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 — SOŇA JANKOVIČOVÁ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. JOSEF MARTINÁSEK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Soňa Jankovičová
Název	Statická analýza vybrané konstrukce
Vedoucí práce	Ing. Josef Martinásek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	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 trámov, 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 prútový model na štyroch podporách. Následne sú výsledky porovnané.

KĽÚČOVÉ 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

1 ÚVOD 1

2 KONŠTRUKCIA 2

2.1 CHARAKTERISTIKA KONŠTRUKCIE 2

2.2 MODEL KONŠTRUKCIE 3
2.2.1 Prierezy 3
2.2.2 Vnútorné sily 4

3 ZAŤAŽENIE 6

3.1 STÁLE ZAŤAŽENIE 6
3.1.1 Vlastná tiaž 6
3.1.2 Ďalšie stále zaťaženie 6

3.2 PREMENNÉ ZAŤAŽENIE 6
3.2.1 Chodci 6
3.2.2 Sústredené zaťaženie chodcov 7
3.2.3 Výskyt obslužného vozidla 7
3.2.4 Vietor 8

4 POSÚDENIE 14

5 RUČNÉ VÝPOČTY 15

5.1 VÝPOČOVÝ MODEL 15

5.2 SILOVÁ METÓDA 16
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 Vnútorné sily 26

5.3 METODA TROJMOMENTOVÝCH ROVNÍC 28
5.3.1 Základná sústava 28
5.3.2 Odvodenie trojmomentovej rovnice 30
5.3.3 Vnútorné sily 31

5.4 DEFORMAČNÁ METÓDA 34
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

6 ZHODNOTENIE 43

6.1 POROVNANIE VÝSLEDKOV 43

6.1 POROVNANIE METÓD 44

7 ZÁVER 45

8 PRÍLOHY 46

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 trámov spojených mostovkou. Ku každému trámu 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 premosťuje 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“[1] od autorov: Ing. Vladimír Engler , Ing. František Hanuš , Ing. Petr Harazim.

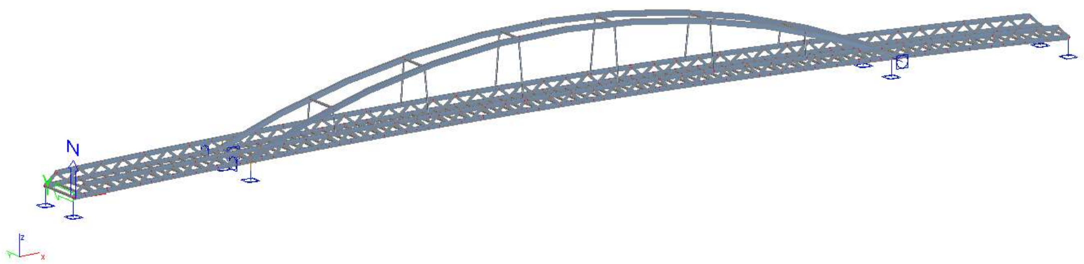
Obrázok 1: Lávka cez rieku Morava

[1] https://silnice-zeleznice.cz/silnicni-infrastruktura/lavka-pres-reku-moravu-vcetne-pristupove-komunikace-v-archeologickem-parku-mikulcice-kopcany-23

2.2 MODEL KONŠTRUKCIE

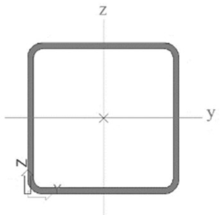
Priestorový model konštrukcie bol vytvorený v programe SCIA Engineer. Jeho tvar bol inšpirovaný lávkou cez rieku Morava. Použité sú rôzne oceľové dielce obdĺžnikového, kruhového a I-tvaru, inšpirované skutočnými, ktoré podľa článku „Lávka přes řeku Moravu včetně přístupové komunikace v archeologickém 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).

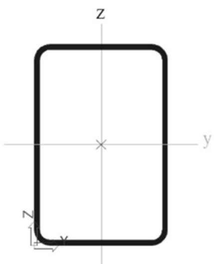


Obrázok 2: Model lávky pre peších a cyklistov v SCIA Engineer

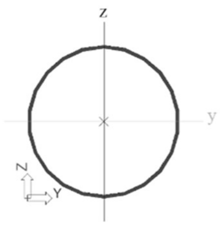
2.2.1 Prierezy



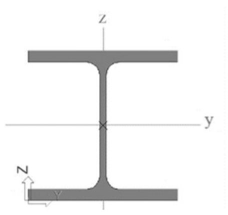
Obrázok 4: Diagonála
Tenkostenný prierez 250x250x10



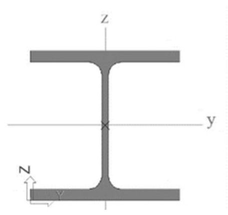
Obrázok 3: Oblúk
Tenkostenný prierez 600x400x16



Obrázok 5: Záves
Tenkostenný prierez 127x2,5



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

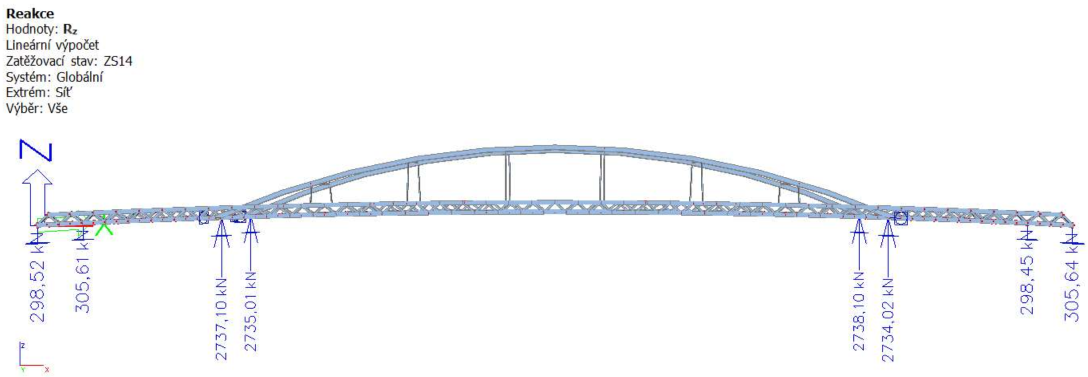


Obrázok 6: Mostovkový nosník (krajné polia) HEM 180

2.2.2 Vnútorné 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).

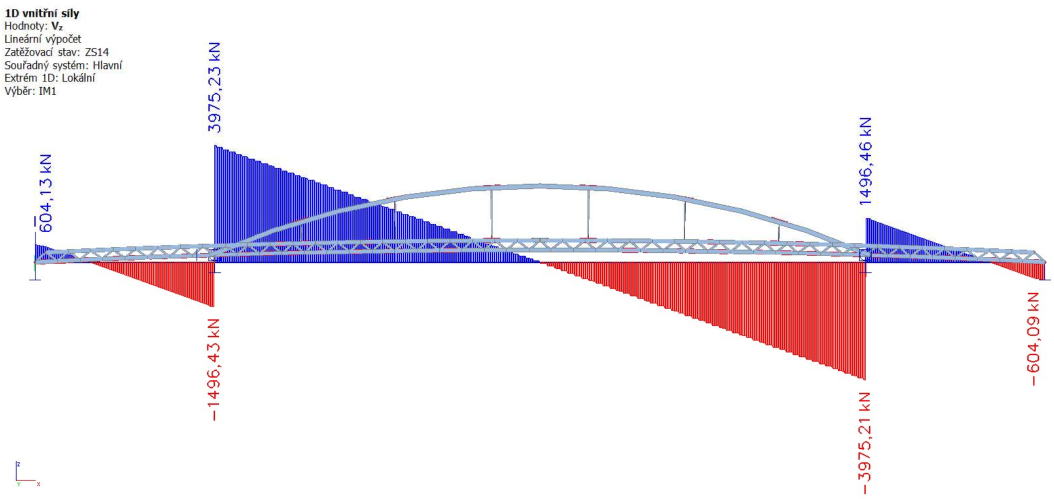


Obrázok 8: Reakcie od zaťaženia na modele lávky

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

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

Posúvajúce sily



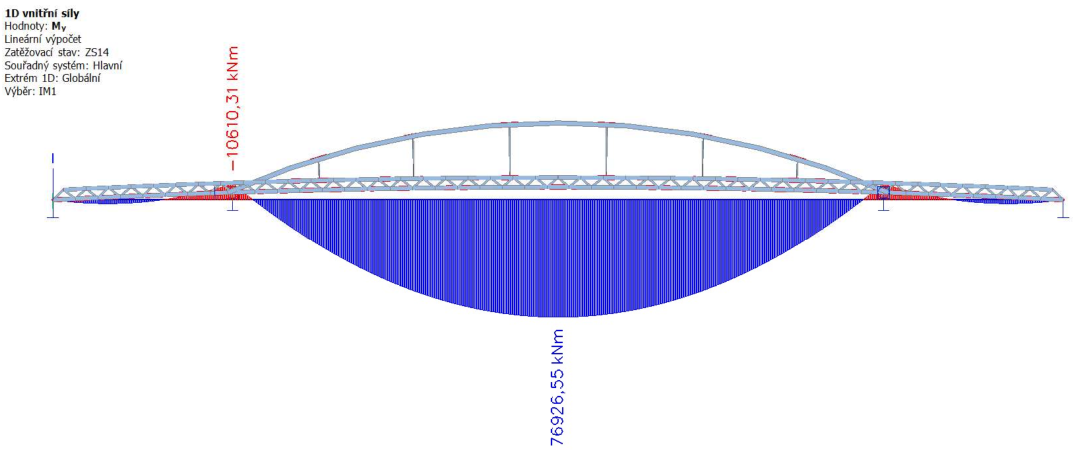
Obrázok 9: Posúvajúce sily od zaťaženia na modele lávky

