



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TELES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# DEFORMAČNĚ NAPĚŤOVÉ STAVY MOSTOVÉ KONSTRUKCE PŘI PRŮJEZDU VLAKOVÉ SOUPRAVY

STRESS - STRAIN ANALYSIS OF BRIDGE STRUCTURE DURING THE TRAIN PASSAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MATEJ KOLÁRIK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PETR SKALKA, Ph.D.



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE**

student(ka): Matej Kolárik

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a Zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Deformačně napěťové stavy mostové konstrukce při průjezdu vlakové soupravy**

v anglickém jazyce:

#### **Stress - strain analysis of bridge structure during the train**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řešení bude realizováno jako simulační výpočtové modelování deformačně-napěťových stavů mostové konstrukce při průjezdu vlakové soupravy s uvážením různých silových zatížení od jednotlivých náprav vlakové soupravy.

Cíle bakalářské práce:

Vytvoření výpočtového modelu železničního mostu a určení deformačně-napěťových stavů mostu při průjezdu vlakové soupravy.

Seznam odborné literatury:

PETRUŠKA, J.: Počítačové metody mechaniky - Metoda konečných prvků. Studijní opory [online]. 2003. Dostupný z www:  
[http://www.umt.fme.vutbr.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=79&Itemid=37](http://www.umt.fme.vutbr.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=79&Itemid=37)

Janiček, P., Ondráček, E., Vrbka, J.: Pružnost a pevnost I, Brno 1992. Studijní opory [online]. Dostupný z www:  
[http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/Pruznost\\_pevnost\\_1\\_Janicek\\_Ondracek\\_Vrbka.pdf](http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/Pruznost_pevnost_1_Janicek_Ondracek_Vrbka.pdf)

Vlk, M., Florián, Z.: Mezní stavy a spolehlivost, Brno 2007. Studijní opory [online]. Dostupný z www:  
<http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>

Petruška, J.: MKP v inženýrských výpočtech. Studijní opory [online]. Dostupný z www:  
<http://www.umt.fme.vutbr.cz/cz/studium/studijni-materialy.html>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Skalka, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 25.10.2011

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Táto bakalárska práca sa zaoberá určením deformačne-napät'ových stavov železničného mostu v Komárove pri prejazde vlakovej súpravy. Úloha bola riešená v programe ANSYS metódou konečných prvkov.

Do úvahy bol braný nezatažený stav, stav pri zatažení vlakovou súpravou a detailne bol pozorovaný súvislý prejazd Motorového vozu 810. Zo série výpočtov bol následne určený najnebezpečnejší stav a vypočítané bezpečnosti.

## **Summary**

The bachelor's thesis concerns the stress-strain determination of the rail bridge in Komárov during the train crossing. The task was solved in the program ANSYS which uses the finite element analysis.

The following factors were taken into consideration: a non-loaded state, the state of a train assembly load, and detailed observation of a continual crossing of diesel train. Following the series of results the most dangerous state was defined and the safety calculated.

## **Klíčové slová**

ocel'ový železničný most, deformačne-napät'ová analýza, dolná mostovka, MKP

## **Keywords**

steel rail bridge, stress-strain analysis, down bridge deck, FEA



## **Bibliografická citácia**

KOLÁRIK, M. *Deformačně napěťové stavy mostové konstrukce při průjezdu vlakové soupravy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 27 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Skalka, Ph.D..





Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne a v zozname literatúry som uviedol všetky informačné zdroje, ktoré som použil.

Brno 24. mája 2012

.....



Ďakujem môjmu vedúcemu pánovi Ing. Petrovi Skalkovi Ph.D. za jeho rady a prístup, vďaka ktorému bola táto práca viac ako len obyčajnou povinnosťou. Takisto ďakujem všetkým, ktorí mi akýmkoľvek spôsobom s touto prácou pomohli, je vás mnoho.



## Obsah

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod .....</b>                                 | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Problém.....</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>3</b> | <b>Ciele riešenia.....</b>                        | <b>3</b>  |
| <b>4</b> | <b>Rešeršná štúdia.....</b>                       | <b>4</b>  |
| <b>5</b> | <b>Teória .....</b>                               | <b>6</b>  |
|          | 5.1 Redukované napätie HMM.....                   | 6         |
|          | 5.2 Redukované napätie MOS .....                  | 6         |
|          | 5.3 Priečinkové čiary - analytické riešenie ..... | 7         |
| <b>6</b> | <b>Výpočtové modelovanie .....</b>                | <b>9</b>  |
|          | 6.1 Model materiálu .....                         | 9         |
|          | 6.2 Model geometrie .....                         | 9         |
|          | 6.3 Model okrajových podmienok .....              | 11        |
|          | 6.4 Model zaťaženia.....                          | 12        |
|          | 6.4.1 Súprava .....                               | 12        |
|          | 6.4.2 Motorový voz.....                           | 13        |
|          | 6.5 Nastavenie riešiča .....                      | 13        |
| <b>7</b> | <b>Výsledky výpočtového modelovania.....</b>      | <b>14</b> |
|          | 7.1 Porovnanie veľkých a malých deformácií .....  | 14        |
|          | 7.2 Nezaťažený stav .....                         | 15        |
|          | 7.2.1 Deformácia.....                             | 15        |
|          | 7.2.2 Napätie .....                               | 16        |
|          | 7.3 Zaťaženie súpravou.....                       | 18        |
|          | 7.3.1 Deformácia.....                             | 18        |
|          | 7.3.2 Napätie .....                               | 19        |
|          | 7.4 Zaťaženie Motorovým vozom 810 .....           | 19        |
|          | 7.4.1 Deformácia.....                             | 19        |
|          | 7.3.2 Napätie .....                               | 21        |
| <b>8</b> | <b>Záver .....</b>                                | <b>22</b> |
|          | <b>Zoznam použitej literatúry .....</b>           | <b>24</b> |
|          | <b>Zoznam použitých skratiek a symbolov.....</b>  | <b>25</b> |
|          | <b>Zoznam obrázkov.....</b>                       | <b>26</b> |
|          | <b>Zoznam tabuliek.....</b>                       | <b>26</b> |
|          | <b>Zoznam grafov .....</b>                        | <b>27</b> |
|          | <b>Prílohy .....</b>                              | <b>27</b> |



# 1 Úvod



Obr. 1-1 Riešený železničný most

Most, ktorý je analyzovaný v tejto práci, sa nachádza v brnenskej mestskej časti Komárov, kde spája brehy rieky Svitavy. Je to jednosmerný železničný priehradový most s dolnou mostovkou, ktorý bol vyrobený v roku 1926 Šenovskými strojárňami [1]. Jeho celková dĺžka predstavuje 35 metrov, šírka 5,7 metra a výška 3,5 metra. Váha sa pohybuje v okolí 80-tich ton. Nakoľko železničná trať nie je orientovaná voči korytu rieky kolmo, jednotlivé kraje sú voči sebe posunuté.

## 2 Problém

Z dôvodu možnej rekonštrukcie mostu v Komárove je nutné poznať jeho deformačne-napät'ové stavy pri prejazde vlakovej súpravy.

## 3 Ciele riešenia

Vytvorenie výpočtového modelu železničného mostu a určenie deformačne-napät'ových stavov pri prejazde vlakovej súpravy.

Na základe výsledkov bude rozhodnuté o prípadných úpravách určitých častí konštrukcie, ktoré by mohli dosahovať nižších bezpečností. Tento stav je teoreticky možný, nakoľko v čase projektovania mostu sa výpočty robili analyticky, a teda zo značným zjednodušením. Výstupy môžu na druhú stranu odhaliť aj prípadné predimenzovanie konštrukcie z rovnakého dôvodu. V tomto prípade by bolo navýšené prípustné zaťaženie.

## 4 Rešeršná štúdia

Železničné mosty môžu byť delené podľa rôznych kritérií. Najčastejšie je to podľa materiálu a polohy mostovky.

### ▪ delenie podľa materiálu

- *kamenný most*  
tento typ mostov je najstarší



Obr. 4-1 Kamenný most v Strakoniciach [2]

- *betónový most*  
nevýhodou týchto mostov je ich vysoká citlivosť na dynamické zaťažovanie, prečo musia byť navrhované na väčšiu hrúbku, čím sa nutne zvyšuje ich hmotnosť



Obr. 4-2 Betónový most v Brne Černoviciach [3]

- *ocel'ový most*  
v dnešnej dobe sú tieto typy mostov najpoužívanejšie vďaka dobému pomeru váhy a pevnosti a možnosti jednoduchej výmeny poškodených častí



Obr. 4-3 Ocel'ový most v Prahe [4]



▪ **delenie podľa polohy mostovky**

- *mosty s hornou mostovkou* často používané pri betónových konštrukciách; vyžadujú veľkú stavebnú výšku, čo ich použitie značne obmedzuje



Obr. 4-4 Most s hornou mostovkou v Plzni [5]

- *mosty s dolnou mostovkou* najpoužívanejšie, a to nie len pri železničných mostoch; nenáročné na stavebnú výšku, jednoduchšie na údržbu



Obr. 4-5 Most s dolnou mostovkou v Prahe [6]

V závislosti na vzdialenosti, ktorá má byť preklenutá, môže byť prevedenie konštrukcie o jednom, resp. viacerých poliach. Pole je časť konštrukcie medzi dvomi podporami. Ak to podmienky dovoľujú, nad vzdialenosť 40 metrov sa preferuje použitie viacpoľových mostov z dôvodu väčšej pevnosti vďaka stredovým podperám.

V tejto práci je pozorovaný oceľový most s dolnou mostovkou o jednom poli.

## 5 Teória

### 5.1 Redukované napätie HMM

Redukované napätie [7] je fiktívne ťahové napätie priradené obecnej napätosti tak, že bezpečnosť voči medznému stavu pružnosti je rovnaká pre skutočnú obecnú napätosť aj pre fiktívnu ťahovú napätosť.

K medznému stavu plasticity podľa HMM dôjde, ak šmykové napätie v oktaedrickej rovine  $\tau_0$  dosiahne kritickú hodnotu  $\tau_{OK}$ , čo je materiálová charakteristika.

Redukované napätie HMM, nazývané aj redukované napätie von Misesa, sa pre obecnú trojosú napätosť vypočíta pomocou vzťahu:

$$\sigma_{red,HMM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (5.1)$$

Z výpočtovej stránky je toto kritérium zložitejšie ako podmienka maximálnych šmykových napätí, no pri použití techniky sa táto nevýhoda stráca.

