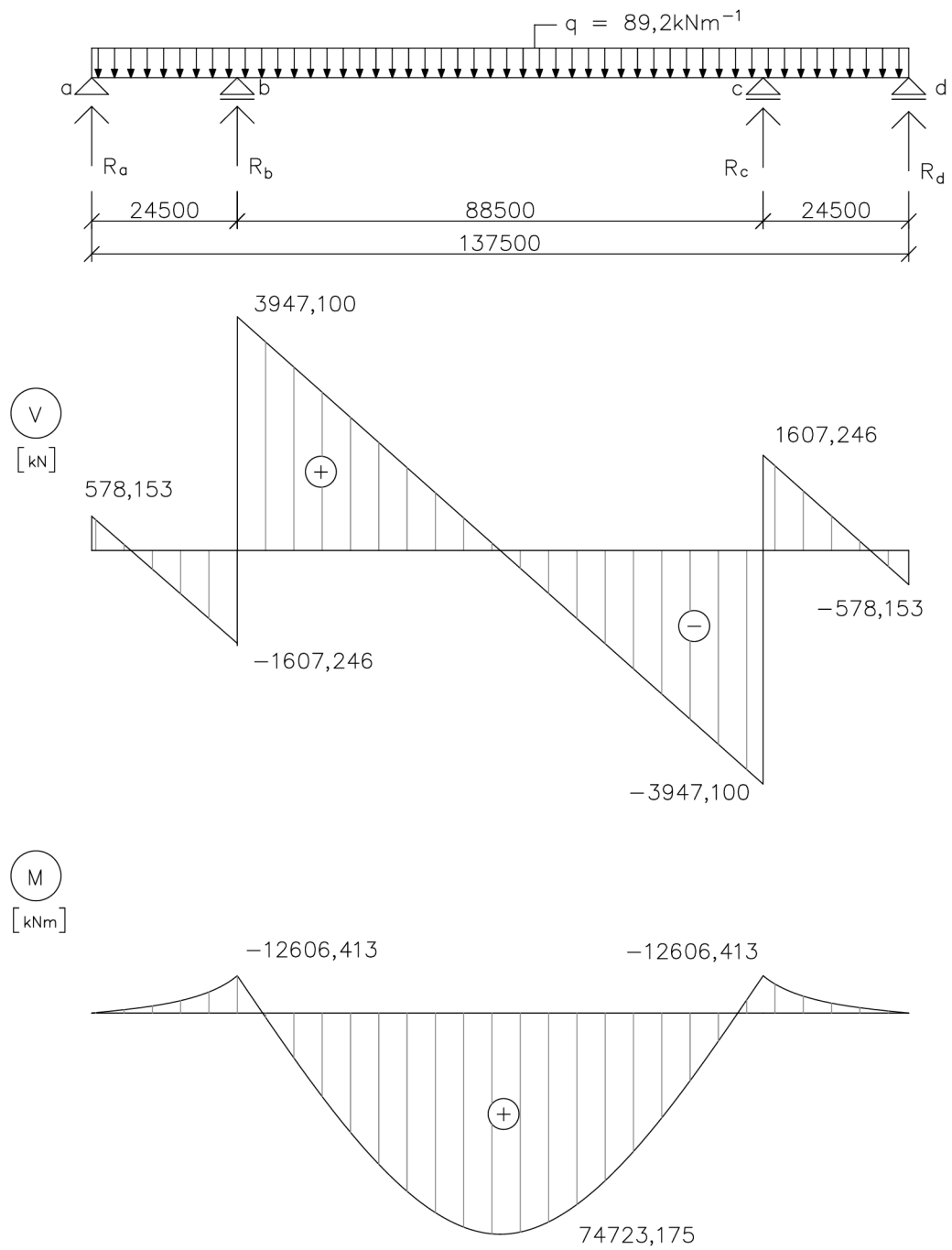
### Reakcie

$$R_a = V_{a,b} = 578,153 \text{ kN}$$

$$R_b = -V_{b,a} + V_{b,c} = 1\,607,247 + 3\,947,1 = 5\,554,347 \text{ kN}$$

$$R_c = -V_{c,b} + V_{c,d} = 3\,947,1 + 1\,607,247 = 5\,554,347 \text{ kN}$$

$$R_d = -V_{d,c} = 578,153 \text{ kN}$$



**Obrázok 29: Priebek vnútorných síl získaných metódou trojmomentových rovníc**

## 5.4 DEFORMAČNÁ METÓDA

Na rozdiel od silovej, deformačná metóda volí za neznáme parametre neurčité deformačné veličiny ako je posun a pootočené. Konštrukciu delíme na prúty a styčníky. Určujeme deformácie pôsobiace na styčníky. Tieto neznáme veličiny potom vyjadrujeme z podmienok rovnováhy od zaťaženia a koncových síl.

V tomto prípade sa vektor globálnych zložiek rovná vektoru lokálnych zložiek. Celý prút leží v globálnom súradnicovom systéme a nie je od neho pootočený.

Pre prehľadnosť je zvolená kondenzovaná forma zápisu matic a vektorov.

### 5.4.1 Stupeň pretvárnej neurčitosti

Výpočtový model volíme tak, aby stupeň pretvárnej neurčitosti bol čo najmenší, pretože ten nám určuje počet neznámych deformácií z ktorých zostavujeme rovnice. Konštrukciu rozdelíme na tri prúty. Stredný prút pripojený z oboch strán monoliticky. Na krajných prútoch je vhodné voliť z vonkajších strán kĺbové pripojenie. Vďaka tomu nebudú v týchto miestach prút styčníkom otáčať. Keďže na prút pôsobí len zvislé zaťaženie, posunutie v horizontálnom smere bude na celej dĺžke nulové. Posuny vo vertikálnom smere v miestach podpôr sú tak isto nulové a sú teda známymi hodnotami.



Obrázok 30: Výpočtový model prútu pre deformačnú metódu

$$SPN = 2$$

S takto zvoleným modelom máme len dve neznáme deformácie a to pootočené v druhom a treťom styčníku. Značíme  $\varphi_2$  a  $\varphi_3$ .