$V_a = 604{,}13\ kN$

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

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

Ohybové momenty



Obrázok 10: Ohybové momenty od zaťaženia na modele lávky

$M_a = 0\ kNm$

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

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

3 ZAŤAŽENIE

3.1 STÁLE ZAŤAŽENIE

3.1.1 Vlastná tiaž

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

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

3.1.2 Ďalšie stále zaťaženie

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

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

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 $q_{fk} = 5{,}0\ kN/m^2$. 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

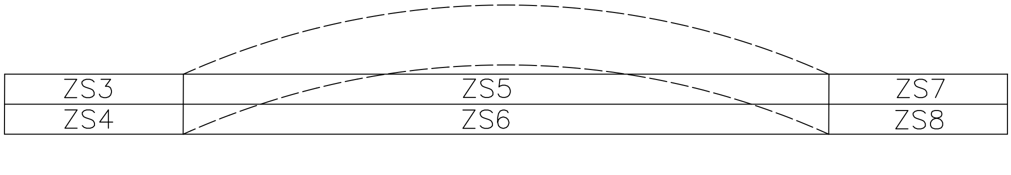
ZS4 – chodci na kraji lávky v dolnej polovici

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). $Q_{fwk} = 10\ kN$, ktorá pôsobí na ploche $0{,}1\ x\ 0{,}1\ m$.

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.

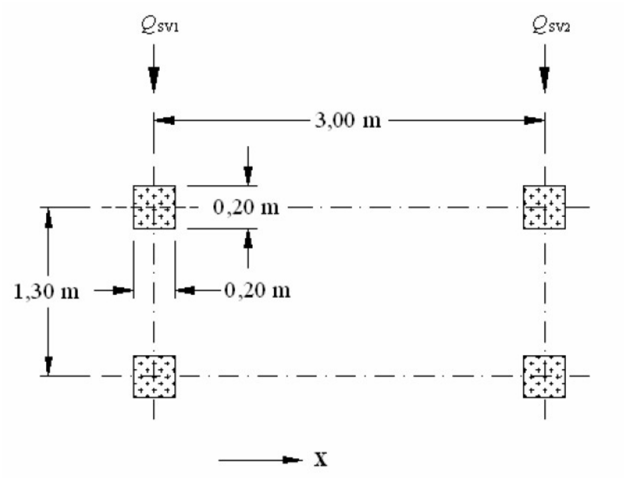
3.2.3 Výskyt obslužného vozidla

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).

$Q_{sv1} = 80\ kN$

$Q_{sv2} = 40\ kN$



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 počítať dynamický tlak, postačí nám zjednodušená metóda výpočtu. Výpočet je stanovený podľa ČSN EN 1991-1-4:2007 (kap.4).

Základná rýchlosť vetra v_b

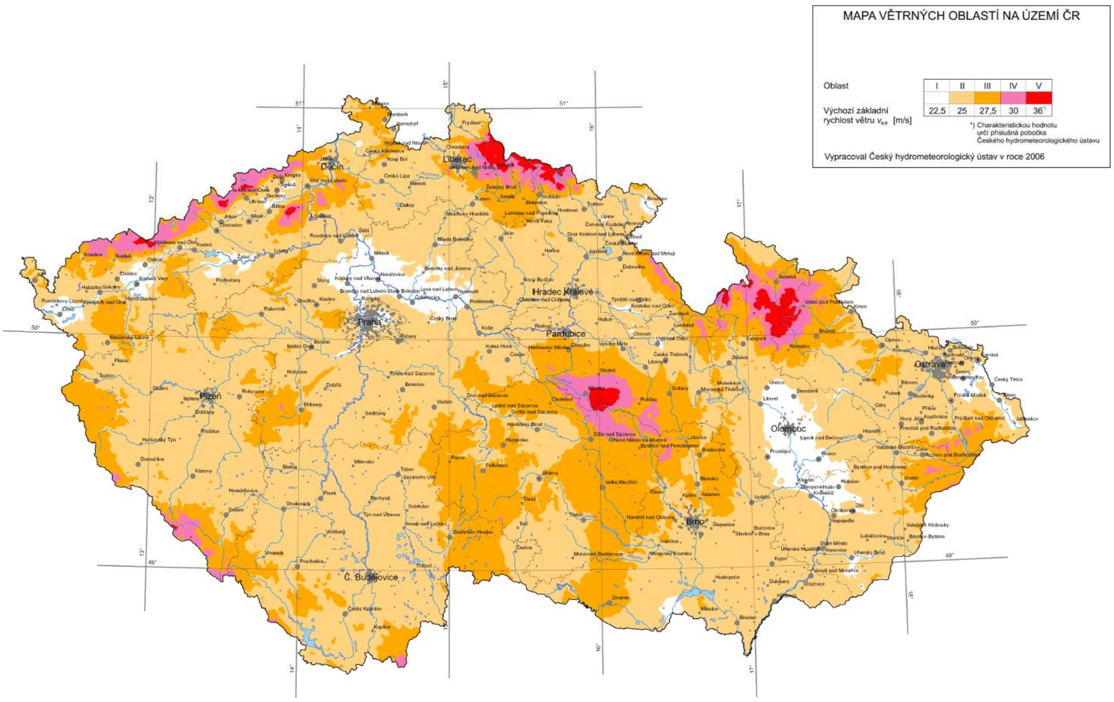
podľa [2] - kap. 4.2 (4.1)

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

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. $v_{b,0} = 25\ m/s$ určená z mapy veterných oblastí Českej republiky



Obrázok 13: Mapa veterných oblastí Českej republiky

Stredná rýchlosť vetra v_m (z)

podľa [2] - kap. 4.3.1 (4.3)

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

$c_r(z)$ 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 Iv

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 qp (z)

podľa [2] - kap. 4.5 (4.8)

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z)$$

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

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

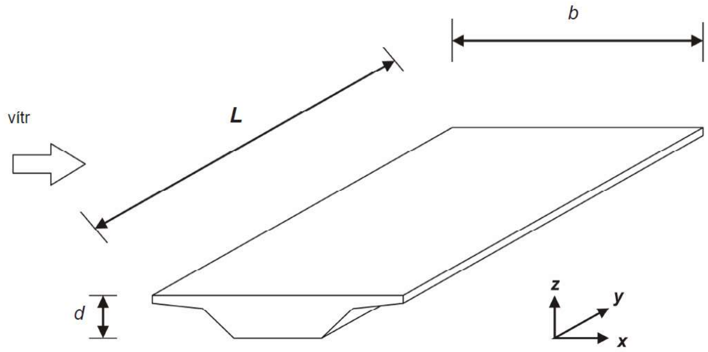
$I_v(z)$ intenzita turbulencie $[-]$

$v_m^2(z)$ 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: Smery zaťaženia vetrom na mostoch, [2]

3.2.4.3 Priečny vietor – vietor v smere x:

Pre náš prípad uvažujeme len vietor v smere x.

• Základný dynamický tlak qb

podľa [2] - kap. 4.5 (4.10)

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

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

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

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

c_e súčiniteľ expozície $[-]$

$c_{f,x}$ súčiniteľ síl pre zaťaženie nosnej konštrukcie mostu vetrom v smere x $[-]$

$c_{fx,0}$ súčiniteľ sily bez vplyvu prúdenia okolo voľných koncov, $c_{fx,0} = 1{,}3$

$q_p(z)$ maximálny dynamický tlak $[Pa]$

q_b základný dynamický tlak $[Pa]$

Sila vetra v smere x

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

podľa [2] - kap. 8.3.2 (8.2)

$$F_{w,x} = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 * c * A_{ref,x} = \frac{1}{2} * 1{,}25 * 25^2 * 0{,}425 * 1{,}8 = 0{,}3\ kN/bm$$
$$d_{tot} = 0{,}225 + 0{,}6 = 0{,}285\ m$$

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

v_b základná rýchlosť vetra $[m/s]$

c súčiniteľ zaťaženia vetrom $[-]$

$A_{ref,x}$ referenčná plocha v smere x $[m^2]$

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 m	d + 0,6 m
Neprodyšné zábradlí nebo plné svodidlo	$d + d_1$	$d + 2d_1$
Prodyšné zábradlí a svodidlo se svodnicí	d + 0,6 m	d + 1,2 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 zaťažení pre príslušné stavy. Ich parametre koeficientov program určuje automaticky na základe platných noriem.