Odporúča sa, aby bezpečnosť voči medznému stavu pružnosti dosahovala hodnoty 1,5÷3. Vypočíta sa podľa vzťahu:

$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red,HMM}} \quad (5.2)$$

### 5.2 Redukované napätie MOS

Podmienka krehkej pevnosti MOS [8] zahŕňa klasickú Mohrovu podmienku a podmienku maximálneho hlavného napätia. Matematicky to možno vyjadriť nasledovne:

$$\sigma_{red,MOS} = \max \{ \sigma_1 ; \sigma_1 - \kappa \cdot \sigma_3 \} \quad (5.3)$$

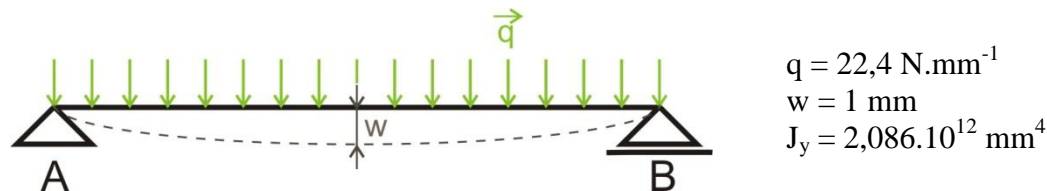
Čím viac sa napätosť blíži trojosej rovnomernej napätosti v ťahu, tým riziko tohto medzného stavu narastá. Naopak ak sa napätosť blíži k trojosej rovnomernej napätosti v tlaku, riziko klesá. Krehká pevnosť je dôležitá aj v prípade, ak je hlavné napätie väčšie ako redukované (napr. podľa HMM).

Odporúča sa, aby bezpečnosť voči medznému stavu krehkej pevnosti dosahovala hodnotu 10. Táto hodnota je proti bezpečnosti voči medznému stavu pružnosti vyššia, nakoľko v tomto prípade neexistuje rezerva pred porušením v plastickej oblasti. Vypočíta sa podľa vzťahu:

$$k_R = \frac{\sigma_{Rt}}{\sigma_{red,MOS}} \quad (5.4)$$

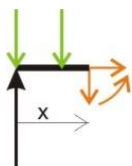
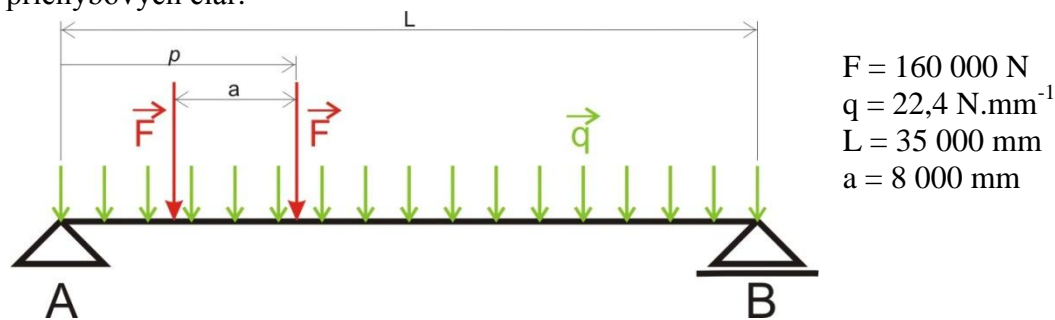
### 5.3 Priečinkové čiary - analytické riešenie

Priečinkové čiary sú charakteristiky, ktoré vyjadrujú prieťah istej trajektórie pri určitom uložení a zaťažení. Ich obálka predstavuje najnebezpečnejšie možné stavy v miestach pozdĺž celej trajektórie. Aby sa dali priečinkové čiary počítať analyticky, je vhodné zjednodušiť si konštrukciu na prut. Kvôli pracnosti bol uvažovaný prejazd len dvojnápravového motoráča. Hodnota prierezovej charakteristiky  $J_y$  bola dopočítaná z predpokladu jednotkového prieťahu pri zaťažení vlastnou tiažou.



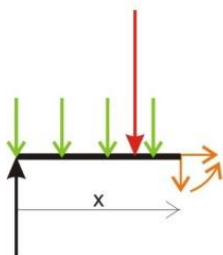
Obr. 5-1 Schéma pre výpočet  $J_y$

Úloha sa rozdelila na dva stavy: A) ak sa na moste vyskytuje len jedna náprava, B) ak sú na moste obe nápravy. Pre oba stavy boli napísané rovnice ohybového momentu pre príslušné intervaly (stav B) je znázornený na Obr. 5-2) a z nich následne rovnice prieťahových čiar.



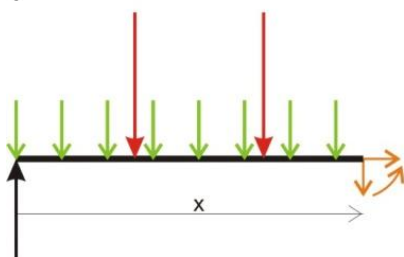
$$M_{O_I}(x) = F_A \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2}$$

$$x \in < 0 ; p - a$$



$$M_{O_{II}}(x) = F_A \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} - F \cdot (x - p + a)$$

$$x \in < p - a ; p$$



$$M_{O_{III}}(x) = F_A \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} - F \cdot (x - p + a) - F \cdot (x - p)$$

$$x \in < p ; L$$

Obr. 5-2 Ohybové momenty stavu B)

stav A)

$$w_I = \frac{1}{EJ_y} \left( \frac{q \cdot x^4}{24} - \frac{F_A \cdot x^3}{6} \right) + C_1 \cdot x + C_2 \quad (5.5)$$

$$w_{II} = \frac{1}{EJ_y} \left( \frac{q \cdot x^4}{24} + \frac{F \cdot x^3 - F_A \cdot x^3}{6} - \frac{F \cdot p \cdot x^2}{2} \right) + D_1 \cdot x + D_2 \quad (5.6)$$

stav B)

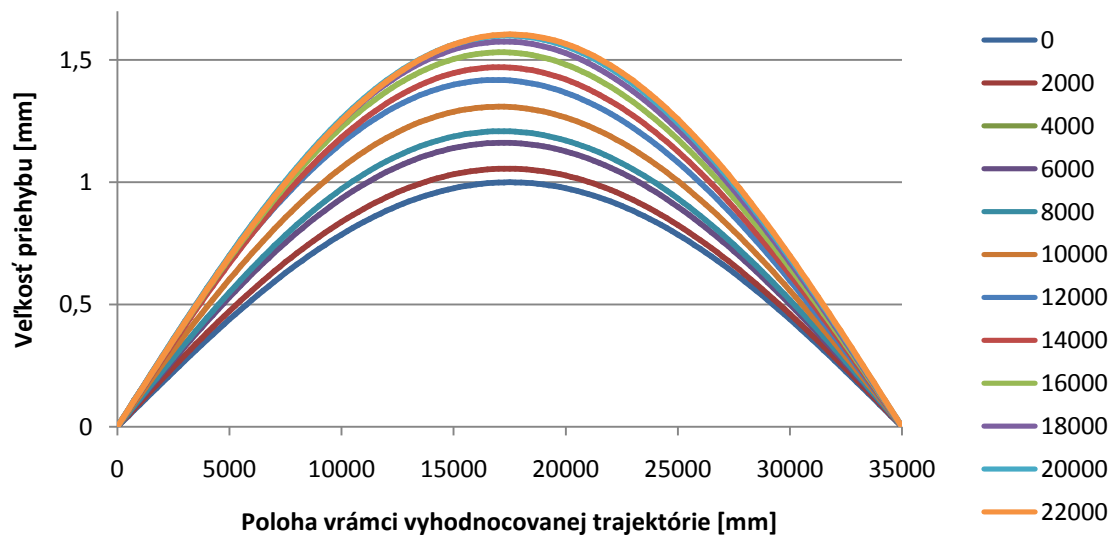
$$w_I = \frac{1}{EJ_y} \left( \frac{q \cdot x^4}{24} - \frac{F_A \cdot x^3}{6} \right) + C_1 \cdot x + C_2 \quad (5.7)$$

$$w_{II} = \frac{1}{EJ_y} \left( \frac{q \cdot x^4}{24} + \frac{F \cdot x^3 - F_A \cdot x^3}{6} + \frac{F \cdot a \cdot x^2 - F \cdot p \cdot x^2}{2} \right) + D_1 \cdot x + D_2 \quad (5.8)$$

$$w_{III} = \frac{1}{EJ_y} \left( \frac{q \cdot x^4}{24} + \frac{F \cdot x^3}{3} - \frac{F_A \cdot x^3}{6} + \frac{F \cdot a \cdot x^2}{2} - F \cdot p \cdot x^2 \right) + E_1 \cdot x + E_2 \quad (5.9)$$

Z okrajových podmienok, podmienok spojitosti a hladkosti boli pre konkrétne hodnoty parametra  $p$  (vzdialenosť prednej nápravy od začiatku mostu) dopočítané pomocou software-u Maple integračné konštanty.

Graf 5-1 zobrazuje vykreslené priebehy priečinkových čiar od nezaťaženeho stavu až po stav, keď je vzdialenosť prednej nápravy od začiatku mosta 22 metrov, čiže keď sa ťažisko motorárika nachádza nad stredom prutu. Tento stav predstavuje najnebezpečnejšiu pozíciu.