## 5.4.2 Primárny stav

### Vektor primárnych globálnych zložiek koncových síl $\{\bar{R}\}$

Je to stav na prúte, ktorý zohľadňuje pôsobiace zaťaženie. Určujeme ho pre každý prút zvlášť. Jeho hodnoty určujeme z tabuľky v prílohe 2, na základe jeho koncových pripojení.

$$\{\bar{R}_{xy}\} = \{\bar{X}_{xy}; \bar{Z}_{xy}; \bar{M}_{xy}; \bar{X}_{yx}; \bar{Z}_{yx}; \bar{M}_{yx}\}^T$$

$$\{\bar{R}_{12}\} = \{\bar{R}_{12}^*\} = \left\{ \frac{nL_1}{2}; \frac{-3qL_1}{8}; 0; \frac{nL_1}{2}; \frac{-5qL_1}{8}; \frac{-qL_1^2}{8} \right\}^T$$

$$\{\bar{R}_{12}\} = \{0; -819,525; 0; 0; -1\,365,875; -6\,692,788\}^T$$

$$\{\bar{R}_{23}\} = \{\bar{R}_{23}^*\} = \left\{ \frac{-nL_2}{2}; \frac{-qL_2}{2}; \frac{qL_2^2}{12}; \frac{-nL_2}{2}; \frac{-qL_2}{2}; \frac{-qL_2^2}{12} \right\}^T$$

$$\{\bar{R}_{23}\} = \{0; -3\,947,1; 58\,219,725; 0; -3\,947,1; -58\,219,725\}^T$$

$$\{\bar{R}_{34}\} = \{\bar{R}_{34}^*\} = \left\{ \frac{-nL_1}{2}; \frac{-5qL_1}{8}; \frac{qL_1^2}{8}; \frac{-nL_1}{2}; \frac{-3qL_1}{8}; 0 \right\}^T$$

$$\{\bar{R}_{34}\} = \{0; -1\,365,875; 6\,692,788; 0; -819,525; 0\}^T$$

Kde spojité osové zaťaženie  $n=0$ .

Zvýraznené hodnoty používame na určenie globálnych vektorov.

### Vektor uzlového zaťaženia $\{S\}$

Je to vektor, ktorý započítava sily pôsobiace priamo v uzloch prútu. Keďže na tomto prúte sa nevyskytuje žiadna takáto sila, jeho hodnoty sú nulové.

$$\{S_{12}\} = \{S_{23}\} = \{S_{34}\} = \{0; 0; 0; 0; 0; 0\}^T$$

### 5.4.3 Sekundárny stav

Je to stav na prúte, na ktorý nepôsobí žiadne zaťaženie, ale zohľadňuje deformácie na koncových bodoch. Pre každý prút je potrebné nájsť jeho maticu tuhosti a vektor parametrov deformácie, z ktorých je následne tieto deformácie možné vyčísliť.

#### Globálna matica tuhosti k

Hodnoty matice určujeme z tabuľky v prílohe 3, pre každý prút na základe koncových pripojení.

#### Prút 1-2

$$[k_{12}] = [k_{12}^*] = \begin{bmatrix} \frac{+EA_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{-EA_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{+3EI_1}{L_1^3} & 0 & 0 & \frac{-3EI_1}{L_1^3} & \frac{-3EI_1}{L_1^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{+EA_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-3EI_1}{L_1^3} & 0 & 0 & \frac{+3EI_1}{L_1^3} & \frac{+3EI_1}{L_1^2} \\ 0 & \frac{-3EI_1}{L_1^2} & 0 & 0 & \frac{+3EI_1}{L_1^2} & \frac{+3EI_1}{L_1} \end{bmatrix} \begin{matrix} \bar{X}_1 \\ \bar{Z}_1 \\ \bar{M}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \bar{Z}_2 \\ \bar{M}_2 \end{matrix}$$

$$[k_{12}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -24\,827,309 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 24\,827,309 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 608\,269,078 \end{bmatrix} * 10^3$$

**Prút 2-3**

$$[k_{23}] = [k_{23}^*] = \begin{bmatrix} \frac{+EA_2}{L_2} & 0 & 0 & \frac{-EA_2}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{+12EI_2}{L_2^3} & \frac{-6EI_2}{L_2^2} & 0 & \frac{-12EI_2}{L_2^3} & \frac{-6EI_2}{L_2^2} \\ 0 & \frac{-6EI_2}{L_2^2} & \frac{+4EI_2}{L_2} & 0 & \frac{+6EI_2}{L_2^2} & \frac{+2EI_2}{L_2} \\ \frac{-EA_2}{L_2} & 0 & 0 & \frac{+EA_2}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{+12EI_2}{L_2^3} & \frac{+6EI_2}{L_2^2} & 0 & \frac{+12EI_2}{L_2^3} & \frac{+6EI_2}{L_2^2} \\ 0 & \frac{-6EI_2}{L_2^2} & \frac{+2EI_2}{L_2} & 0 & \frac{+6EI_2}{L_2^2} & \frac{+4EI_2}{L_2} \end{bmatrix} \begin{matrix} \bar{X}_2 \\ \bar{Z}_2 \\ \bar{M}_2 \\ \bar{X}_3 \\ \bar{Z}_3 \\ \bar{M}_3 \end{matrix}$$

$$[k_{12}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & -159\,043,447 & \dots & \dots & -159\,043,447 \\ \dots & \dots & 9\,383\,563,39 & \dots & \dots & 4\,691\,781,695 \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 159\,043,447 & \dots & \dots & 159\,043,447 \\ \dots & \dots & 4\,691\,781,695 & \dots & \dots & 9\,383\,563,390 \end{bmatrix} * 10^3$$

**Prút 3-4**

$$[k_{34}] = [k_{34}^*] = \begin{bmatrix} \frac{+EA_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{-EA_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{+3EI_1}{L_1^3} & \frac{-3EI_1}{L_1^2} & 0 & \frac{-3EI_1}{L_1^3} & 0 \\ 0 & \frac{-3EI_1}{L_1^2} & \frac{+3EI_1}{L_1} & 0 & \frac{+3EI_1}{L_1^2} & 0 \\ \frac{-EA_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{+EA_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-3EI_1}{L_1^3} & \frac{+3EI_1}{L_1^2} & 0 & \frac{+3EI_1}{L_1^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \bar{X}_3 \\ \bar{Z}_3 \\ \bar{M}_3 \\ \bar{X}_4 \\ \bar{Z}_4 \\ \bar{M}_4 \end{matrix}$$

$$[k_{34}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -24\,827,309 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 608\,269,078 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 24\,827,309 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} * 10^3$$

Zvýraznené hodnoty používame na určenie globálnej matice tuhosti.