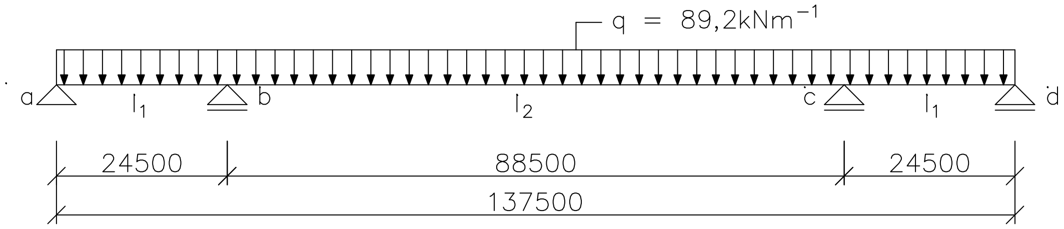
Protokol s výsledkami posudkov je uvedený v prílohe 4. Na základe tohto protokolu, môžeme určiť, že konštrukcia lávky na MSÚ nevyhovuje.

Správnosť práce s výpočtovým programom je teda vhodné overiť ručnými výpočtami na zjednodušenom prútovom 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 dotyčnice lávky na začiatku je 3°, toto zakrivenie bude mať len malý vplyv na výpočty. Nosník je zaťažený 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

$L_1 = 24,5$ m

$L_2 = 88,5$ m

$L = 137,5$ m

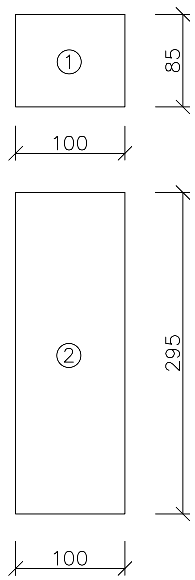
$A_1 = b\mathrm{h} = 0,1 * 0,085 = 8,5 * 10^{-3}\ m^2$

$A_2 = b\mathrm{h} = 0,1 * 0,295 = 29,5 * 10^{-3}\ m^2$

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

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

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



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.

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

Prierezové charakteristiky boli vypočítané z rovnosti maximálneho priehybu priestorového modelu a priehybu na zjednodušenom prútovom 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:

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

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

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

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 δ_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 $[-]$

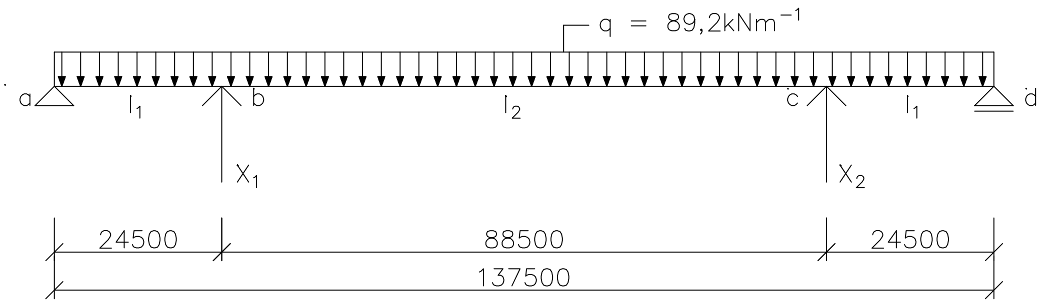
r_u počet uzavretých rámov $[-]$

p_k počet jednoduchých vnútorných kĺbov $[-]$

Spojitý 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 Zaťažovacie stavy

Na základnej sústave je následne možné zostaviť deformačné podmienky od troch zaťažovacích stavov.

Nultý zaťažovací stav

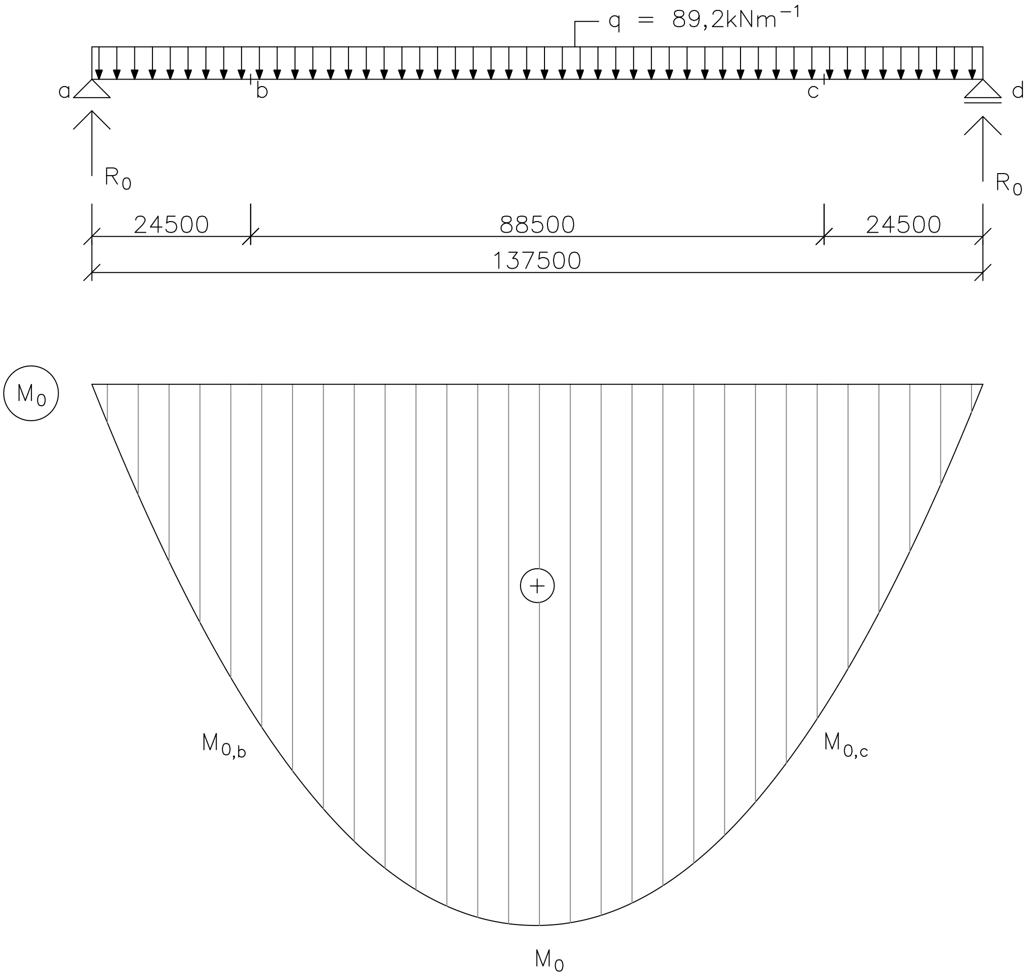
Momenty od pôsobiaceho zaťaženia (viď ďalšia strana).

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

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

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

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



Obrázok 20: Priebeh momentov od nultého zaťažovacieho stavu

Prvý zaťažovací stav

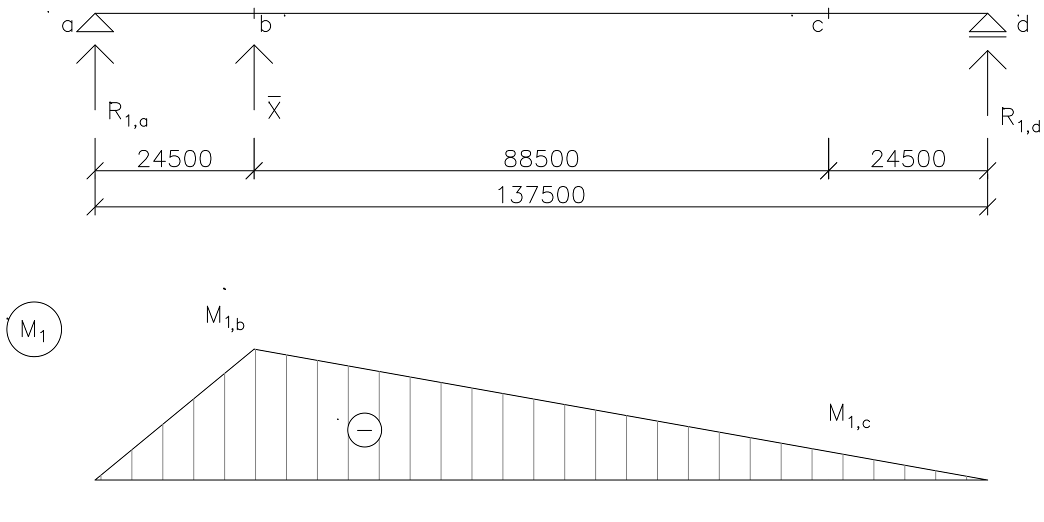
Momenty od jednotkovej $\bar{X}$ sily v podpore b (viď ďalšia strana).