Graf 5-1 Analytické priečinkové čiar

## 6 Výpočtové modelovanie

### 6.1 Model materiálu

V práci boli uvažované materiály s lineárnym chovaním s danými vlastnosťami:

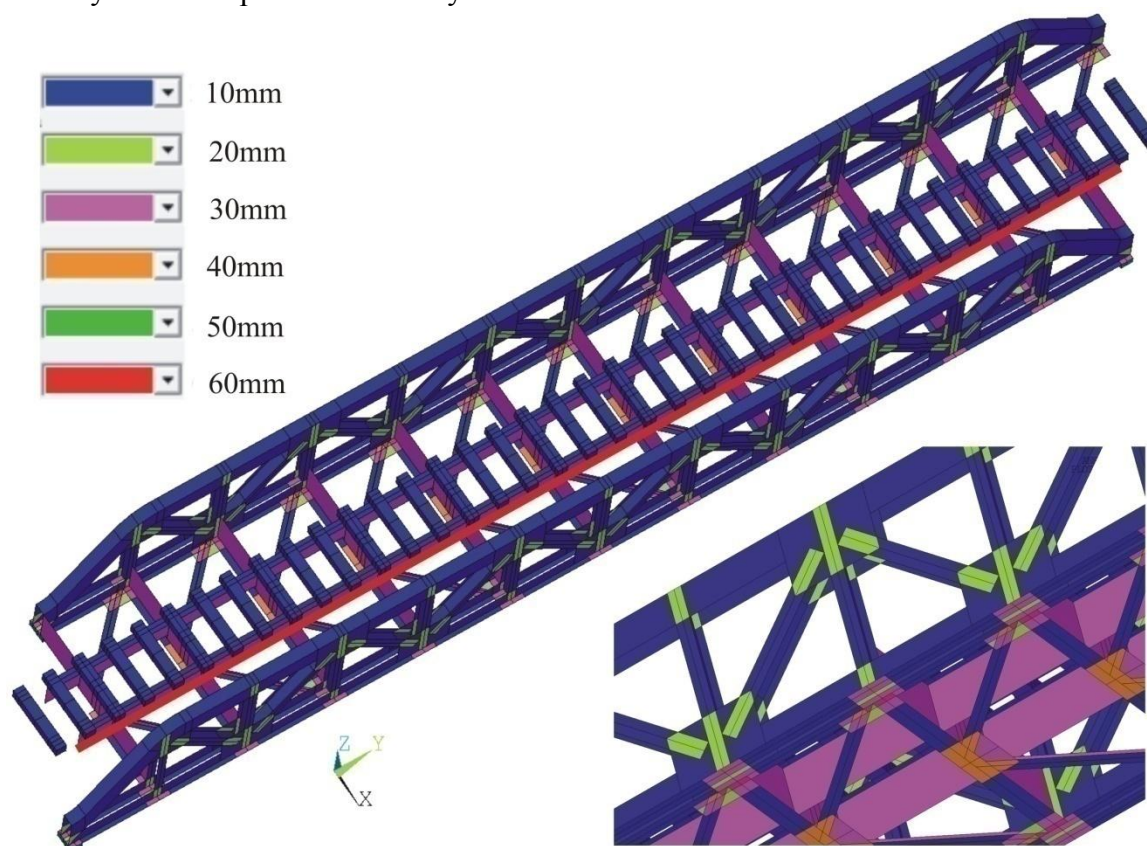
| materiál | Youngov modul pružnosti<br>E [GPa] | Poissonov pomer<br>$\mu$ [-] | hustota<br>$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] |
|----------|------------------------------------|------------------------------|--|
| ocel'    | 210                                | 0,3                          | 7850                                   |
| drevo    | 11                                 | 0,16                         | 700                                    |

Tab. 6-1 Modely materiálu

### 6.2 Model geometrie

Mostová konštrukcia je z prevažnej časti tvorená nitovanými hrubými plechmi, preto bolo modelovanie prevedené formou škrupín. Spájanie jednotlivých plechov sa riešilo priradením zodpovedajúcej hrúbky na konkrétne plochy modelu, čím sa úloha zjednodušila o modelovanie nitových spojov.

Na Obr. 6-1 je červenou čiarou znázornená trajektória (tzv. path), na ktorej sa budú vykresľovať priečinkové čiary.



Obr. 6-1 Zobrazenie podľa hrúbky

Je žiadúce, aby bola sieť čo najpravidelnejšia. Taktiež je vhodné čo najjemnejšie sieťovanie, hlavne s ohľadom na predpokladané miesta s koncentráciou napätia. To však súvisí so zvýšeným nárokom na výpočtový čas a hardware. Preto je výhodné použiť modifikácie tvaru kociek a štvorcov, ktoré majú pri rovnakom type prvku oproti tetraédrom a trojuholníkom vyššiu presnosť a stačí ich menší počet. Tieto výhody sú zaplatené vyššou pracnosťou pri zhotovovaní výslednej siete.

V tejto úlohe bola použitá výhradne len kvadratická modifikácia ako prvkov SHELL, BEAM tak i SOLID. Celkový počet použitých prvkov je 85 629 a uzlov 293 275.

- **koľajnica**

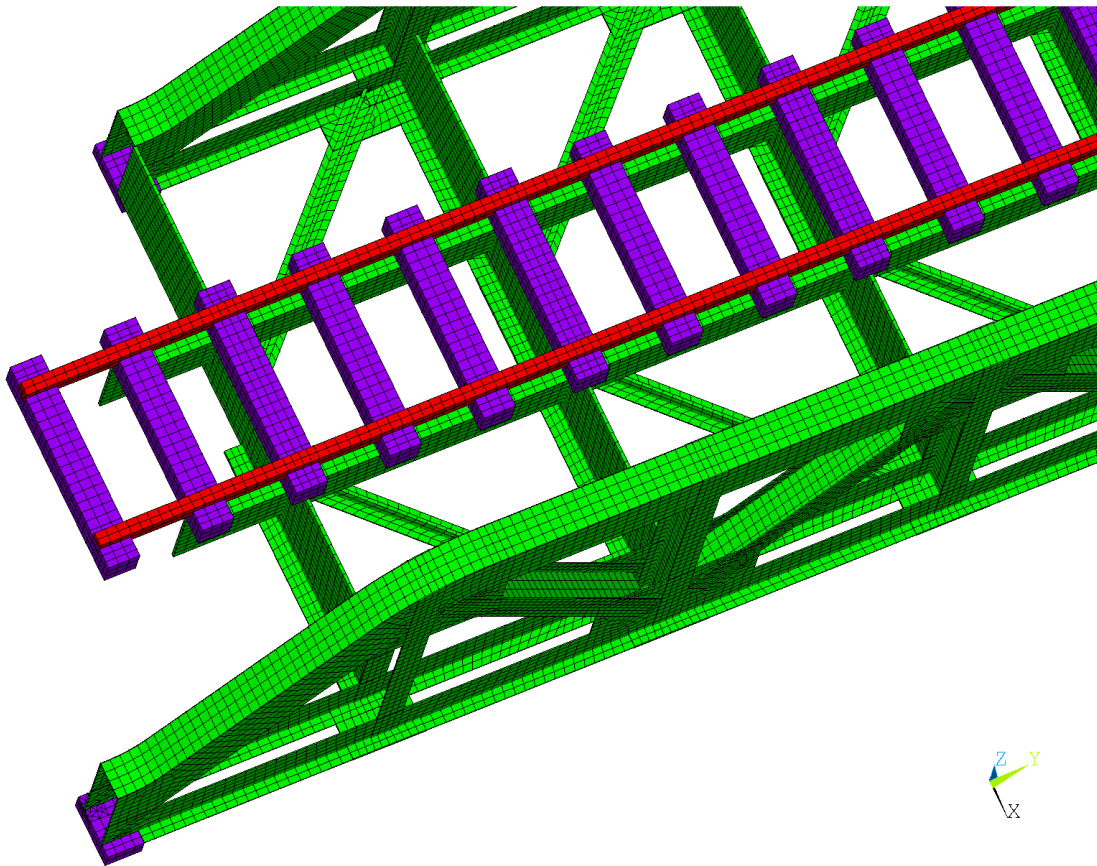
Prierez v dnešnej dobe u nás najpoužívanejšej koľajnice UIC60 bol podľa voľne prístupných výkresov vymodelovaný v programe Inventor, ktorý vypočítal prierezové charakteristiky, a tie boli priradené kvadratickému prvku BEAM189 (Obr. 6-2 červený).

- **podvaly**

Podvaly boli modelované pomocou 20-uzlového prvku SOLID186 (Obr. 6-2 fialový).

- **nosná konštrukcia**

K tvorbe siete samotného mostu bol použitý prvok SHELL281 (Obr. 6-2 zelený).



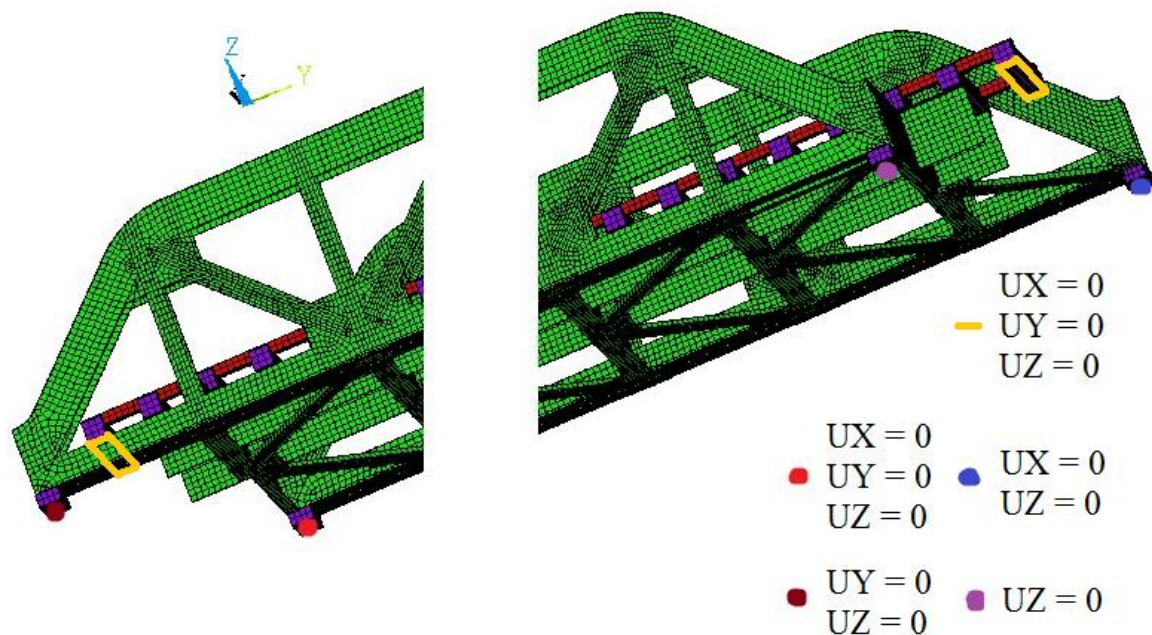
Obr. 6-2 Diskretizácia modelu geometrie železničného mostu

## 6.3 Model okrajových podmienok

Reálne je most uložený na 12 valcoch (v každom rohu na troch), ktoré môžu kompenzovať teplotnú dilatáciu či skrátenie vodorovnej zložky mostu pri prejazde vlaku (Obr. 6-3). Pri prejazde sa konštrukcia prehýba, a tak sa funkčnými stávajú len vnútorné 4 valce. Z predbežných výsledkov vyplynulo, že podstatný nie je len priehyb po dĺžke, ale aj po šírke. Most sa môže od valcov odvaľovať, preto boli podpory v konečnom dôsledku upravené z priamky len do jedného uzla na každú podporu, čo dobre odzrkadľuje realitu. Uzlom podstáv okrajových podvalov bol zabránený posuv vo všetkých osiach, čo malo simulovať pripojenie mosta cez koľajnice k pevným nadväzujúcim častiam železnice.