### **Matica tuhosti celej sústavy K**

$$[K] = \begin{bmatrix} 9\,991\,832,699 & 4\,691\,781,695 \\ 4\,691\,781,695 & 9\,991\,832,699 \end{bmatrix} * 10^3$$

### **Globálny vektor parametrov deformácie r**

Určuje deformáciu a jej pozíciu, ktorá vzniká na danom prúte.

$$\{r_{12}\} = \{0; 0; 0; 0; 0; \varphi_2\}^T$$

$$\{r_{23}\} = \{0; 0; \varphi_2; 0; 0; \varphi_3\}^T$$

$$\{r_{34}\} = \{0; 0; \varphi_3; 0; 0; 0\}^T$$

### **Deformácie**

Platí, že:

$$[K] * \{r\} = \{F\}$$

$$[K] * \{r\} = \{S\} - \{\bar{R}\}$$

Dosadíme:

$$\begin{bmatrix} 9\,991\,832,699 & 4\,691\,781,695 \\ 4\,691\,781,695 & 9\,991\,832,699 \end{bmatrix} * 10^3 * \begin{Bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 51\,526,937 \\ -51\,526,937 \end{Bmatrix}$$

Dostaneme 2 rovnice o dvoch neznámých a určíme hodnoty pootočení  $\varphi_2$  a  $\varphi_3$ :

$$9\,991\,832,699\varphi_2 + 4\,691\,781,695\varphi_3 = -51\,526,937$$

$$4\,691\,781,695\varphi_2 + 9\,991\,832,699\varphi_3 = 51\,526,937$$

$$\varphi_2 = -9,722 * 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\varphi_3 = 9,722 * 10^{-3} \text{ rad}$$

#### 5.4.4 Koncové sily

Výsledné koncové sily získame superpozíciou primárnych a sekundárnych účinkov, použijeme preto vzťah:

$$\{R\} = \{\bar{R}\} + \{\hat{R}\}$$

$$\{R\} = \{\bar{R}\} + [k] * \{r\}$$

#### Prút 1-2

$$\{R_{12}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -819,525 \\ 0 \\ 0 \\ -1\,365,875 \\ -6\,692,788 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -24\,827,309 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 608\,269,078 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 608\,269,078 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} * 10^3 *$$

$$* \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -9,722 \end{Bmatrix} * 10^{-3} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -578,153 \\ 0 \\ 0 \\ -1\,607,246 \\ -12\,606,380 \end{Bmatrix}$$



**Prút 2-3**

$$\{R_{23}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -3\,947,10 \\ 58\,219,725 \\ 0 \\ -3\,947,10 \\ -58\,219,725 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & -159\,043,447 & \dots & \dots & -159\,043,447 \\ \dots & \dots & 9\,383\,563,39 & \dots & \dots & 4\,691\,781,695 \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 159\,043,447 & \dots & \dots & 159\,043,447 \\ \dots & \dots & 4\,691\,781,695 & \dots & \dots & 9\,383\,563,390 \end{bmatrix} *$$

$$* 10^3 * \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -9,722 \\ 0 \\ 0 \\ 9,722 \end{Bmatrix} * 10^{-3} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -3\,947,10 \\ 12\,606,223 \\ 0 \\ -3\,947,10 \\ -12\,606,223 \end{Bmatrix}$$

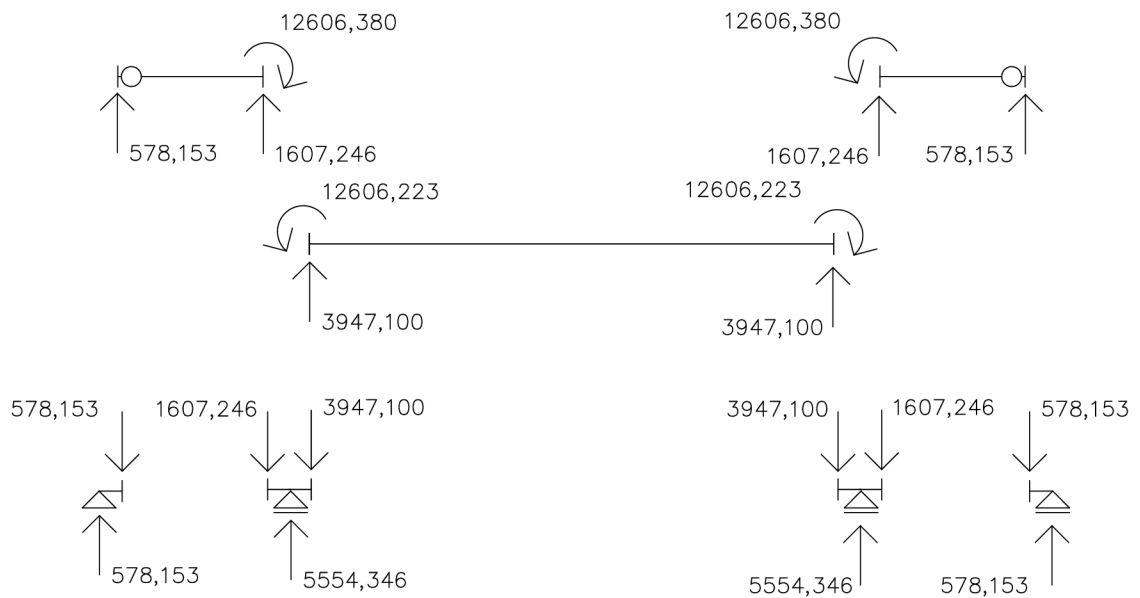
**Prút 3-4**

$$\{R_{34}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -1\,365,875 \\ 6\,692,788 \\ 0 \\ -819,525 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -24\,827,309 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 608\,269,078 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 24\,827,309 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} * 10^3 *$$

$$* \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9,722 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} * 10^{-3} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -1\,607,246 \\ 12\,606,380 \\ 0 \\ -578,153 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

## Reakcie

Výsledné reakcie môžeme získať pomocou nasledujúcej schémy na obrázku 23.<sup>3</sup>



Obrázok 31: Reakcie deformačnej metódy, [4]

$$R_1 = R_4 = 578,153 \text{ kN}$$

$$R_2 = R_3 = 5\,554,346 \text{ kN}$$

<sup>3</sup>Obrázok je inšpirovaný schémou z publikácie J. Kytýra, R. Gratza a spol.: Statika II. Řešené příklady, na strane 45.



## 6 ZHODNOTENIE

### 6.1 POROVNANIE VÝSLEDKOV

V tejto práci bol počítaný priebeh vnútorných síl na konštrukcii lávky pre peších a cyklistov od najnepriaznivejšej kombinácie pôsobiacich zaťažení. Boli vykonané štyri postupy výpočtu, ktoré sú uvedené v tabuľke 1. Ako prvý je výpočet programom SCIA Engineer, z ktorého sme následne odčítali hodnoty priebehov. Ďalej bolo počítané ručne na zjednodušenom prútvom modeli a to pomocou metódy silovej, metódy trojmomentových rovníc a metódou deformačnou.