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

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

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

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



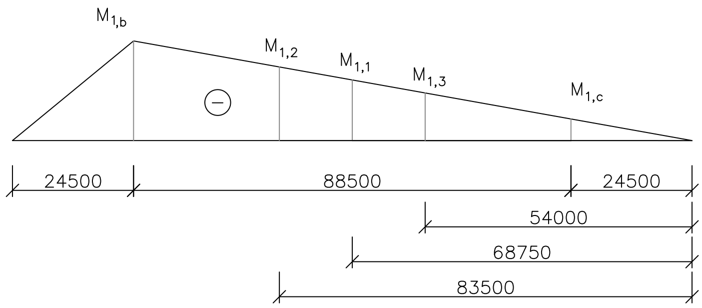
Obrázok 21: Priebeh momentov od prvého zaťažovacieho stavu

Doplňujúce momenty potrebné pre ďalšie výpočty pomocou Vereščaginovho pravidla:

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

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

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



Obrázok 22: Doplňujúce momenty od prvého zaťažovacieho stavu

Druhý zaťažovací stav

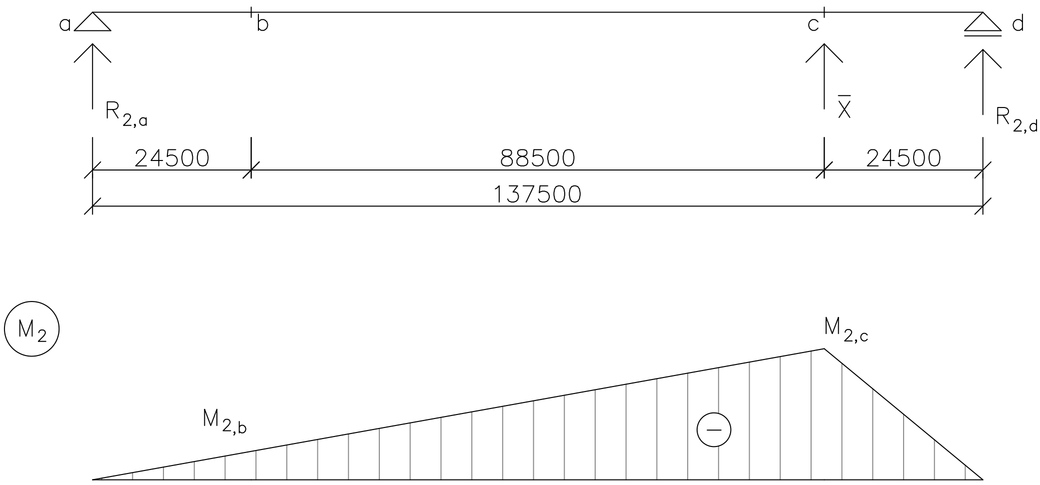
Momenty od jednotkovej $\bar{X}$ sily v podpore c.

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

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

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

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



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 dovolíme zanedbať, pretože hodnoty normálových síl na prúte sú nulové. Posuvné sily, síce pôsobia, ale pôsobia na malom priereze, I $<$ 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 počítať 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 $\overline{M}$. 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:

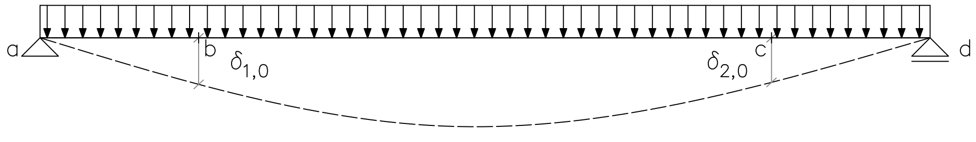
$$\delta_i = \int_0^s \frac{M\overline{M}}{EI} ds = \frac{1}{EI}[A_M * \overline{M}_T]$$

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

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

$$\delta_{1,0} = \frac{1}{EI_1}\left[\frac{1}{2}M_{0,b}L_1 * \frac{2}{3}M_{1,b} + \frac{2}{3}M_{1,3}L_1 * \frac{1}{2}M_{1,b} + \frac{1}{2}M_{0,b}L_1 * \frac{2}{3}M_{1,c} + \frac{2}{3}M_{1,3}L_1 *\right.$$

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

Po úprave dostaneme:

$$\delta_{1,0} = \frac{L_1}{3EI_1}\left[M_{0,b}(M_{1,b} + M_{1,c}) + M_{1,3}(M_{1,b} + M_{1,c})\right] +$$

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

Dosadíme:

$$\delta_{1,0} = \frac{24{,}5}{3EI_1}[123\,475{,}1(-20{,}139 - 4{,}361) + 6\,692{,}788(-20{,}139 - 4{,}361)] +$$

$$+ \frac{88{,}5}{EI_2}\left[123\,475{,}1 * (-12{,}263) + \frac{2}{3}(210\,804{,}688 - 123\,475{,}1) * (-12{,}263)\right]$$

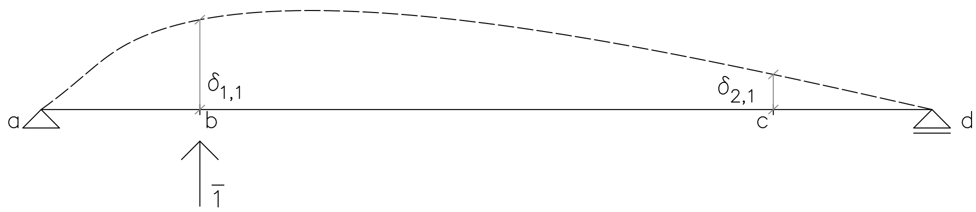
$$\delta_{1,0} = \frac{24{,}5 * (-3\,189\,113{,}256)}{3 * 9{,}706 * 10^{11} * 5{,}118 * 10^{-6}} + \frac{88{,}5 * (-2\,228\,123{,}643)}{9{,}706 * 10^{11} * 2{,}139 * 10^{-4}}$$

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

Pretvorenie $\boldsymbol{\delta_{1,1}}, \boldsymbol{\delta_{2,1}}$

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

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

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

Po úprave dostaneme:

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

Dosadíme:

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

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

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

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

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

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

Po úprave dostaneme:

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

Dosadíme:

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

$$+\frac{88,5}{EI_2}\left[(-4,361 * (-12,263) + \frac{1}{2}(-20,139 + 4,361) * (-9,637)\right]$$

$$\delta_{2,1} = \frac{24,5 * (175,652)}{3 * 9,706 * 10^{11} * 5,118 * 10^{-6}} + \frac{88,5 * (129,505)}{9,706 * 10^{11} * 2,139 * 10^{-4}}$$

$$\delta_{2,1} = 2,888 * 10^{-4} + 5,521 * 10^{-5} = 3,440 * 10^{-4}$$

Celkovú deformáciu δ_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 $\boldsymbol{\delta_{1,2}}, \boldsymbol{\delta_{2,2}}$

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:

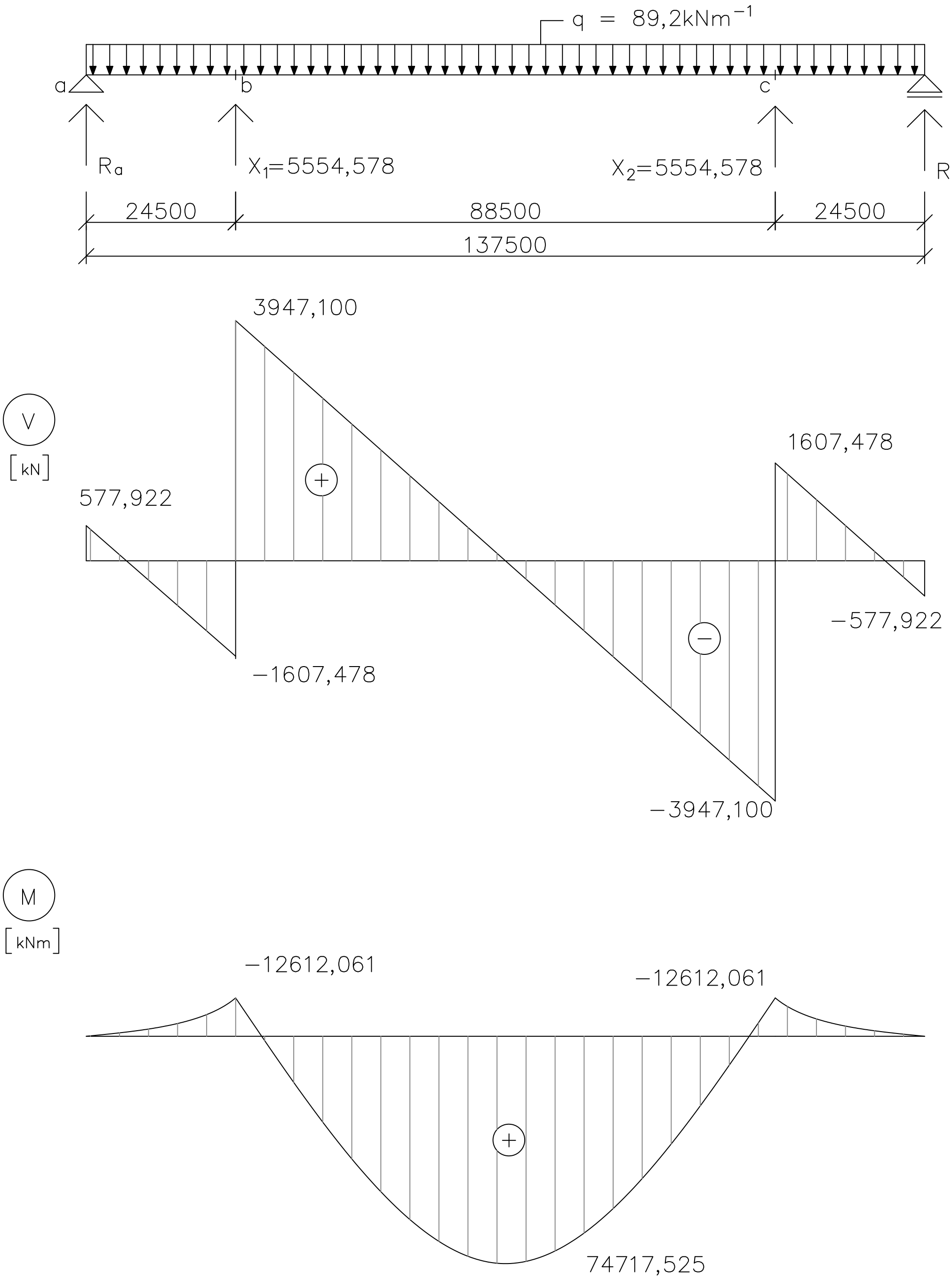
$$X_1 = \frac{\delta_{1,0}}{\delta_1} = \frac{-6{,}193}{11{,}149 * 10^{-4}} = -5\,554{,}578\ kN$$

5.2.2 Vnútorné sily

Teraz je možné vypočítať konštrukciu ako staticky určitú, zaťaženú spojitým zaťažením a dvomi osamelými silami.