Obr. 6-3 Detail uloženia



Obr. 6-4 Model okrajových podmienok

## 6.4 Model zat'azenia

Vzhľadom k značným rozmerom konštrukcie bolo nutné brať do úvahy aj vlastnú tiaž mosta.

### 6.4.1 Súprava

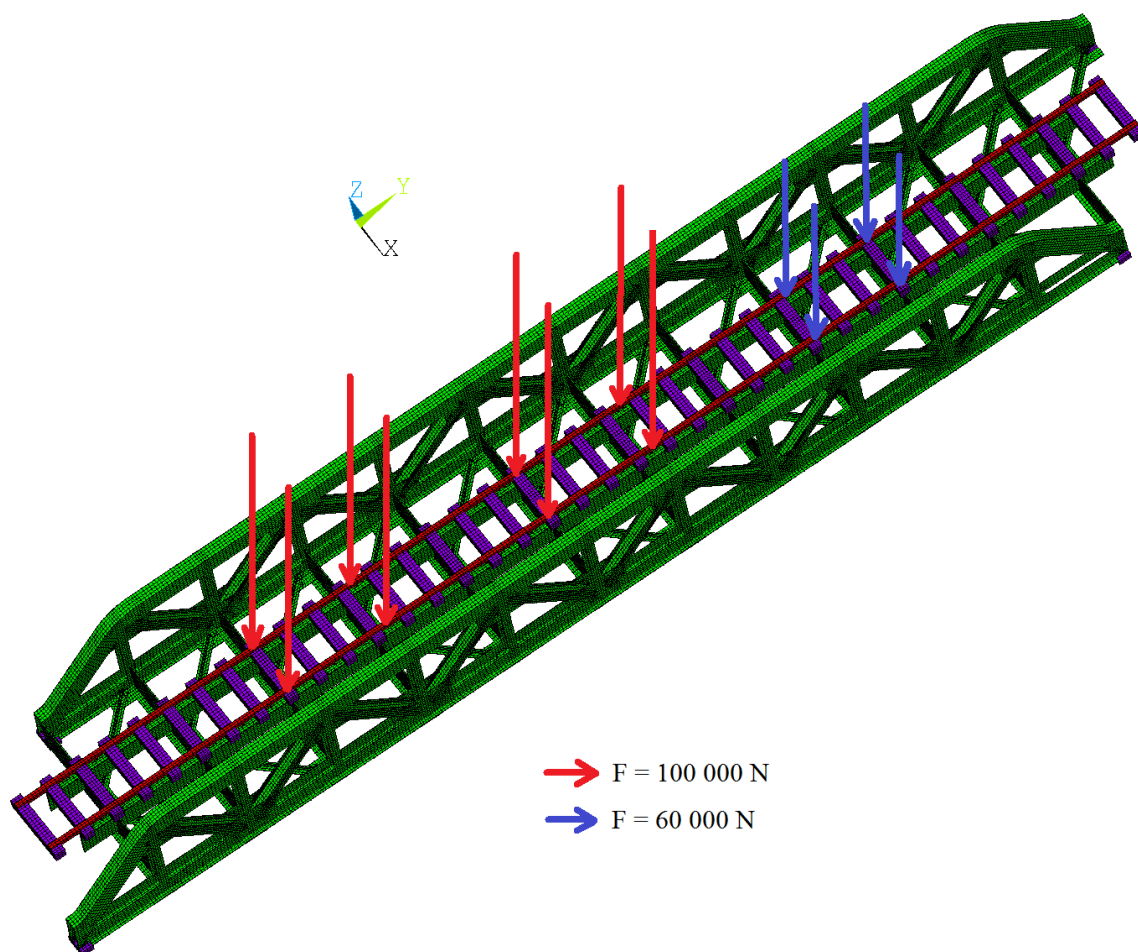


Obr. 6-5 Súprava [9]

Uvažovaná súprava pozostávala z bežne používanej lokomotívy 162 a osobného vozňa UIC 567-1, typ Y. Nakoľko rázvor jednotlivých kolies je značný, na moste sa súčasne nachádza len šesť dvojkolies.

Nakoľko lokomotíva je ťažšia a kratšia, najnebezpečnejšia alternatíva je na začiatku prejazdu, ak sa práve na moste

nachádza lokomotíva. Boli uvážené 4 stavy z prejazdu súpravy - v prvom bolo ťažisko lokomotívy nad geometrickým stredom mosta, v štvrtom bola predná náprava tesne pri konci. V jedinej tejto štvrtke konštelácií sa nachádza na konštrukcii sedem dvojkolies. Ostatné dva stavy boli umiestnené rovnomerne medzi okrajové dva.

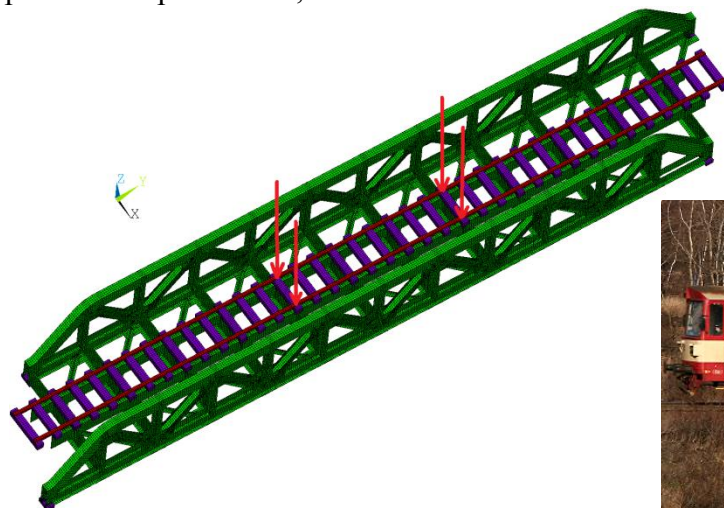


Obr. 6-6 Model zat'azenia mostu vlakovou súpravou



## 6.4.2 Motorový voz

Ako ďalší model bol zvolený Motorový voz 810 s váhou 32 ton, čiže 8 ton na koleso. Pre úplnú predstavu chovania mosta bola prevedená séria výpočtov simulujúca prejazd vlaku po krokoch približne 1,25 metra.



Obr. 6-8 Model zaťaženia mosta motorovým vozom



Obr. 6-7 Motorový voz 810 [10]

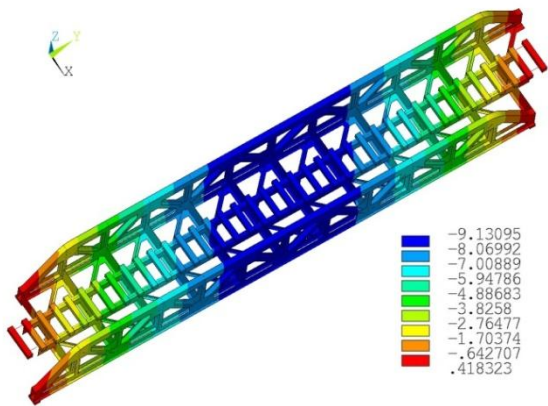
## 6.5 Nastavenie riešiča

Prvotne sa úloha riešila ako nelineárna s veľkými deformáciami. Riešenie sa skladalo z 10 substepov, čo bolo náročné na výpočtový čas. Pri porovnaní týchto výsledkov s lineárnym riešením s uvažovaním malých deformácií neboli zistené veľké rozdiely (viď 7.1 Porovnanie veľkých a malých deformácií), preto sa nasledujúce výpočty prevádzali pri tomto nastavení.

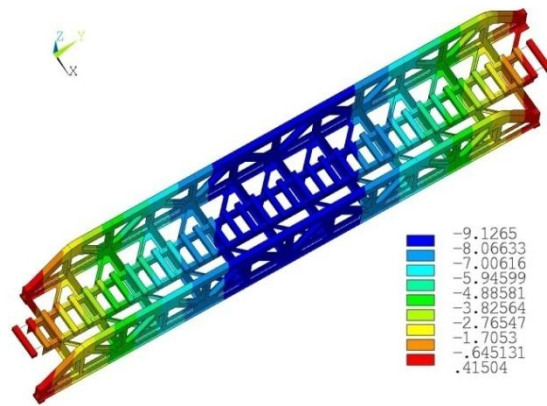
## 7 Výsledky výpočtového modelovania

### 7.1 Porovnanie veľkých a malých deformácií

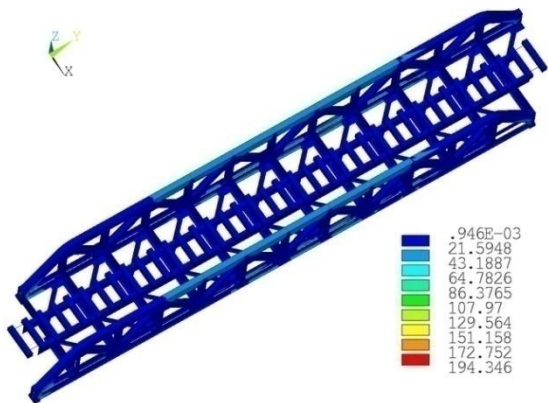
Rozdiely vo výsledkoch pri uvažovaní veľkých a malých deformácií sa pohybujú v rádoch stotín milimetrov, resp. jednotiek megapaskalov, čo konkrétne v tomto stave predstavuje odchýlku 0,05%, resp. 2,3%. Tieto odchýlky boli vyhodnotené ako zanedbateľné. Vďaka tomuto sa mohol mnohonásobne urýchliť výpočet a mohlo byť prevedených podstatne viac simulácií, čo v konečnom dôsledku spresnilo pohľad na chovanie mosta počas prejazdu.



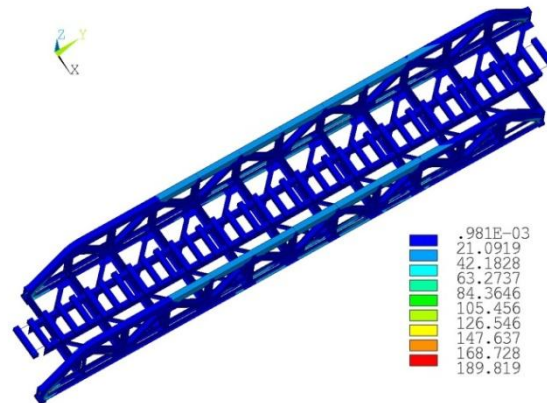
Obr. 7-1 Posuv UZ [mm] - veľké deformácie



Obr. 7-2 Posuv UZ [mm] - malé deformácie



Obr. 7-3 Ekvivalentné napätie SEQV [MPa] - malé def.