Pre symetričnosť konštrukcie a zároveň aj symetrické zaťaženie, sú v tabuľke 1 uvedené hodnoty len ľavej polovice lávky (prútu). Vyčíslené sú reakcie, posúvajúce sily v podporách, a maximálne ohybové momenty.

**Tabuľka 1: Výsledky výpočtov**

	Model lávky v programe SCIA Engineer		Silová metóda	Metóda trojmomentových rovníc	Deformačná metóda
$R_a$ [kN]	305,61	298,52	577,92	578,15	578,15
$R_b$ [kN]	2735,01	2737,10	5554,58	5554,35	5554,35
$\Sigma R$ [kN]	6076,24		6132,50	6132,50	6132,50
$V_a$ [kN]	604,13		577,92	578,15	578,15
$V_{b,L}$ [kN]	-1496,40		-1607,48	-1607,25	-1607,25
$V_{b,P}$ [kN]	3975,23		3947,10	3947,10	3947,10
$M_b$ [kNm]	-10610,30		-12612,06	-12606,41	-12606,41
$M_{max}$ [kNm]	76926,55		74717,53	74723,18	74723,14

$R_a$  reakcia v podpore/podporách v mieste a [kN]

$R_b$  reakcia v podpore/podporách v mieste b [kN]

$V_a$  posúvajúca sila v podpore/podporách v mieste a [kN]

$V_{b,L}$  posúvajúca sila v podpore/podporách v mieste b, zľava [kN]

$V_{b,P}$  posúvajúca sila v podpore/podporách v mieste b, sprava [kN]

$M_b$  ohybový moment v podpore/podporách v mieste b [kNm]

$M_{max}$  maximálny ohybový moment [kNm]

Z výsledkov je možné vidieť, že medzi výpočtami programom a ručnými výpočtami vznikajú značné odchýlky. Od reakcií kde je chyba okolo 5 % až po momenty, kde chyba narastá na 15 %-ný rozdiel. To je spôsobené hlavne tým, že zjednodušený model počíta s jednoduchým spojitým nosníkom, naopak na priestorovej konštrukcii má veľký vplyv oblúčová časť konštrukcie. Stredná časť má tak nekonštantný prierez a do výpočtov vstupuje premenná tuhosť.

## 6.1 POROVNANIE METÓD

Na výpočet zjednodušeného prútového modelu, ktorý pôsobí ako staticky neurčitý nosník boli zvolené tri metódy výpočtu. Silová metóda a jej zvláštna forma, metóda trojmomentových rovníc, a na záver bolo počítané metódou deformačnou. Tieto dva postupy sa líšia hlavne tým, že v silovej metóde sú neznámymi veličinami sily, prípadne momenty a naopak v deformačnej sú to neznáme deformácie, ako pootočená a posuny. Odtiaľ plynie aj ich názov.

Vo všeobecnosti platí, že stupeň statickej a pretvárnej neurčitosti určuje počet rovníc, ktoré je treba zostaviť vo výpočte. To znamená, že na základe tejto informácie, sa vieme rozhodnúť, ktorá metóda bude pre nás výhodnejšia. Pre náš prútový model však boli všetky postupy rovnako výhodné, pretože v oboch prípadoch sme hľadali len dve neznáme.

Čo sa týka presnosti výpočtov, z výsledkov vidíme že obe metódy sú rovnako spoľahlivé. Najväčší rozdiel výsledkov bol 0,04 %. To je chyba, ktorá mohla vzniknúť zaokrúhľovaním.

## 7 ZÁVER

V tejto bakalárskej práci bola vykonaná statická analýza vybranej konštrukcie. Zvolená bola konštrukcia lávky cez rieku Morava. V programe SCIA Engineer bol podľa dostupných informácií vytvorený priestorový model inšpirovaný touto mostovou konštrukciou, tak aby čo najlepšie zodpovedal skutočnosti.

Ďalej bolo spočítané pôsobiace zaťaženie podľa platných noriem. Zaťaženie bolo rozdelené do 11 zaťažovacích stavov. Uvažovali sme so stálym zaťažením, kde bola vlastná tiaž konštrukcie a ďalšie stále zaťaženie od betónovej dosky uloženej na mostovkových nosníkoch. Medzi premenné zaťaženie bolo počítané s chodcami, vetrom a so zaťažením od mimoriadneho výskytu vozidla. Kombinácie od týchto všetkých stavov, boli vypočítané softvérom. Z programu bolo následne možné odčítať priebehy vnútorných síl.

Vo výpočtovom programe sme takýto model posúdili na medzné stavy a zistili sme že konštrukcia nevyhovuje na medzný stav únosnosti.

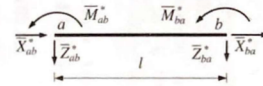
Postupovalo sa ručnými výpočtami, ktoré pomohli overiť, či bola práca v programe SCIA Engineer správna. Zvolený bol vhodný zjednodušený model ako staticky neurčitý nosník s rôznymi prierezmi, tak aby čo najlepšie zodpovedal modelu priestorovému. Na ňom potom boli aplikované tri metódy, ktorými je možné počítať staticky neurčité konštrukcie. Silová metóda, a špeciálna silová metóda pre spojité nosníky, metóda trojmomentových rovníc, a metóda deformačná. Pomocou nich bolo možné vyčísliť ich reakcie, posúvajúce sily a ohybové momenty.

Nakoniec bolo možné všetky sily a momenty porovnať a vyčísliť odchýlku výpočtov. Z porovnaní sme zistili, že sa výsledky líšia. To je však zapríčinené nerovnomernou tuhosťou oblúkovej časti na priestorovom modeli lávky, ktorá z praktického hľadiska nebola použitá v zjednodušenej variante.