Dopočítame reakcie R_a a R_d:

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



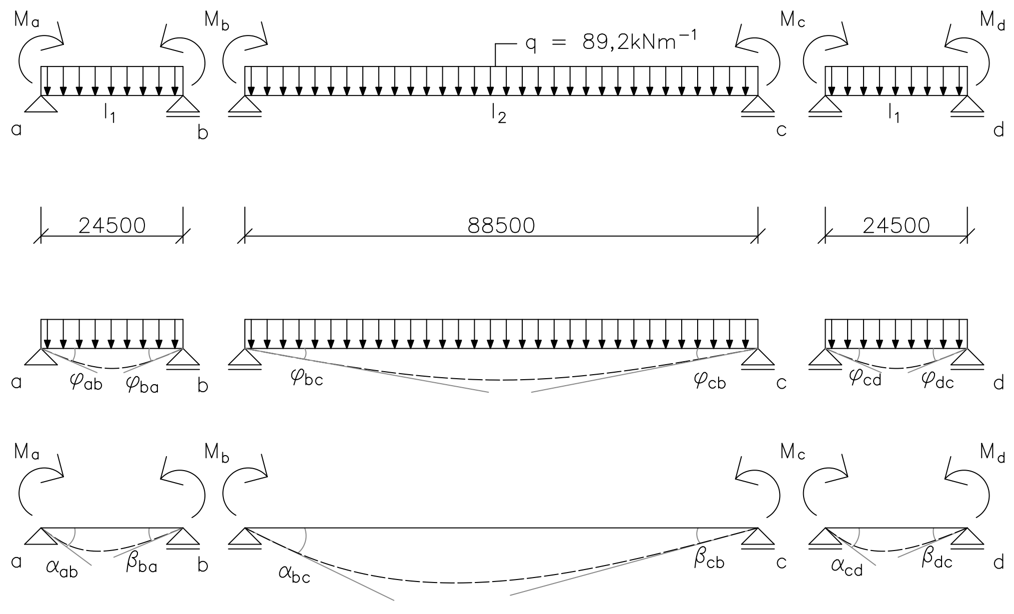
Obrázok 26: Priebeh vnútorných síl získaných silovou metódou

5.3 METODA TROJMOMENTOVÝCH ROVNÍC

Metóda trojmomentových rovníc je forma silovej metódy pre spojité nosníky, kde sa základná sústava tvorí vkladaním kĺbov do votknutí a vnútorných podpôr. Nad týmito kĺbmi 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 kĺboch. 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.[2] Od týchto namáhaní vznikajú deformácie, definované ich kladnými uhlami od prútu a dotyčnice k ohybovej čiare.



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

[2] Obrázok je inšpirovaný schémou z publikácie J.Kadlčáka a J. Kytýra: Statika stavebních konstrukcí II., na strane 116.

Momenty v krajných podporách musia byť nulové, preto:

$M_a = 0\ kNm$

$M_d = 0\ kNm$

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.

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

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

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

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

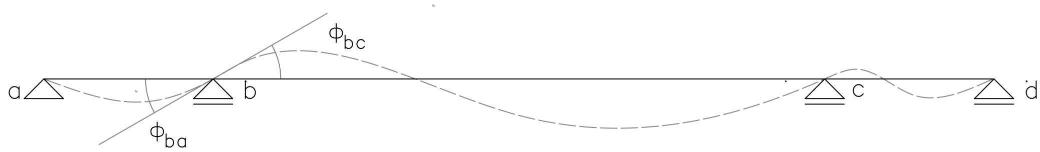
$$\varphi^q{}_{bc} = \varphi^q{}_{cb} = \frac{1}{24}\frac{qL_2{}^3}{EI_2} = \frac{89{,}2 * 88{,}5^3}{24 * 9{,}706 * 10^{11} * 2{,}139 * 10^{-4}} = 12{,}409 * 10^{-3}$$

φ_{xy} uhol medzi prútom a dotyčnicou ohybovej čiary od zaťaženia

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

β_{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:

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

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

5.3.3 Vnútorné 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.

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

Kde moment od spojitého zaťaženia

$$M^q = \frac{q{L_2}^2}{8} = \frac{89{,}2 * 88{,}5^2}{8} = 87\,329{,}588\ kNm$$

Posúvajúce sily

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

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

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

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

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

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

Kde reakcie od spojitého zaťaženia

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

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

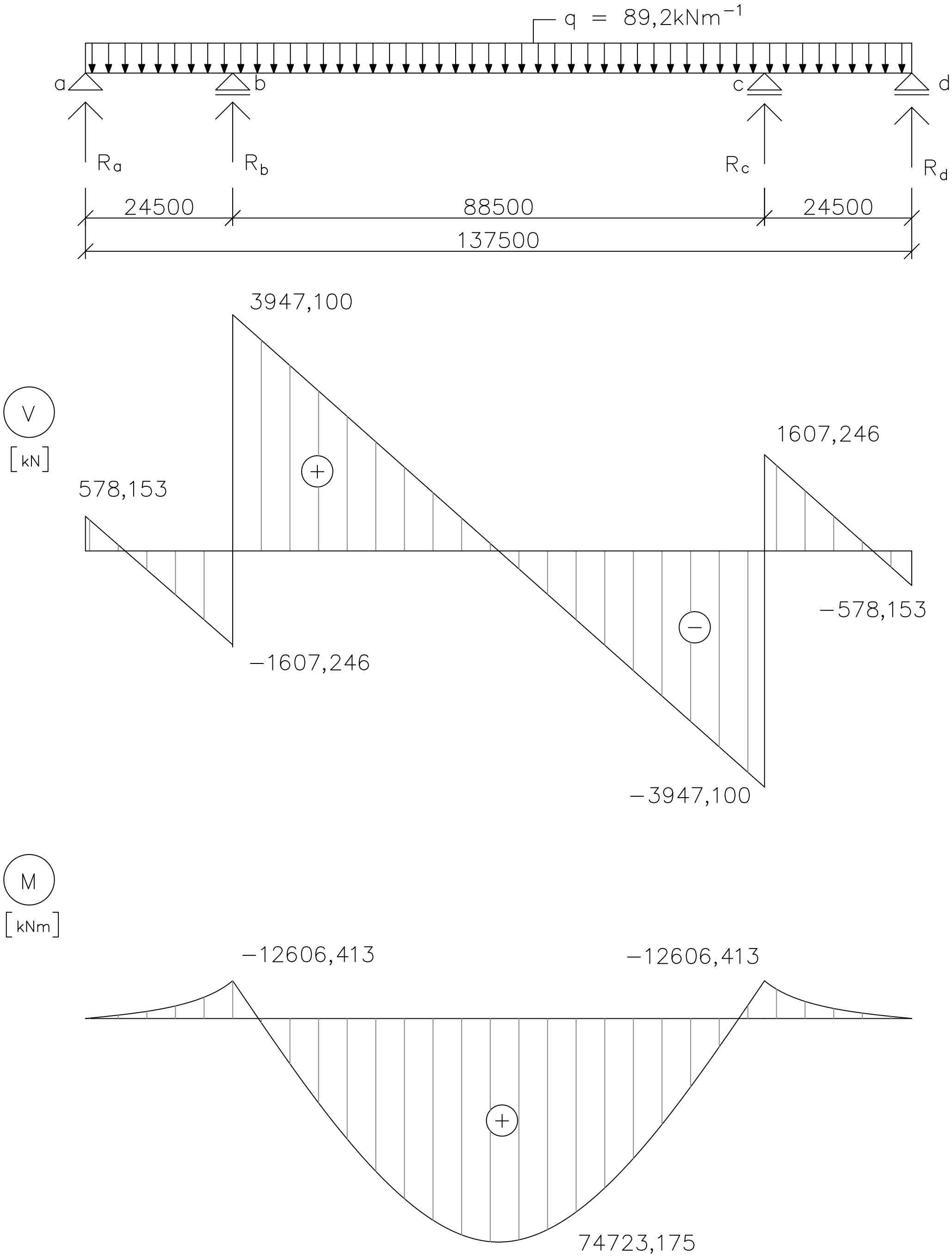
Reakcie

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

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

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

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



Obrázok 29: Priebeh 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 pootočenie. 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 matíc 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 pootočenie v druhom a treťom styčníku. Značíme φ_2 a φ_3.