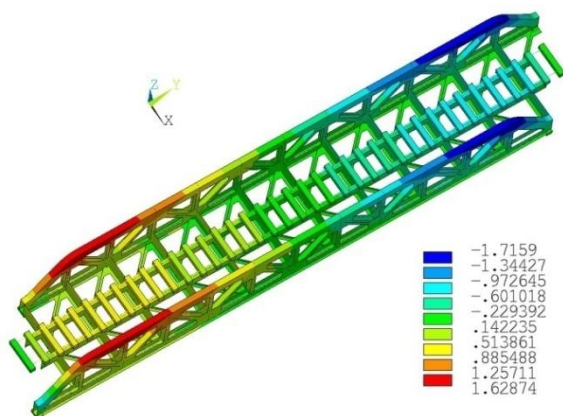


Obr. 7-4 Ekvivalentné napätie SEQV [MPa] - veľké def.

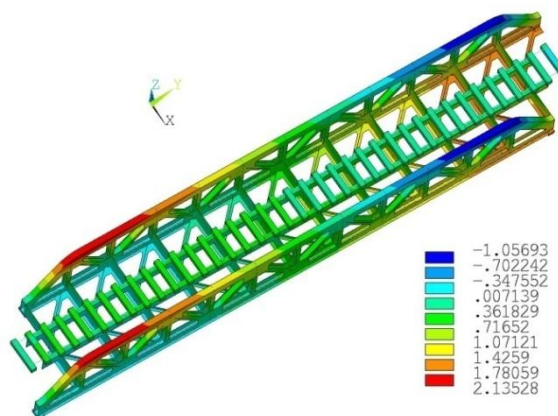
## 7.2 Nezaťažený stav

### 7.2.1 Deformácia

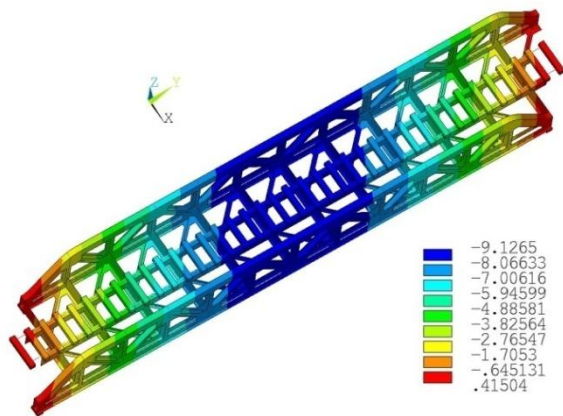
Pri uvažovaní len vlastnej tiaže mostovej konštrukcie dochádza k posuvu o viac ako 9 mm, čo potvrdilo nutnosť jej uvažovania. Nakoľko zjavne najdôležitejším posuvom je priehyb UZ, bude sa ďalej brať do úvahy a zobrazovať práve ten.



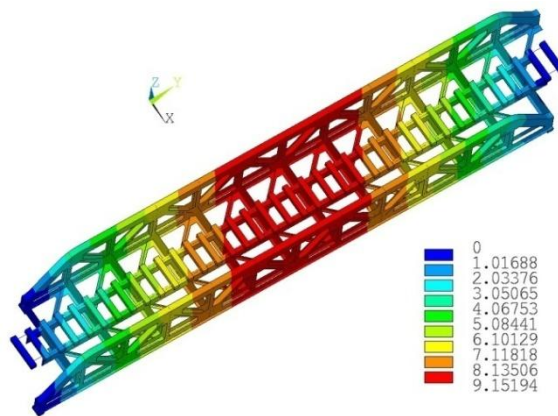
Obr. 7-5 Posuv UX [mm]



Obr. 7-6 Posuv UY [mm]



Obr. 7-7 Posuv UZ [mm]

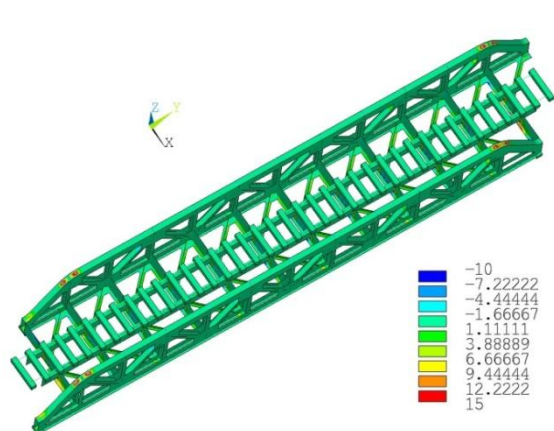


Obr. 7-8 Posuv USUM [mm]

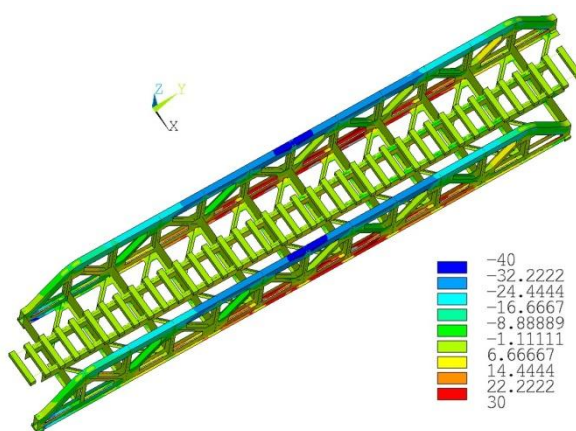
## 7.2.2 Napätie

V miestach vrubov na okrajoch mostu sa na modeli vyskytuje maximálne napätie. Táto nedokonalosť vznikla pri odklonení sa od reálnej geometrie, nakoľko ostrý prechod bol vzhľadom k polohe a okrajovým podmienkam uloženia považovaný za nepodstatný. V realite sú konkrétne miesta zaoblené veľkými rádiami a preplátované, a teda tam reálne špičky napätia nevznikajú. S týmto odôvodnením boli spomínané špičky pri vyhodnocovaní údajov odselektované.

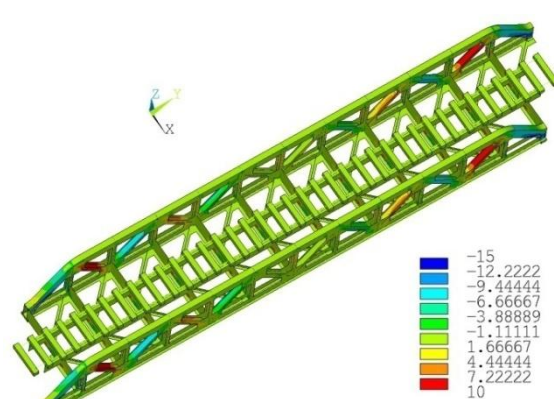
Konštrukcia sa javí ako pomerne rovnomerne namáhaná, čo potvrdzuje vhodnosť prevedenia. Z výsledkov vyplýva, že osovú napätia dosahujú hodnoty od -40 do 30 MPa. Pre kontrolu k medznému stavu pružnosti je potrebné poznať redukované napätie (napr. podľa HMH). Preto bude v nasledujúcich častiach zobrazované práve to.



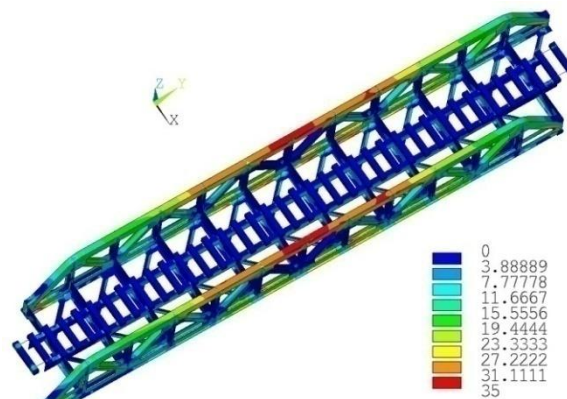
Obr. 7-9 Osovú napätie SX [MPa]



Obr. 7-10 Osovú napätie SY [MPa]



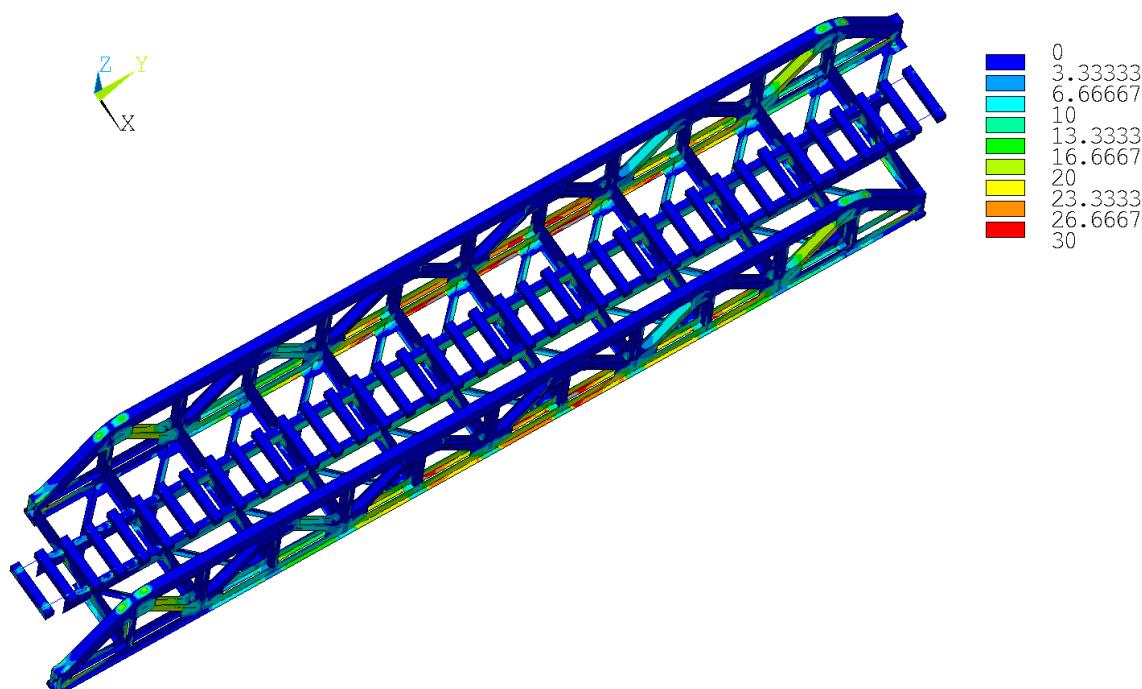
Obr. 7-11 Osovú napätie SZ [MPa]