# 8 PRÍLOHY

## Príloha 1

Tabuľka 11.2. Primárni vektory koncových síl prutu konštantného prierezu  $\bar{\mathbf{R}}_{ab}^* = \{ \bar{X}_{ab}^*, \bar{Z}_{ab}^*, \bar{M}_{ab}^*, \bar{X}_{ba}^*, \bar{Z}_{ba}^*, \bar{M}_{ba}^* \}^T$



(a) Plné spojité zatížení	(c) Osamělá síla
$\bar{\mathbf{R}}_{ab}^* = \begin{Bmatrix} -nl/2 \\ -ql/2 \\ ql^2/12 \\ -nl/2 \\ -ql/2 \\ -ql^2/12 \end{Bmatrix}$	$\bar{\mathbf{R}}_{ab}^* = \begin{Bmatrix} -F^* b/l \\ -F^* b^2(1+2a)/l^3 \\ F^* ab^2/l^2 \\ -F^* a/l \\ -F^* a^2(1+2b)/l^3 \\ -F^* a^2 b/l^2 \end{Bmatrix}$
(b) Plné lichoběžníkové zatížení	(d) Osamělý moment
$\bar{\mathbf{R}}_{ab}^* = \begin{Bmatrix} -(2n_1 + n_2)l/6 \\ -(7q_1 + 3q_2)l/20 \\ (3q_1 + 2q_2)l^2/60 \\ -(n_1 + 2n_2)l/6 \\ -(3q_1 + 7q_2)l/20 \\ -(2q_1 + 3q_2)l^2/60 \end{Bmatrix}$	$\bar{\mathbf{R}}_{ab}^* = \begin{Bmatrix} 0 \\ 6Mab/l^3 \\ -Mb(2l-3b)/l^2 \\ 0 \\ -6Mab/l^3 \\ -Ma(2l-3a)/l^2 \end{Bmatrix}$

262

11. Obecná deformační metoda pro rovinné průřezové kony

Obrázok 33: Primárne vektory koncových síl prútu, [3]

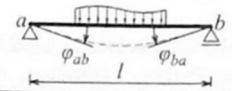

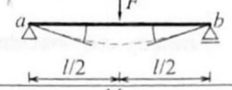

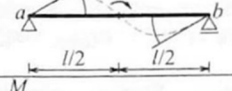
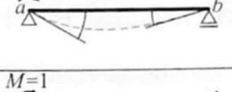
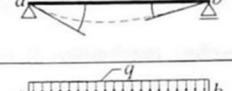
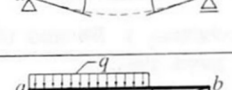
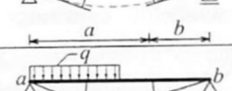

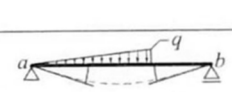
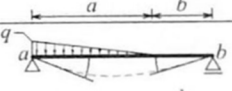
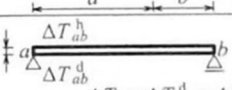
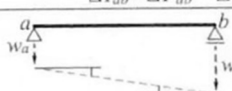
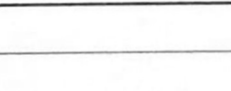
## Príloha 2

Tabuľka 8.3 Lokální matice tuhosti prutu  $[k_{a,b}^*]$

(8.3a)	(8.3b)
$[k_{a,b}^*] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix}$	$[k_{a,b}^*] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EI}{l^3} & \frac{3EI}{l^2} & 0 & -\frac{3EI}{l^3} & 0 \\ 0 & -\frac{3EI}{l^2} & \frac{3EI}{l} & 0 & \frac{3EI}{l^2} & 0 \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EI}{l^3} & \frac{3EI}{l^2} & 0 & \frac{3EI}{l^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
(8.3c)	(8.3d)
$[k_{a,b}^*] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EI}{l^3} & 0 & 0 & -\frac{3EI}{l^3} & -\frac{3EI}{l^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3EI}{l^3} & 0 & 0 & \frac{3EI}{l^3} & \frac{3EI}{l^2} \\ 0 & \frac{3EI}{l^2} & 0 & 0 & \frac{3EI}{l^2} & \frac{3EI}{l} \end{bmatrix}$	$[k_{a,b}^*] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Obrázok 34: Lokálne matice tuhosti, [3]

Tabulka 5.2 Pootočení u prostého nosníku konstantní ohybové tuhosti

Pootočení $\varphi_{ab}$ podporového průřezu $a$		Pootočení $\varphi_{ba}$ podporového průřezu $b$
$\varphi_{ab}^F = \frac{1}{6} \frac{F}{EI} \frac{ab}{l} (l+b)$ (5.8a)		$\varphi_{ba}^F = \frac{1}{6} \frac{F}{EI} \frac{ab}{l} (l+a)$ (5.8b)
$\varphi_{ab}^F = \frac{1}{16} \frac{F}{EI} l^2$ (5.9a)		$\varphi_{ba}^F = \frac{1}{16} \frac{F}{EI} l^2$ (5.9b)
$\varphi_{ab}^M = -\frac{1}{6} \frac{M}{EI} \frac{1}{l} (l^2 - 3b^2)$ (5.10a)		$\varphi_{ba}^M = \frac{1}{6} \frac{M}{EI} \frac{1}{l} (l^2 - 3a^2)$ (5.10b)
$\varphi_{ab}^M = -\frac{1}{24} \frac{M}{EI} l$ (5.11a)		$\varphi_{ba}^M = \frac{1}{24} \frac{M}{EI} l$ (5.11b)
$\varphi_{ab}^M = \frac{1}{3} \frac{M}{EI} l$ (5.12a)		$\varphi_{ba}^M = \frac{1}{6} \frac{M}{EI} l$ (5.12b)
$\alpha_{ab} = \frac{1}{3} \frac{l}{EI}$ (5.13a)		$\beta_{ba} = \frac{1}{6} \frac{l}{EI}$ (5.13b)
$\varphi_{ab}^q = \frac{1}{24} \frac{q}{EI} l^3$ (5.14a)		$\varphi_{ba}^q = \frac{1}{24} \frac{q}{EI} l^3$ (5.14b)
$\varphi_{ab}^q = \frac{1}{24} \frac{q}{EI} \frac{a^2}{l} (2l-a)^2$ (5.15a)		$\varphi_{ba}^q = \frac{1}{24} \frac{q}{EI} \frac{a^2}{l} (2l^2 - a^2)$ (5.15b)
$\varphi_{ab}^q = \frac{9}{384} \frac{q}{EI} l^3$ (5.16a)		$\varphi_{ba}^q = \frac{7}{384} \frac{q}{EI} l^3$ (5.16b)
$\varphi_{ab}^q = \frac{7}{360} \frac{q}{EI} l^3$ (5.17a)		$\varphi_{ba}^q = \frac{8}{360} \frac{q}{EI} l^3$ (5.17b)
$\varphi_{ab}^q = \frac{1}{360} \frac{q}{EI} \frac{a^2}{l} (40l^2 - 45al + 12a^2)$ (5.18a)		$\varphi_{ba}^q = \frac{1}{90} \frac{q}{EI} \frac{a^2}{l} (5l^2 - 3a^2)$ (5.18b)
$\varphi_{ab}^q = \frac{1}{360} \frac{q}{EI} \frac{a^2}{l} (20l^2 - 15al + 3a^2)$ (5.19a)		$\varphi_{ba}^q = \frac{1}{360} \frac{q}{EI} \frac{a^2}{l} (10l^2 - 3a^2)$ (5.19b)
$\varphi_{ab}^T = \frac{1}{2} \alpha_T \Delta T_{ab} \frac{l}{h}$ (5.20a)		$\varphi_{ba}^T = \frac{1}{2} \alpha_T \Delta T_{ab} \frac{l}{h}$ (5.20b)
$\varphi_{ab}^w = \frac{w_b - w_a}{l}$ (5.21a)		$\varphi_{ba}^w = \frac{w_a - w_b}{l}$ (5.21b)