5.4.2 Primárny stav

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

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 $\{\boldsymbol{S}\}$

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

$$[k_{12}] = [k_{12}{}^*] = \begin{bmatrix} u_1 & w_1 & \varphi_1 & u_2 & w_2 & \varphi_2 \\ \frac{+EA_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{-EA_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{+3EI_1}{L_1{}^3} & 0 & 0 & \frac{-3EI_1}{L_1{}^3} & \frac{-3EI_1}{L_1{}^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-EA_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{+EA_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-3EI_1}{L_1{}^3} & 0 & 0 & \frac{+3EI_1}{L_1{}^3} & \frac{+3EI_1}{L_1{}^2} \\ 0 & \frac{-3EI_1}{L_1{}^2} & 0 & 0 & \frac{+3EI_1}{L_1{}^2} & \frac{+3EI_1}{L_1} \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \bar{X}_1 \\ \bar{Z}_1 \\ \bar{M}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \bar{Z}_2 \\ \bar{M}_2 \end{matrix}$$

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

Prút 2-3

$$
[k_{23}] = [k_{23}{}^{*}] =
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} u_2 & w_2 & \varphi_2 & u_3 & w_3 & \varphi_3 \end{array} \\
\begin{bmatrix}
\frac{+EA_2}{L_2} & 0 & 0 & \frac{-EA_2}{L_2} & 0 & 0 \\
0 & \frac{+12EI_2}{L_2{}^3} & \frac{-6EI_2}{L_2{}^2} & 0 & \frac{-12EI_2}{L_2{}^3} & \frac{-6EI_2}{L_2{}^2} \\
0 & \frac{-6EI_2}{L_2{}^2} & \frac{+4EI_2}{L_2} & 0 & \frac{+6EI_2}{L_2{}^2} & \frac{+2EI_2}{L_2} \\
\frac{-EA_2}{L_2} & 0 & 0 & \frac{+EA_2}{L_2} & 0 & 0 \\
0 & \frac{+12EI_2}{L_2{}^3} & \frac{+6EI_2}{L_2{}^2} & 0 & \frac{+12EI_2}{L_2{}^3} & \frac{+6EI_2}{L_2{}^2} \\
0 & \frac{-6EI_2}{L_2{}^2} & \frac{+2EI_2}{L_2} & 0 & \frac{+6EI_2}{L_2{}^2} & \frac{+4EI_2}{L_2}
\end{bmatrix}
\end{array}
\begin{array}{c} \\ \bar{X}_2 \\ \bar{Z}_2 \\ \bar{M}_2 \\ \bar{X}_3 \\ \bar{Z}_3 \\ \bar{M}_3 \end{array}
$$

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

Prút 3-4

$$
[k_{34}] = [k_{34}{}^{*}] =
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} u_3 & w_3 & \varphi_3 & u_4 & w_4 & \varphi_4 \end{array} \\
\begin{bmatrix}
\frac{+EA_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{-EA_1}{L_1} & 0 & 0 \\
0 & \frac{+3EI_1}{L_1{}^3} & \frac{-3EI_1}{L_1{}^2} & 0 & \frac{-3EI_1}{L_1{}^3} & 0 \\
0 & \frac{-3EI_1}{L_1{}^2} & \frac{+3EI_1}{L_1} & 0 & \frac{+3EI_1}{L_1{}^2} & 0 \\
\frac{-EA_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{+EA_1}{L_1} & 0 & 0 \\
0 & \frac{-3EI_1}{L_1{}^3} & \frac{+3EI_1}{L_1{}^2} & 0 & \frac{+3EI_1}{L_1{}^3} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\end{array}
\begin{array}{c} \\ \bar{X}_3 \\ \bar{Z}_3 \\ \bar{M}_3 \\ \bar{X}_4 \\ \bar{Z}_4 \\ \bar{M}_4 \end{array}
$$

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

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 neznámych a určíme hodnoty pootočení φ_2 a φ_3:

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

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

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

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

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

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

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

Prút 2-3

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

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

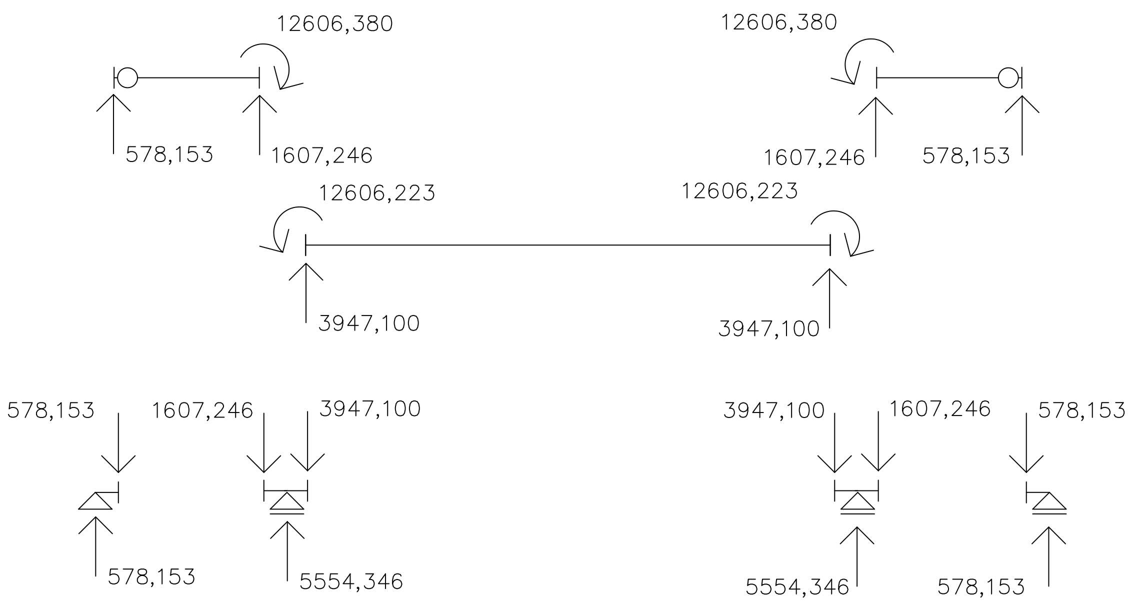
Prút 3-4

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

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

Reakcie

Výsledné reakcie môžeme získať pomocou nasledujúcej schémy na obrázku 23.[3]