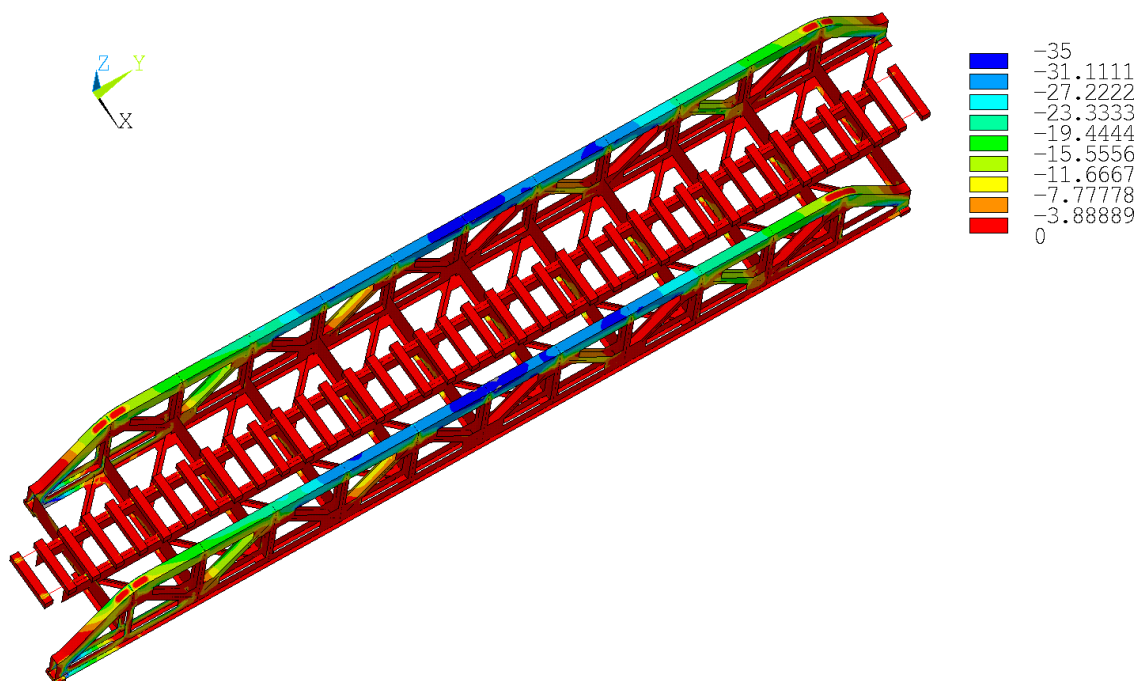
Obr. 7-12 Redukované napätie SEQV [MPa]

Vo väčšej časti konštrukcie dosahuje prvé hlavné napätie hodnoty blízke nule, maximá ležia v okolí 30 MPa (Obr. 7-13). Tretie hlavné napätie dosahuje taktiež v značnej časti mostu hodnoty blízke nule, minimá z okolia -35 MPa (Obr. 7-14).

V miestach maximálneho prvého hlavného napätia sú hodnoty tretieho takmer nulové, takisto v miestach extrémneho tretieho hlavného napätia sú nulové hodnoty prvého. Takisto prvé hlavné napätie je nižšie ako redukované. Vďaka týmto skutočnostiam sa dá predpokladať, že medzný stav krehkej pevnosti by nemal nastať. Preto sa mu v ďalších častiach nebudeme venovať.



Obr. 7-13 Prvé hlavné napätie S1 [MPa]

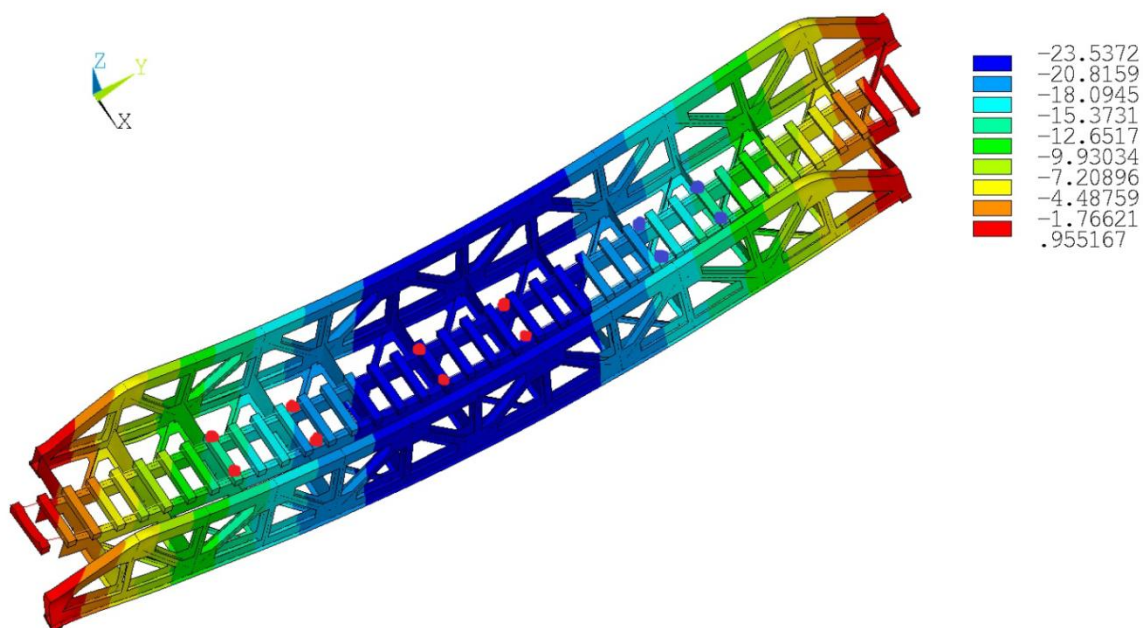


Obr. 7-14 Tretie hlavné napätie S3 [MPa]

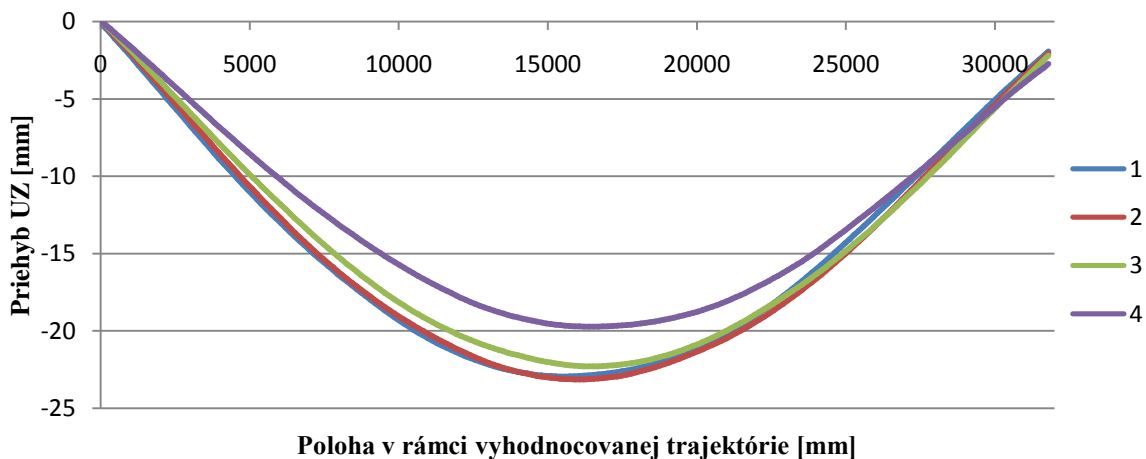
## 7.3 Zaťaženie súpravou

### 7.3.1 Deformácia

Zo zvolených 4 pozícií bol dosiahnutý najväčší priehyb 23.5 mm v pozícií zobrazenej na Obr. 6-6. Nakoľko boli polohy volené náhodne, nemôže byť táto hodnota prehlásená za maximálny priehyb, no vzhľadom k tendencii priehybových čiar zobrazených v Graf 7-1 sa dá predikovať, že definitívne maximum bude ležať niekde v tesnom okolí tejto polohy.



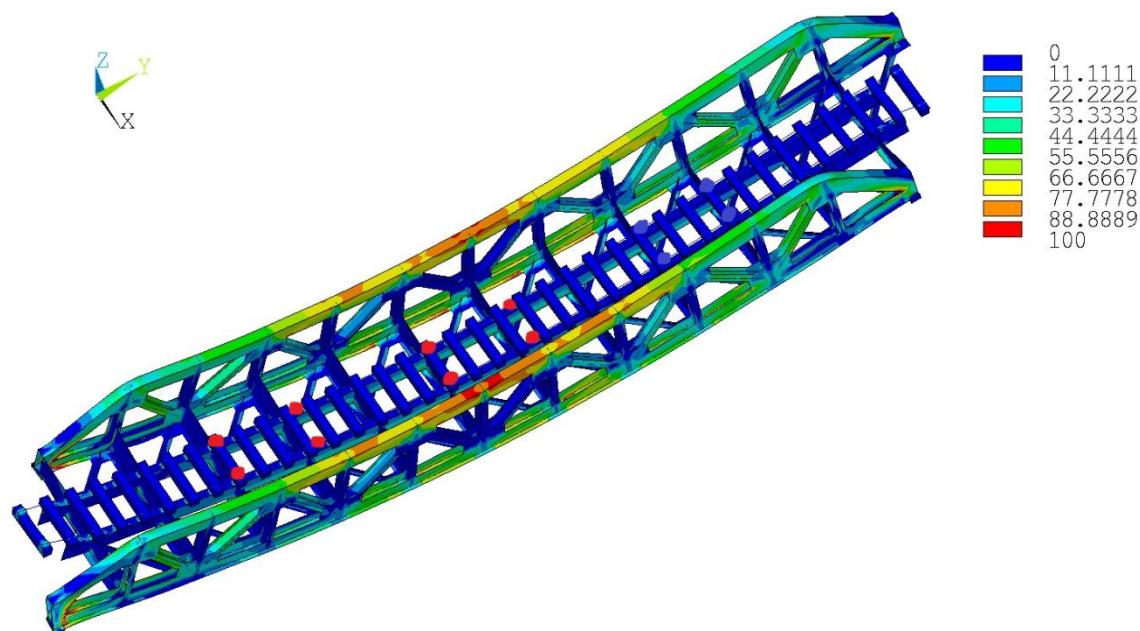
Obr. 7-15 Priehyb UZ [mm]



Graf 7-1 Priechkové čiary pre súpravu

## 7.3.2 Napätie

V rovnakej polohe, ako bol dosiahnutý najväčší priehyb, vzniká v moste aj najväčšie napätie, ktorého hodnota leží v okolí 100 MPa.