Obrázok 35: Pootočená na prostom nosníku s konštantnou ohybovou tuhosťou, [4]



## Príloha 4

### Posudek ocelových prvků na MSÚ EC-EN 1993

Lineární výpočet

Kombinace: MSÚ-Sada B (auto)

Souřadný systém: Hlavní

Extrém ID: Globální

Výběr: vše

#### Posudek EN 1993-1-1

Národní příloha: Česká CSN-EN NA

**Dílec B1401 2,985 / 2,985 m CFCHS127X2.5 S 355 MSÚ-Sada B (auto) 4,29 -**

Poznámka: EN 1993-1-3 čl. 1.1(3) stanoví, že tato část se nevztahuje na za studena tvarované kruhové a obdélníkové trubky. Je proveden výchozí posudek podle EN 1993-1-1 namísto posudku podle EN 1993-1-3.

**Klíč kombinace**  
MSÚ-Sada B (auto) / 1.15\*ZS1 + 1.15\*ZS2 + 1.50\*ZS5 + 0.90\*ZS11 + 1.05\*ZS13

Díleč souč, spolehlivost	
$\gamma_{M0}$ pro únosnost průřezu	1,00
$\gamma_{M1}$ pro stabilitu	1,00
$\gamma_{M2}$ pro únosnost čtvého průřezu	1,25

Materiál			
Mez kluzu	$f_y$	355,0	MPa
Pevnost v tahu	$f_u$	490,0	MPa
Výroba		Tvářený za studena	

....:POSUDEK ÚNOSNOSTI:....

Kritický posudek je na pozici 2,985 m

Vnitřní síly		Vypočtené	Jednotka
Osová síla	$N_{Ed}$	650,70	kN
Smyková síla	$V_{y,Ed}$	8,30	kN
Smyková síla	$V_{x,Ed}$	14,11	kN
Kroucení	$T_{Ed}$	-0,68	kNm
Ohybový moment	$M_{y,Ed}$	22,62	kNm
Ohybový moment	$M_{x,Ed}$	12,63	kNm

#### Klasifikace pro návrh průřezu

Klasifikace podle EN 1993-1-1 článku 5.5.2

Klasifikace trubek podle EN 1993-1-1 tabulky 5.2 listu 3

$d$	$t$	$d/t$	Třída 1 limit	Třída 2 limit	Třída 3 limit	Třída
[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	
127	2	50,80	33,10	46,34	59,58	3

Průřez je klasifikován třídou 3

#### Posudek na tah

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.3 a rovnice (6.5)

Průřezová plocha	$A$	9,7800e-04	m <sup>2</sup>
Plastická tahová únosnost	$N_{pl,Rd}$	347,19	kN
Mezní tahová únosnost	$N_{t,Rd}$	345,04	kN
Tahová únosnost	$N_{t,Rd}$	345,04	kN
Jedn. posudek		<b>1,89</b>	-

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{9,7800 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2] \times 355,0 [\text{MPa}]}{1,00} = 347,19 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.6})$$

$$N_{t,Rd} = \frac{0,9 \times A \times f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 9,7800 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2] \times 490,0 [\text{MPa}]}{1,25} = 345,04 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.7})$$

$$N_{t,Rd} = \min(N_{pl,Rd}, N_{t,Rd}) = \min(347,19 [\text{kN}], 345,04 [\text{kN}]) = 345,04 [\text{kN}]$$

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{650,70 [\text{kN}]}{345,04 [\text{kN}]} = 1,89 > 1,00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.5})$$

#### Posudek ohybového momentu pro $M_y$

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.5 a rovnice (6.12), (6.14)

Pružný modul průřezu	$W_{el,y,min}$	2,9850e-05	m <sup>3</sup>
Pružný ohybový moment	$M_{el,y,Rd}$	10,60	kNm
Jedn. posudek		<b>2,13</b>	-

$$M_{el,y,Rd} = \frac{W_{el,y,min} \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2,9850 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3] \times 355,0 [\text{MPa}]}{1,00} = 10,60 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.14})$$

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{|M_{y,Ed}|}{M_{el,y,Rd}} = \frac{|22,62 [\text{kNm}]|}{10,60 [\text{kNm}]} = 2,13 > 1,00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

#### Posudek ohybového momentu pro $M_x$

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.5 a rovnice (6.12), (6.14)

Obrázok 36: Posúdenie konštrukcie na MSÚ, strana 1/3

Pružný modul průřezu	$W_{el,z,Ed}$	2,9850e-05	m <sup>3</sup>
Pružný ohybový moment	$M_{el,z,Ed}$	10,60	kNm
Jedn. posudek		1,19	-

$$M_{el,z,Ed} = \frac{W_{el,z,Ed} \times f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{2,9850 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3] \times 355,0 [\text{MPa}]}{1,00} = 10,60 [\text{kNm}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.14})$$

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{|M_{z,Ed}|}{M_{el,z,Ed}} = \frac{|12,63 [\text{kNm}]|}{10,60 [\text{kNm}]} = 1,19 > 1,00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.12})$$

#### Posudek smyku pro $V_y$

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 a rovnice (6.17)

Součinitel smykové korekce	$\eta$	1,20	
Smyk. plocha	$A_v$	6,2261e-04	m <sup>2</sup>
Plastická smyková únosnost pro $V_y$	$V_{pl,y,Rd}$	127,61	kN
Jedn. posudek		0,07	-

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M2}} = \frac{6,2261 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2] \times \frac{355,0 [\text{MPa}]}{\sqrt{3}}}{1,00} = 127,61 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.18})$$

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{|V_{y,Ed}|}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{|8,30 [\text{kN}]|}{127,61 [\text{kN}]} = 0,07 \leq 1,00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.17})$$

#### Posudek smyku pro $V_z$

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 a rovnice (6.17)