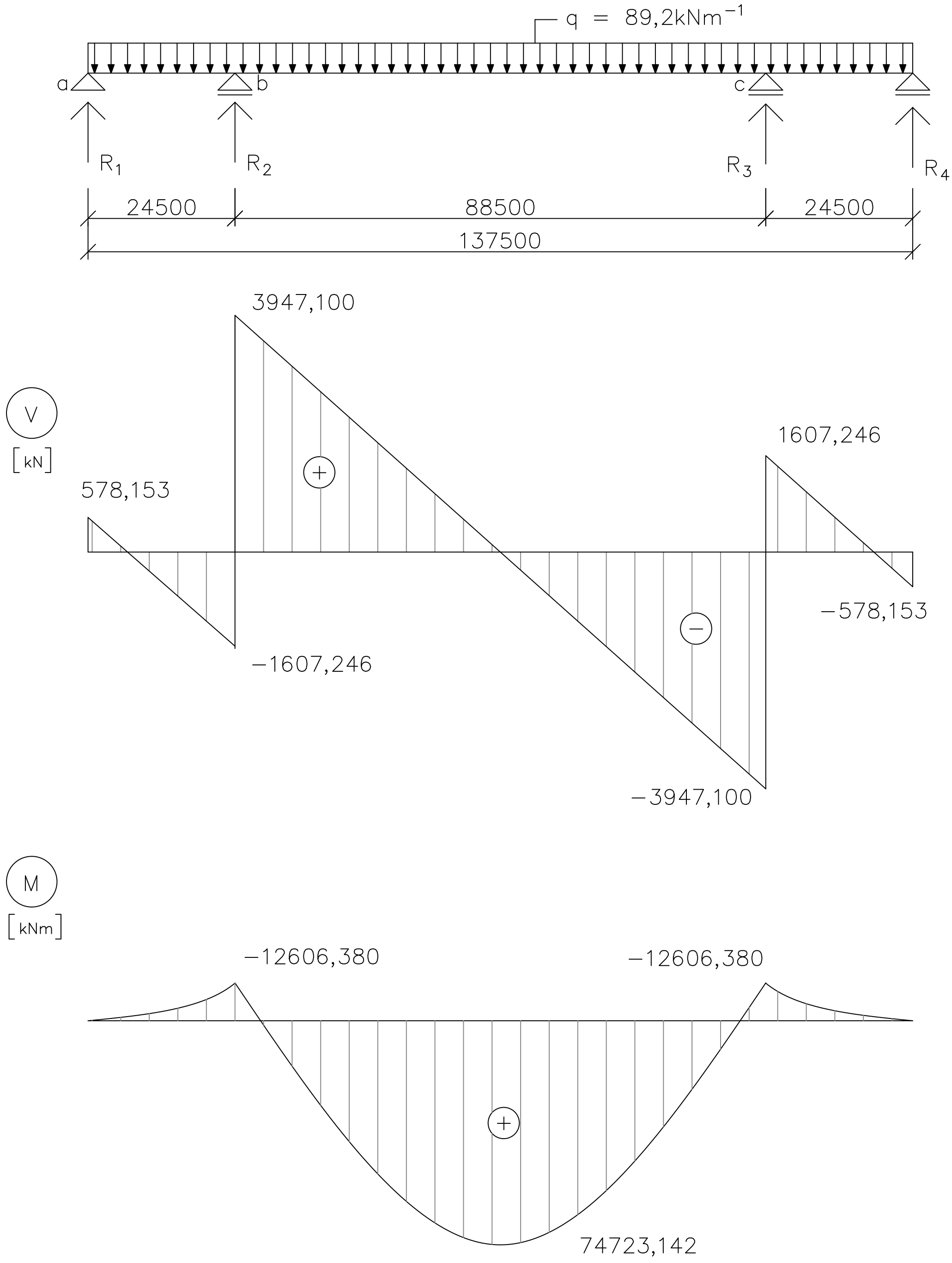


Obrázok 31: Reakcie deformačnej metódy, [4]

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

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

[3]Obrázok je inšpirovaný schémou z publikácie J. Kytýra, R. Gratza a spol.: Statika II. Řešené příklady, na strane 45.



Obrázok 32: Priebeh vnútorných síl získaných deformačnou metódou

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 prútovom modeli a to pomocou metódy silovej, metódy trojmomentových rovníc a metódou deformačnou.

Pre symetrickosť 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
∑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 oblúková 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 pootočenia 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 vypočítane softvérom. Z programu bolo následne možné odčítať priebehy vnútorných síl.

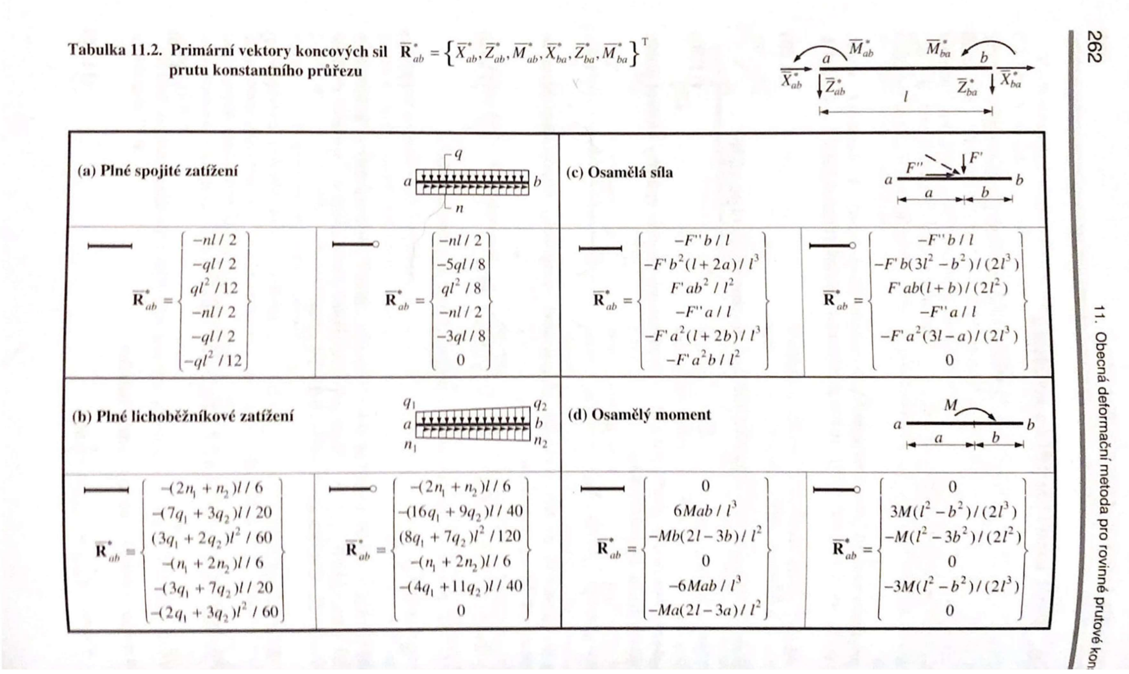
Vo výpočtovom programe sme takýto model posúdili na medzné stavy a zistili sme že konštrukcia nevyhovuje na medzný stav únosnosti.

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 možne 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 porovnania 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



262

Tabulka 11.2. Primární vektory koncových sil prutu konstantního průřezu $\overline{\mathbf{R}}^*_{ab} = \left\{\overline{X}^*_{ab}, \overline{Z}^*_{ab}, \overline{M}^*_{ab}, \overline{X}^*_{ba}, \overline{Z}^*_{ba}, \overline{M}^*_{ba}\right\}^{\mathrm{T}}$

(a) Plné spojité zatížení

$$\overline{\mathbf{R}}^*_{ab} = \begin{Bmatrix} -nl/2 \\ -ql/2 \\ ql^2/12 \\ -nl/2 \\ -ql/2 \\ -ql^2/12 \end{Bmatrix} \qquad \overline{\mathbf{R}}^*_{ab} = \begin{Bmatrix} -nl/2 \\ -5ql/8 \\ ql^2/8 \\ -nl/2 \\ -3ql/8 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

(b) Plné lichoběžníkové zatížení

$$\overline{\mathbf{R}}^*_{ab} = \begin{Bmatrix} -(2n_1+n_2)l/6 \\ -(7q_1+3q_2)l/20 \\ (3q_1+2q_2)l^2/60 \\ -(n_1+2n_2)l/6 \\ -(3q_1+7q_2)l/20 \\ -(2q_1+3q_2)l^2/60 \end{Bmatrix} \qquad \overline{\mathbf{R}}^*_{ab} = \begin{Bmatrix} -(2n_1+n_2)l/6 \\ -(16q_1+9q_2)l/40 \\ (8q_1+7q_2)l^2/120 \\ -(n_1+2n_2)l/6 \\ -(4q_1+11q_2)l/40 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

(c) Osamělá síla

$$\overline{\mathbf{R}}^*_{ab} = \begin{Bmatrix} -F''b/l \\ -F'b^2(l+2a)/l^3 \\ F'ab^2/l^2 \\ -F''a/l \\ -F'a^2(l+2b)/l^3 \\ -F'a^2b/l^2 \end{Bmatrix} \qquad \overline{\mathbf{R}}^*_{ab} = \begin{Bmatrix} -F''b/l \\ -F'b(3l^2-b^2)/(2l^3) \\ F'ab(l+b)/(2l^2) \\ -F''a/l \\ -F'a^2(3l-a)/(2l^3) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

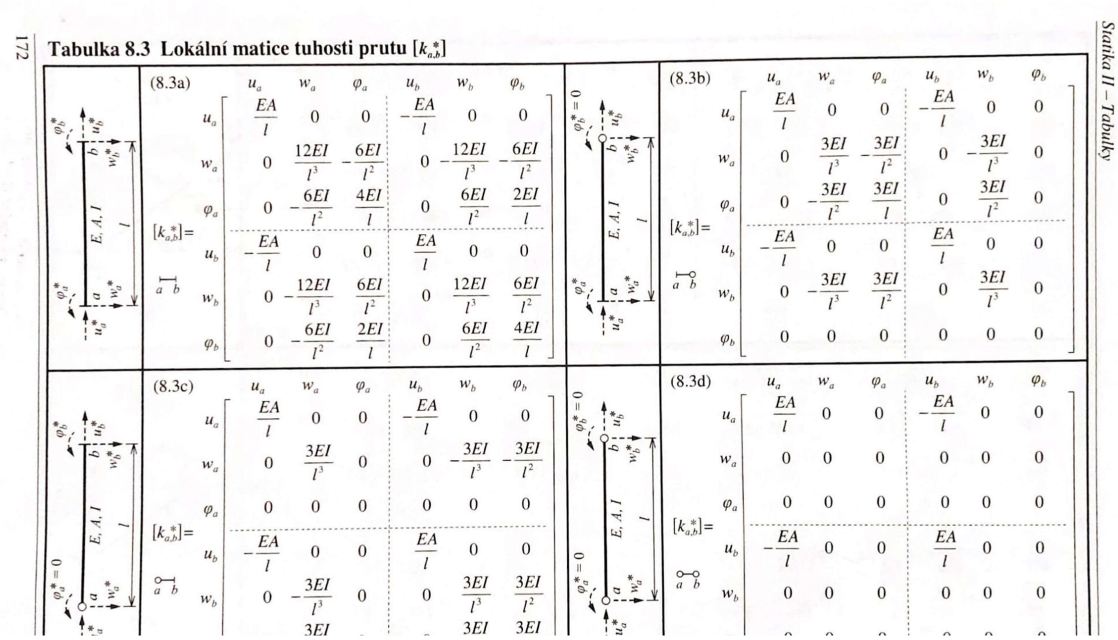
(d) Osamělý moment

$$\overline{\mathbf{R}}^*_{ab} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 6Mab/l^3 \\ -Mb(2l-3b)/l^2 \\ 0 \\ -6Mab/l^3 \\ -Ma(2l-3a)/l^2 \end{Bmatrix} \qquad \overline{\mathbf{R}}^*_{ab} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 3M(l^2-b^2)/(2l^3) \\ -M(l^2-3b^2)/(2l^2) \\ 0 \\ -3M(l^2-b^2)/(2l^3) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