Obr. 7-16 Ekvivalentné napätie SEQV [MPa]

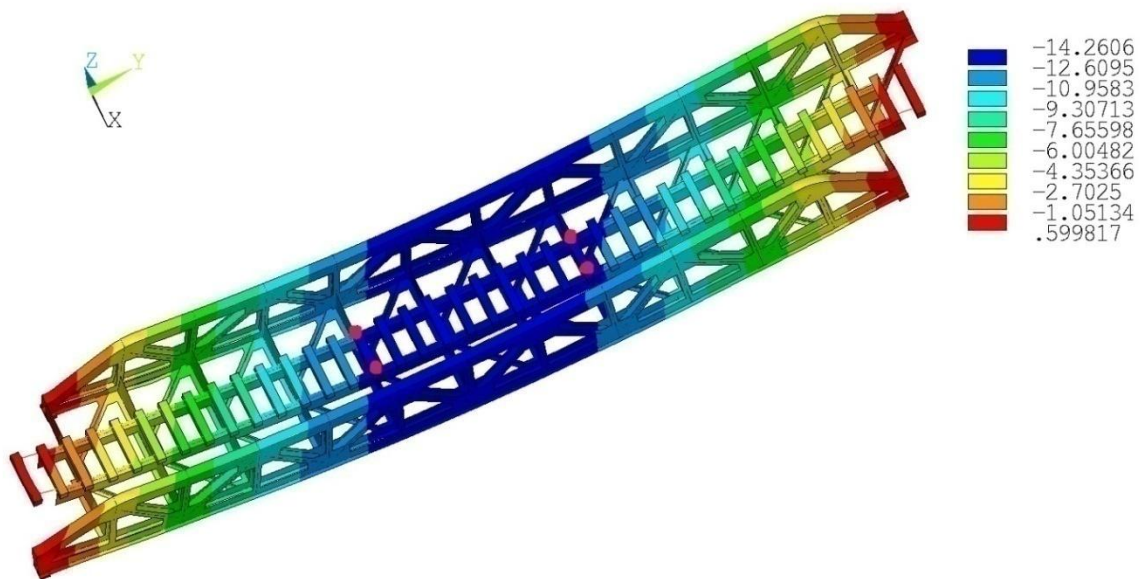
## 7.4 Zaťaženie Motorovým vozom 810

### 7.4.1 Deformácia

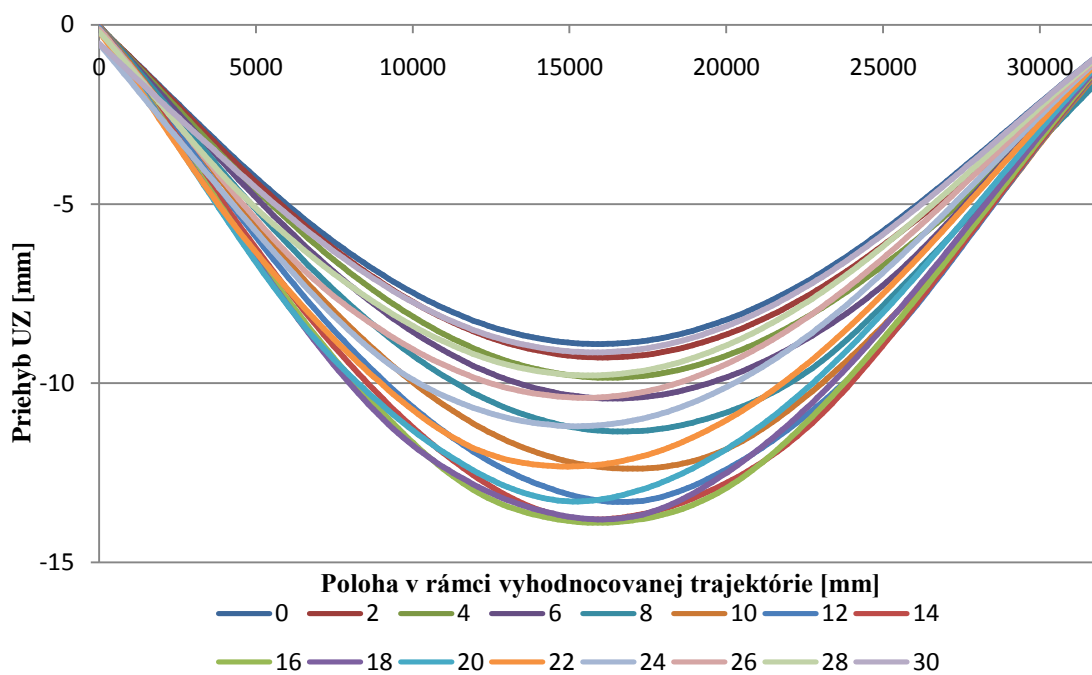
V celom priebehu prejazdu bol maximálny priehyb približne v strede mosta. Ten dosahoval hodnoty od 9 mm pri nezaťaženom stave až po 14 mm v prípade, keď je ťažisko motoráčika nad geometrickým stredom mosta (Obr. 6-7). Priebeh priehybu je znázornený v Graf 7-2. Zobrazené priečinkové čiary dobre odpovedajú teoretickým (Graf 5-1). Skutočný pomer maximálneho a minimálneho priehybu je rovný  $\frac{14,2606}{9,1265} = 1,56$ , pri analytickom riešení to je  $\frac{1,604}{1} = 1,60$ . Aj vzhľadom k silnému zjednodušeniu dosahuje analytické riešenie slušné hodnoty.

Trend maximálneho priehybu počas prejazdu vlaku je zobrazený v Graf 7-3. Nesúmernosť krivky je zapríčinená šikmými výstuhami v podstave konštrukcie, ktoré narúšajú symetriu po dĺžke. Pri hustejšom polohovaní by sa možno ukázalo, že najväčší priehyb by bol dosiahnutý pri miernom vyosení ťažiska motoráčika od geometrického stredu mosta.

Priebeh priehybu počas celého prejazdu bol spracovaný do animácií, ktoré sú na príbalenom CD. Na jednej animácii je pohľad na most z bokorysu, na druhej z perspektívy.

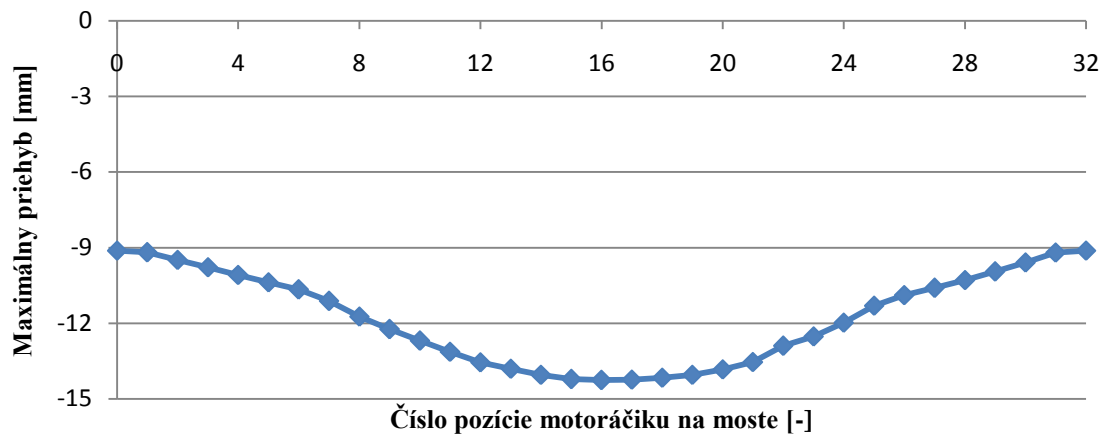


Obr. 7-17 Maximálny priehyb UZ [mm]



Graf 7-2 Priečinkové čiary pre motorový voz

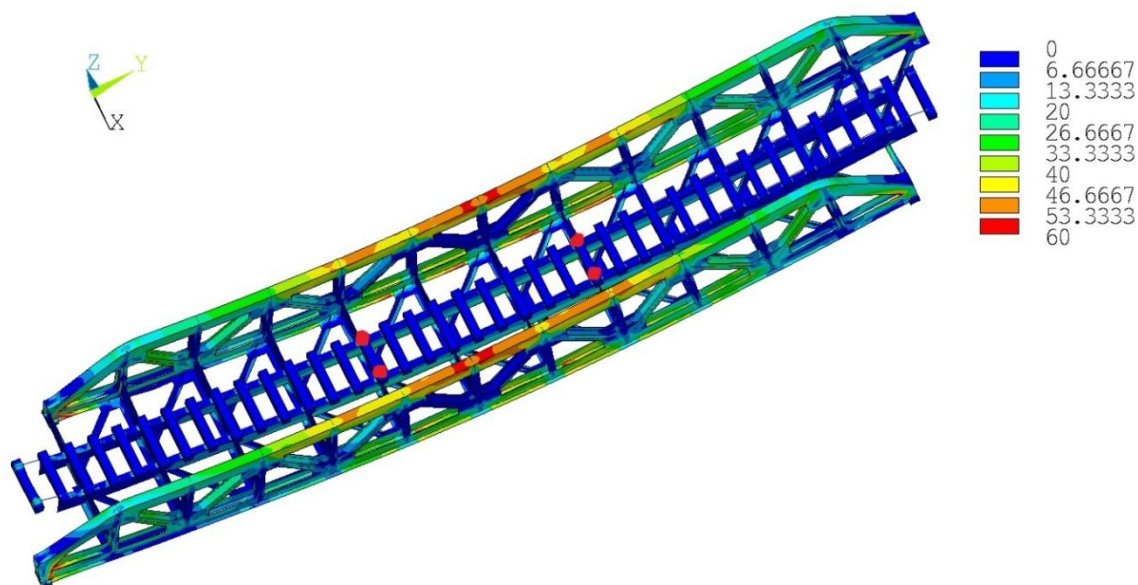




Graf 7-3 Maximálny prieťah v závislosti na polohe

### 7.3.2 Napätie

Najväčšie napätie približne 60 MPa vzniká v konštrukcii v rovnakej polohe ako najväčší prieťah. Vývoj napätia počas prejazdu je taktiež spracovaný do animácie a priložený na CD.