Součinitel smykové korekce	$\eta$	1,20	
Smyk. plocha	$A_v$	6,2261e-04	m <sup>2</sup>
Plastická smyková únosnost pro $V_z$	$V_{pl,z,Rd}$	127,61	kN
Jedn. posudek		0,11	-

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M2}} = \frac{6,2261 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2] \times \frac{355,0 [\text{MPa}]}{\sqrt{3}}}{1,00} = 127,61 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.18})$$

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{|V_{z,Ed}|}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{|14,11 [\text{kN}]|}{127,61 [\text{kN}]} = 0,11 \leq 1,00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.17})$$

#### Posudek kroucení

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.7 a rovnice (6.23)

Index vlákna	Vlákno	1	
Celkový kroubový moment	$T_{Ed}$	11,2	MFa
Pružná smyková únosnost	$T_{Ed}$	205,0	MFa
Jedn. posudek		0,05	-

$$T_{Ed} = |T_{Ed}| \times T_{Ed,corr} = |-679,53| \times 1,643 \cdot 10^1 [\text{kN/m}^2] = 11,2 [\text{MPa}]$$

$$T_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \times \gamma_{M2}} = \frac{355,0 [\text{MPa}]}{\sqrt{3} \times 1,00} = 205,0 [\text{MPa}]$$

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} = \frac{11,2 [\text{MPa}]}{205,0 [\text{MPa}]} = 0,05 \leq 1,00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.23})$$

#### Kombinovaný posudek smyku a kroucení pro $V_y$ a $\tau_{x,Ed}$

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 & 6.2.7 a rovnice (6.25), (6.28)

Plastická smyková únosnost pro $V_y$	$V_{pl,T,y,Rd}$	120,66	kN
$\frac{1}{3} T_{Ed}$			
Jedn. posudek		0,07	-

$$V_{pl,T,y,Rd} = \left(1 - \frac{\tau_{x,Ed} \times \gamma_{M2} \times \sqrt{3}}{f_y}\right) \times V_{pl,y,Rd} = \left(1 - \frac{11,2 [\text{MPa}] \times 1,00 \times \sqrt{3}}{355,0 [\text{MPa}]}\right) \times 127,61 [\text{kN}] = 120,66 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.28})$$

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{|V_{y,Ed}|}{V_{pl,T,y,Rd}} = \frac{|8,30 [\text{kN}]|}{120,66 [\text{kN}]} = 0,07 \leq 1,00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.25})$$

#### Kombinovaný posudek smyku a kroucení pro $V_z$ a $\tau_{x,Ed}$

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 & 6.2.7 a rovnice (6.25), (6.28)

Plastická smyková únosnost pro $V_z$	$V_{pl,T,z,Rd}$	120,66	kN
$\frac{1}{3} T_{Ed}$			
Jedn. posudek		0,12	-

$$V_{pl,T,z,Rd} = \left(1 - \frac{\tau_{x,Ed} \times \gamma_{M2} \times \sqrt{3}}{f_y}\right) \times V_{pl,z,Rd} = \left(1 - \frac{11,2 [\text{MPa}] \times 1,00 \times \sqrt{3}}{355,0 [\text{MPa}]}\right) \times 127,61 [\text{kN}] = 120,66 [\text{kN}] \quad (\text{EC3-1-1: 6.28})$$

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{|V_{z,Ed}|}{V_{pl,T,z,Rd}} = \frac{|14,11 [\text{kN}]|}{120,66 [\text{kN}]} = 0,12 \leq 1,00 \quad (\text{EC3-1-1: 6.25})$$

#### Posudek na kombinaci ohybu, osové a smykové síly

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.9.2 a rovnice (6.42)

Obrázok 37: Posúdenie konštrukcie na MSÚ, strana 2/3

Normálová napětí			
Index vlákn	Vlákn	20	
Normálová napětí od normálové síly N	$\sigma_{N,Ed}$	-665,3	MPa
Normálové napětí od ohybového momentu $M_y$	$\sigma_{My,Ed}$	-712,0	MPa
Normálové napětí od ohybového momentu $M_z$	$\sigma_{Mz,Ed}$	-144,7	MPa
Celkové podélné napětí	$\sigma_{Nt,Ed}$	-1522,1	MPa
Jedn. posudek		4,29	*

$$\sigma_{N,Ed} = \frac{-N_{Ed}}{A} = \frac{-650,70[\text{kN}]}{9,7800 \cdot 10^{-4}[\text{m}^2]} = -665,3[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{My,Ed} = \frac{M_{y,Ed} \times z}{I_y} = \frac{22,62[\text{kNm}] \times -60[\text{mm}]}{1,8953 \cdot 10^{-6}[\text{m}^4]} = -712,0[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{Mz,Ed} = \frac{M_{z,Ed} \times y}{I_z} = \frac{12,63[\text{kNm}] \times -22[\text{mm}]}{1,8953 \cdot 10^{-6}[\text{m}^4]} = -144,7[\text{MPa}]$$

$$\sigma_{Nt,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{My,Ed} + \sigma_{Mz,Ed} = -665,3[\text{MPa}] + -712,0[\text{MPa}] + -144,7[\text{MPa}] = -1522,1[\text{MPa}]$$

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{|\sigma_{Nt,Ed}|}{f_y} = \frac{|-1522,1[\text{MPa}]|}{355,0[\text{MPa}]} = 4,29 > 1,00$$

(EC1-1-1: 6.42)

Prvek nespĺňuje podmínky posudku prűezu!

....**POSUDEK STABILITY**:....

**Klasifikace pro návrh dílce na vzpěr**

Rozhodující poloha pro klasifikaci stability: 0,000 m

Klasifikace podle EN 1993-1-1 článku 5.5.2

Klasifikace trubek podle EN 1993-1-1 tabulky 5.2 listu 3

d [mm]	t [mm]	d/t [-]	Třída 1 limit [-]	Třída 2 limit [-]	Třída 3 limit [-]	Třída
127	2	50,80	33,10	46,34	59,58	3

Prűez je klasifikován třídou 3

**Posudek klopení**

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.2.1

**Poznámka:** Prűez se týká kruhové trubky, která není náchylná ke klopení.

Prvek splňuje podmínky stabilního posudku.