11. Obecná deformační metoda pro rovinné prutové kon

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

Príloha 2



172

Tabulka 8.3 Lokální matice tuhosti prutu $[k^*_{a,b}]$

(8.3a)

$$[k^*_{a,b}] = \begin{array}{c|cccccc} & u_a & w_a & \varphi_a & u_b & w_b & \varphi_b \\ \hline u_a & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ w_a & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \varphi_a & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ u_b & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ w_b & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ \varphi_b & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{array}$$

(8.3b)

$$[k^*_{a,b}] = \begin{array}{c|cccccc} & u_a & w_a & \varphi_a & u_b & w_b & \varphi_b \\ \hline u_a & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ w_a & 0 & \frac{3EI}{l^3} & -\frac{3EI}{l^2} & 0 & -\frac{3EI}{l^3} & 0 \\ \varphi_a & 0 & -\frac{3EI}{l^2} & \frac{3EI}{l} & 0 & \frac{3EI}{l^2} & 0 \\ u_b & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ w_b & 0 & -\frac{3EI}{l^3} & \frac{3EI}{l^2} & 0 & \frac{3EI}{l^3} & 0 \\ \varphi_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

(8.3c)

$$[k^*_{a,b}] = \begin{array}{c|cccccc} & u_a & w_a & \varphi_a & u_b & w_b & \varphi_b \\ \hline u_a & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ w_a & 0 & \frac{3EI}{l^3} & 0 & 0 & -\frac{3EI}{l^3} & -\frac{3EI}{l^2} \\ \varphi_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_b & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ w_b & 0 & -\frac{3EI}{l^3} & 0 & 0 & \frac{3EI}{l^3} & \frac{3EI}{l^2} \end{array}$$

(8.3d)

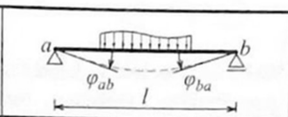
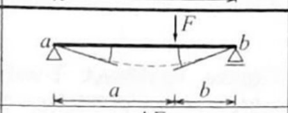
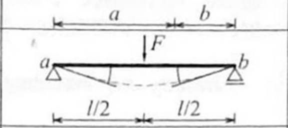
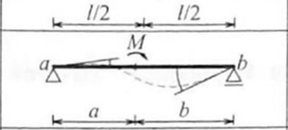
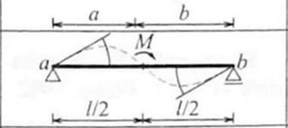
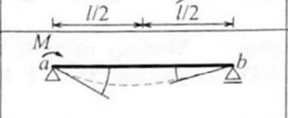
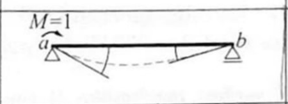
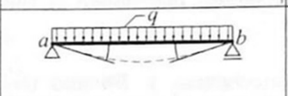
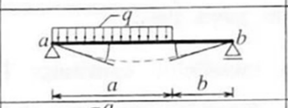
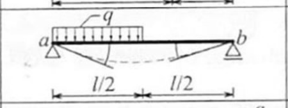
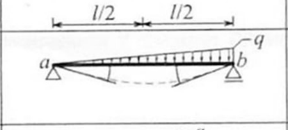
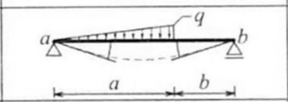
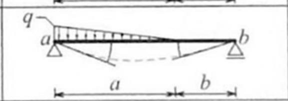
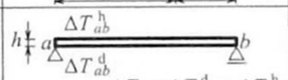
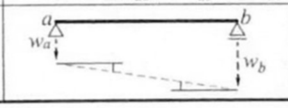
$$[k^*_{a,b}] = \begin{array}{c|cccccc} & u_a & w_a & \varphi_a & u_b & w_b & \varphi_b \\ \hline u_a & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ w_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_b & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ w_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Statika II – Tabulky

Obrázok 34: Lokálne matice tuhosti, [3]

Príloha 3

Tabulka 5.2 Pootočení u prostého nosníku konstantní ohybové tuhosti

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

Obrázok 35: Pootočenia 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 1D: 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

Dílčí souč. spolehlivosti	
γ_{M0} pro únosnost průřezu	1,00
γ_{M1} pro stabilitu	1,00
γ_{M2} pro únosnost čistého 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	$V_{z,Ed}$	14,11	kN
Kroucení	T_{Ed}	-0,68	kNm
Ohybový moment	$M_{y,Ed}$	22,62	kNm
Ohybový moment	$M_{z,Ed}$	12,63	kNm

Klasifikace pro návrh průřezu
Klasifikace podle 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

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	m²
Plastická tahová únosnost	$N_{pl,Rd}$	347,19	kN
Mezní tahová únosnost	$N_{u,Rd}$	345,04	kN
Tahová únosnost	$N_{t,Rd}$	345,04	kN
Jedn. posudek		**1,89**	-

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

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

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

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

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	m³
Pružný ohybový moment	$M_{el,y,Rd}$	10,60	kNm
Jedn. posudek		**2,13**	-

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

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

Posudek ohybového momentu pro M_z
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	$W_{el,z,min}$	2,9850e-05	m^3
Pružný ohybový moment	$M_{el,z,Rd}$	10,60	kNm
Jedn. posudek		**1,19**	-

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

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

Posudek smyku pro V_y
Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 a rovnice (6.17)

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

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{6,2261 \cdot 10^{-4}[m^2] \times \frac{355,0[MPa]}{\sqrt{3}}}{1,00} = 127,61[kN] \quad \text{(EC3-1-1: 6.18)}$$

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

Posudek smyku pro V_z
Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 a rovnice (6.17)

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

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{6,2261 \cdot 10^{-4}[m^2] \times \frac{355,0[MPa]}{\sqrt{3}}}{1,00} = 127,61[kN] \quad \text{(EC3-1-1: 6.18)}$$

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

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

Index vlákna	Vlákno	1	
Celkový kroutící moment	τ_{Ed}	11,2	MPa
Pružná smyková únosnost	τ_{Rd}	205,0	MPa
Jedn. posudek		0,05	-

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

$$\tau_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \times \gamma_{M0}} = \frac{355,0[MPa]}{\sqrt{3} \times 1,00} = 205,0[MPa]$$

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

Kombinovaný posudek smyku a kroucení pro V_y a $\tau_{t,Ed}$
Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 & 6.2.7 a rovnice (6.25), (6.28)

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

$$V_{pl,T,y,Rd} = \left(1 - \frac{\tau_{t,Ed} \times \gamma_{M0} \times \sqrt{3}}{f_y}\right) \times V_{pl,y,Rd} = \left(1 - \frac{11,2[MPa] \times 1,00 \times \sqrt{3}}{355,0[MPa]}\right) \times 127,61[kN] = 120,66[kN] \quad \text{(EC3-1-1: 6.28)}$$

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

Kombinovaný posudek smyku a kroucení pro V_z a $\tau_{t,Ed}$
Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 & 6.2.7 a rovnice (6.25), (6.28)

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

$$V_{pl,T,z,Rd} = \left(1 - \frac{\tau_{t,Ed} \times \gamma_{M0} \times \sqrt{3}}{f_y}\right) \times V_{pl,z,Rd} = \left(1 - \frac{11,2[MPa] \times 1,00 \times \sqrt{3}}{355,0[MPa]}\right) \times 127,61[kN] = 120,66[kN] \quad \text{(EC3-1-1: 6.28)}$$

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

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 vlákna	Vlákno	20	
Normálové 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	$\sigma_{tot,Ed}$	-1522,1	MPa
Jedn. posudek		**4,29**	-

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

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

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

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

$$\text{Jedn. posudek} = \frac{|\sigma_{tot,Ed}|}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{|-1522,1[MPa]|}{\frac{355,0[MPa]}{1,00}} = \mathbf{4,29 > 1,00}$$ (EC3-1-1: 6.42)

Prvek nesplňuje podmínky posudku průřezu!

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

Klasifikace pro návrh dílce na vzpěr
Rozhodující poloha pro klasifikaci stability: 0,000 m
Klasifikace podle 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

Průřez je klasifikován třídou 3

Posudek klopení
Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.2.1
Poznámka: Průřez se týká kruhové trubky, která není náchylná ke klopení.

Prvek splňuje podmínky stabilitního posudku.

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

EC-EN 1993 Posudek oceli MSP

Lineární výpočet
Kombinace: MSP-Char (auto)
Souřadný systém: Hlavní
Extrém 1D: Globální
Výběr: Vše
Celkový posudek

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

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

Obrázok 39: Posúdenie konštrukcie 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: Doplňujúce 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: Pootočenia 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.