Obr. 7-18 Maximálne ekvivalentné napätie SEQV [MPa]

## 8 Záver

Cieľom predloženej práce bolo zistiť deformačne-napät'ovú odozvu železničného mostu na prejazd súpravy.

Priehyb konštrukcie sa pohybuje v rozmedzí od 9 mm pri nezaťaženom stave do 24 mm pri prejazde vlakovej súpravy, čo je pri celkovej dĺžke mosta 35 metrov zanedbateľné, priam nepostrehnuteľné.

Z výsledkov kapitoly 7.2.2 vyplýva, že medzný stav krehkej pevnosti je pri danej konštrukcii nepravdepodobný a možno ho zanedbať.

Čo sa týka medzného stavu tvárneho porušenia, tak maximálne hodnoty redukovaného napätia podľa teórie HMM spomedzi všetkých uvažovaných stavov sa nachádzajú v okolí 100 MPa pri prejazde vlakovej súpravy o momentálnej hmotnosti 104 ton na moste. Pri uvažovaní konštrukčnej ocele S355 s medzou klzu  $R_e = 355$  MPa sa bezpečnosť rovná:

$$k_k = \frac{R_e}{\sigma_{red, HMM}} = \frac{355}{100} = 3,55 . \quad (8.1)$$

Je nutné podotknúť, že hodnoty napätia sa môžu v malej miere od skutočnosti líšiť, nakoľko nezohľadňujú nitové spoje, ktoré do konštrukcie vnášajú vruby. Napriek tomu by výsledky mali v slušnej miere zodpovedať reálnym hodnotám.

V prípade potreby presnejších výsledkov by bolo možné detailnejšie vymodelovať geometriu okrajov mosta, vďaka čomu by tu vo výsledkoch nevznikali špičky napätia. Taktiež v oblastiach s vysokými napätiami by sa mohla zjemniť sieť. Naopak v miestach plynulého a rovnomerného rozloženia by sa mohli použiť väčšie prvky, čo by urýchlilo výpočet. Ďalšou možnosťou dosiahnutia presnejších výsledkov by bolo kontaktné riešenie uloženia, čo by však do úlohy vnieslo značnú nelinearitu a predĺžilo výpočet.

Z výsledkov pri uvažovanom nastavení vyplýva, že konštrukcia riešeného železničného mostu je nadimenzovaná optimálne.



## Zoznam použitej literatúry

- [1] ENCYKLOPEDIA MOSTŮ - BRNO - MÍROVÁ. *ENCYKLOPEDIA MOSTŮ* [online]. 2007 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://libri.cz/databaze/mosty/heslo.php?id=66>
- [2] <http://www.topcon.cz/photos/big/vimperk.jpg>
- [3] [http://www.kmz-brno.cz/storage/Image/Radek\\_M/most1/PIC00009.jpg](http://www.kmz-brno.cz/storage/Image/Radek_M/most1/PIC00009.jpg)
- [4] <http://www.topcon.cz/photos/big/516-cd-02.jpg>
- [5] <http://www.topcon.cz/photos/big/stankov.jpg>
- [6] [http://www.atlasceska.cz/images/foto\\_kat/stredni/s298\\_zeleznicni.jpg](http://www.atlasceska.cz/images/foto_kat/stredni/s298_zeleznicni.jpg)
- [7] JANÍČEK, Přemysl et al. *Pružnost a pevnost I*. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-214-2592-X.
- [8] ONDRÁČEK, Emanuel et al. *Pružnost a pevnost II*. Brno: CERM, 2006. ISBN 80-214-3260-8.
- [9] <http://www.zelpage.cz/fotogalerie/big/263048.jpg>
- [10] <http://www.zelpage.cz/fotogalerie/big/811cz001.jpg>

## Zoznam použitých skratiek a symbolov

|                    |                       |   |
|--------------------|-----------------------|---|
| a                  | [mm]                  | rázvor motoráčka  |
| $k_k$              | [-]                   | bezpečnosť voči medznému stavu pružnosti                |
| $k_R$              | [-]                   | bezpečnosť voči medznému stavu krehkej pevnosti         |
| p                  | [mm]                  | vzdialenosť prednej nápravy motoráčka od začiatku mostu |
| q                  | [N.mm <sup>-1</sup> ] | líniové zaťaženie od vlastnej tiaže                     |
| w                  | [mm]                  | priehyb   |
|                    |                       |   |
| E                  | [GPa]                 | Youngov modul pružnosti                                 |
| F                  | [N]                   | zaťaženie od nápravy                                    |
| $F_A$              | [N]                   | reakčná sila od podpory A                               |
| $J_y$              | [mm <sup>4</sup> ]    | osový kvadratický moment                                |
| L                  | [mm]                  | dĺžka mosta   |
| $R_e$              | [MPa]                 | medza klzu  |
| SEQV               | [MPa]                 | redukované napätie HMM                                  |
| SX                 | [MPa]                 | normálové napätie v osi x                               |
| SY                 | [MPa]                 | normálové napätie v osi y                               |
| SZ                 | [MPa]                 | normálové napätie v osi z                               |
| S1                 | [MPa]                 | prvé hlavné napätie                                     |
| S3                 | [MPa]                 | tretie hlavné napätie                                   |
| USUM               | [mm]                  | celkový posuv   |
| UX                 | [mm]                  | posuv v osi x   |
| UY                 | [mm]                  | posuv v osi y   |
| UZ                 | [mm]                  | posuv v osi z   |
|                    |                       |   |
| $\mu$              | [-]                   | Poissonov pomer   |
| $\rho$             | [kg.m <sup>-3</sup> ] | hustota   |
| $\sigma_k$         | [MPa]                 | medza klzu  |
| $\sigma_{Rt}$      | [MPa]                 | medza krehkej pevnosti v ťahu                           |
| $\sigma_{red,HMH}$ | [MPa]                 | redukované napätie HMM                                  |
| $\sigma_{red,MOS}$ | [MPa]                 | redukované napätie MOS                                  |
| $\sigma_x$         | [MPa]                 | normálové napätie v osi x                               |
| $\sigma_y$         | [MPa]                 | normálové napätie v osi y                               |
| $\sigma_z$         | [MPa]                 | normálové napätie v osi z                               |
| $\sigma_1$         | [MPa]                 | prvé hlavné napätie                                     |
| $\sigma_2$         | [MPa]                 | druhé hlavné napätie                                    |
| $\sigma_3$         | [MPa]                 | tretie hlavné napätie                                   |
| $\tau_O$           | [MPa]                 | šmykové napätie v oktaedrickej rovine                   |
| $\tau_{OK}$        | [MPa]                 | kritické šmykové napätie v oktaedrickej rovine          |
| $\tau_{xy}$        | [MPa]                 | šmykové napätie v rovine XY                             |
| $\tau_{xz}$        | [MPa]                 | šmykové napätie v rovine XZ                             |
| $\tau_{yz}$        | [MPa]                 | šmykové napätie v rovine YZ                             |

## Zoznam obrázkov

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1-1 Riešený železničný most .....                           | 3  |
| Obr. 4-1 Kamenný most v Strakoniciach.....                       | 4  |
| Obr. 4-2 Betónový most v Brne Černoviciach.....                  | 4  |
| Obr. 4-3 Oceľový most v Prahe .....                              | 4  |
| Obr. 4-4 Most s hornou mostovkou v Plzni .....                   | 5  |
| Obr. 4-5 Most s dolnou mostovkou v Prahe .....                   | 5  |
| Obr. 5-1 Schéma pre výpočet $J_y$ .....                          | 7  |
| Obr. 5-2 Ohybové momenty stavu $B$ ) .....                       | 7  |
| Obr. 6-1 Zobrazenie podľa hrúbky .....                           | 9  |
| Obr. 6-2 Diskretizácia modelu geometrie železničného mostu ..... | 10 |
| Obr. 6-3 Detail uloženia.....                                    | 11 |
| Obr. 6-4 Model okrajových podmienok.....                         | 11 |
| Obr. 6-5 Súprava.....  | 12 |
| Obr. 6-6 Model zaťaženia mostu vlakovou súpravou.....            | 12 |
| Obr. 6-7 Motorový voz 810 .....                                  | 13 |
| Obr. 6-8 Model zaťaženia mostu motorovým vozom.....              | 13 |
| Obr. 7-1 Posuv UZ - veľké deformácie .....                       | 14 |
| Obr. 7-2 Posuv UZ - malé deformácie.....                         | 14 |
| Obr. 7-3 Ekvivalentné napätie SEQV - malé def.....               | 14 |
| Obr. 7-4 Ekvivalentné napätie SEQV - veľké def. ....             | 14 |
| Obr. 7-5 Posuv UX .....  | 15 |
| Obr. 7-6 Posuv UY .....  | 15 |
| Obr. 7-7 Posuv UZ.....   | 15 |
| Obr. 7-8 Posuv USUM.....   | 15 |
| Obr. 7-9 Osové napätie SX .....                                  | 16 |
| Obr. 7-10 Osové napätie SY .....                                 | 16 |
| Obr. 7-11 Osové napätie SZ.....                                  | 16 |
| Obr. 7-12 Redukované napätie SEQV .....                          | 16 |
| Obr. 7-13 prvé hlavné napätie $S_1$ .....                        | 17 |
| Obr. 7-14 Tretie hlavné napätie $S_3$ .....                      | 17 |
| Obr. 7-15 Priehyb UZ .....                                       | 18 |
| Obr. 7-16 Ekvivalentné napätie SEQV .....                        | 19 |
| Obr. 7-17 Maximálny priehyb UZ .....                             | 20 |
| Obr. 7-18 Maximálne ekvivalentné napätie SEQV .....              | 21 |

## Zoznam tabuliek

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Tab. 6-1 Modely materiálu ..... | 9 |
|---------------------------------|---|

## Zoznam grafov

|   |    |
|---|----|
| Graf 5-1 Analytické priečinkové čiary .....             | 8  |
| Graf 7-1 Priečinkové čiary pre súpravu .....            | 18 |
| Graf 7-2 Priečinkové čiary pre motorový voz .....       | 20 |
| Graf 7-3 Maximálny prieťah v závislosti na polohe ..... | 21 |

## Prílohy

Prílohy na CD:

- [Príloha 1] Elektronická verzia bakalárskej práce
- [Príloha 2] Súbor systému ANSYS - zaťaženie mostu vlakovou súpravou
- [Príloha 3] Animácie prejazdu Motorového vozu