Obrázok 38: Posúdenie koňštrukcie na MSÚ, strana 3/3

### EC-EN 1993 Posudek oceli MSP

Lineární výpočet

Kombinace: MSP-Char (auto)

Souřadný systém: Hlavní

Extrem 1D: Globální

Výběr: Vše

**Celkový posudek**

Jméno	dx [m]	Stav	$u_{y,max}$ [mm]	$u_{y,var}$ [mm]	Lim. $u_{y,max}$ [mm]	Lim. $u_{y,var}$ [mm]	Posudek $u_{y,max}$ [-]	Posudek $u_{y,var}$ [-]	Nadvýšení dx $u_z$ [mm]	Posudek Celkový [-]
B1407	7,293	MSP-Char (auto)/1	0,0	0,0	36,5	20,3	0,00	0,00	-	2,96
			-136,7	-119,9	72,9	40,5	1,87	2,96	-	

Jméno	Klíč kombinace
MSP-Char (auto)/1	ZS1 + ZS2 + ZS6 + 0.60*ZS11 + 0.70*ZS13

Obrázok 39: Posúdenie koňštrukcie na MSP

## ZOZNAM OBRAZOVÝCH PRÍLOH

Obrázok 1: Lávka cez rieku Morava.....	2
Obrázok 2: Model lávky pre peších a cyklistov v SCIA Engineer .....	3
Obrázok 3: Oblúk Tenkostenný prierez 600x400x16.....	3
Obrázok 5: Diagonála Tenkostenný prierez 250x250x10 .....	3
Obrázok 4: Záves Tenkostenný prierez 127x2,5 .....	3
Obrázok 6: Mostovkový nosník (krajné polia) HEM 180 .....	4
Obrázok 7: Mostovkový nosník (pole pod oblúkom) HEB 200.....	4
Obrázok 8: Reakcie od zaťaženia na modele lávky.....	4
Obrázok 9: Posúvajúce sily od zaťaženia na modele lávky.....	5
Obrázok 10: Ohybové momenty od zaťaženia na modele lávky.....	5
Obrázok 11: Schéma rozdelenia zaťaženia chodcami .....	6
Obrázok 12: Pozícia kolies obslužného vozidla, [2].....	7
Obrázok 13: Mapa veterných oblastí Českej republiky.....	8
Obrázok 14: Kategórie terénu a ich parametre, [2] .....	9
Obrázok 15: Smery zaťaženia vetrom na mostoch, [2] .....	11
Obrázok 16: Výšky použité pre $A_{ref,x}$ , [2].....	13
Obrázok 17. Statická schéma idealizovanej konštrukcie lávky .....	15
Obrázok 18: Rozmery prierezov na prúte.....	15
Obrázok 19: Schéma staticky určitej sústavy pre výpočet silovou metódou.....	17
Obrázok 20: Priebeh momentov od nultého zaťažovacieho stavu.....	19
Obrázok 21: Priebeh momentov od prvého zaťažovacieho stavu .....	20
Obrázok 22: Doplnujúce momenty od prvého zaťažovacieho stavu .....	20
Obrázok 23: Priebeh momentov od druhého zaťažovacieho stavu .....	21
Obrázok 24: Deformácie od spojitého zaťaženia.....	22
Obrázok 25: Deformácie od jednotkovej sily v bode b .....	24
Obrázok 26: Priebeh vnútorných síl získaných silovou metódou.....	27
Obrázok 27: Schéma základnej sústavy pre metódu trojmomentových rovníc, [3] .....	28
Obrázok 28: Schéma pre všeobecnú deformáciu v podpore b.....	30
Obrázok 29: Priebeh vnútorných síl získaných metódou trojmomentových rovníc.....	33
Obrázok 30: Výpočtový model prútu pre deformačnú metódu .....	34
Obrázok 31: Reakcie deformačnej metódy, [4] .....	41

Obrázok 32: Priebeh vnútorných síl získaných deformačnou metódou .....	42
Obrázok 33: Primárne vektory koncových síl prútu, [3] .....	46
Obrázok 34: Lokálne matice tuhosti, [3] .....	46
Obrázok 35: Pootočená na prostom nosníku s konštantnou ohybovou tuhosťou, [4] ...	47
Obrázok 36: Posúdenie konštrukcie na MSÚ, strana 1/3 .....	48
Obrázok 37: Posúdenie konštrukcie na MSÚ, strana 2/3 .....	49
Obrázok 38: Posúdenie konštrukcie na MSÚ, strana 3/3 .....	50
Obrázok 39: Posúdenie konštrukcie na MSP .....	50

## ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1: Výsledky výpočtov .....	43
------------------------------------	----

## ZDROJE OBRAZOVÝCH PRÍLOH

- Obrázok 1: *Lávka cez rieku Morava*. [online]. [cit. 25.5.2021]. Dostupné z: <https://stavokov.sk/lavka-cez-rieku-morava/>.
- Obrázok 12: ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- Obrázok 13: *Větrná a sněhová mapa*. [online]. [cit. 25.5.2021]. Dostupné z: <http://www.sticka.cz/mapy/>.
- Obrázok 14: ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- Obrázok 15: ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- Obrázok 16: ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- Obrázok 27: KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí. II., Staticky neurčité prutové konstrukce*. Třetí dostisk druhého vyd. V Brně: VUTIUM, 2009, 431 s. : il. ; 25 cm. ISBN 978-80-214-3428-8.
- Obrázok 31: KYTÝR, Jiří, Roman GRATZA, Jan PLÁŠEK, Tomáš RIDOŠKO a Jan EKR. *Statika: řešené příklady. II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016, 173 stran : grafy. ISBN 978-80-7204-946-2.

- Obrázok 33: KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí. II., Staticky neurčité prutové konstrukce*. Třetí dostisk druhého vyd. V Brně: VUTIUM, 2009, 431 s. : il. ; 25 cm. ISBN 978-80-214-3428-8.
- Obrázok 34: KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí. II., Staticky neurčité prutové konstrukce*. Třetí dostisk druhého vyd. V Brně: VUTIUM, 2009, 431 s. : il. ; 25 cm. ISBN 978-80-214-3428-8.
- Obrázok 35: KYTÝR, Jiří, Roman GRATZA, Jan PLÁŠEK, Tomáš RIDOŠKO a Jan EKR. *Statika: řešené příklady. II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016, 173 stran : grafy. ISBN 978-80-7204-946-2.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

### Norma

- [1] ČSN EN 1991-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Praha: Český normalizační institut, 2005
- [2] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007

### Kniha

- [3] KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí. II., Staticky neurčité prutové konstrukce*. Třetí dostisk druhého vyd. V Brně: VUTIUM, 2009, 431 s. : il. ; 25 cm. ISBN 978-80-214-3428-8.
- [4] KYTÝR, Jiří, Roman GRATZA, Jan PLÁŠEK, Tomáš RIDOŠKO a Jan EKR. *Statika: řešené příklady. II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016, 173 stran : grafy. ISBN 978-80-7204 -946-2.