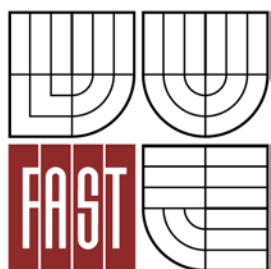




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA NOSNÉHO LANA

STATIC ANALYSIS OF CABLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

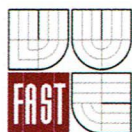
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PÉTER PÓTHE

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK VLK, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Péter Póthe


Název Statická analýza nosného lana

Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.


**Datum zadání
bakalářské práce** 30. 11. 2015

**Datum odevzdání
bakalářské práce** 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015


.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Kadlčák J., Kytýr J. : Statika stavebních konstrukcí I
Kadlčák J. : Statika nosných lan visutých střech
Manuály k systému RFEM
Architektonický návrh nerealizovaného visutého mostu

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Cílem práce je provést předběžný statický výpočet nosného lana visutého mostu. Výpočet bude proveden jak ručně na zjednodušeném modelu tak v programovém systému RFEM. Výsledky budou následně porovnány.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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



.....
Ing. Zbyněk Vlček, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá statickou analýzou nosného lana na visuté lávce. Pro zpracování byl proveden jak ruční výpočet, tak i výpočet pomocí softwaru RFEM pro statické analýzy metodou konečných prvků od firmy Dlubal. Úkolem bylo stanovit geometrický tvar lana a skutečnou polohu závěsů, kterou dostaneme po výstavbě mostu. Výsledky byly následně mezi sebou porovnány.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the static analysis of suspension cables of the suspension footbridge. The processing was done as a manual calculation as using the program system RFEM for a static finite element method from company Dlubal. The task was to determine the geometric shape of cables and the real position of suspenders, which we get after the construction of the bridge. The results were then compared with each other.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nosné lano, závěs, visutá lávka, segmenty, pylon, statický model, tvar lana, protažení lana, deformace

KEYWORDS

Suspension cables, suspension footbridge, segments, pylon, static model, shape of cable, elongation of cable, deformation

Bibliografická citace VŠKP

Péter Pöthe *Statická analýza nosného lana*. Brno, 2016. 57 s., 0 s. příl. Bakalářská práce.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce
Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25.5.2016

.....
podpis autora
Péter Póthe

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Zbyňku Vlkovi, PhD. za odborné vedení, cenné rady, čas a přátelský přístup během zpracování bakalářské práce.

Péter Póthe

OBSAH

1. ÚVOD	9
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	10
2.1 ROVINNÝ VLÁKNOVÝ POLYGON	13
2.2 VLIV PRUŽNÉHO PŘETVOŘENÍ LANA	14
3. VISUTÁ LÁVKA PRO PĚŠÍ	14
3.1 POPIS LÁVKY	14
3.2 POPIS NOSNÉHO LANA	14
4. VÝPOČET	17
4.1 ZATÍŽENÍ.....	17
4.2 RUČNÍ VÝPOČET	19
4.3 VÝPOČET POMOCÍ PROGRAMU.....	25
4.3.1 MODEL Č. 1	25
4.3.2 MODEL Č. 2.....	26
4.3.3 MODEL Č. 3	31
4.3.4 MODEL Č. 4	33
4.3.5 MODEL Č. 5.....	39
4.3.6 MODEL Č. 6.....	45
4.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	51
5. ZÁVĚR.....	52
6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
7. SEZNAM ZKRATEK.....	54
8. SEZNAM OBRÁZKŮ	55
9. SEZNAM TABULEK.....	57

1. ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá statickou analýzou nosného lana. Lano jako nosný prvek se ve stavebnictví používá poměrně často, v mostním stavitelství se mosty velkých rozpětí bez nich téměř neobejdou.

Pro účel analýzy byl vybrán architektonický návrh nerealizované visuté lávky. Cílem je najít počáteční a skutečný geometrický tvar lana po dokončení stavby, kdy se průvės lana ustálí na hodnotě 26,822 m.

Výpočet bude nejprve proveden ručně, při němž budou zjištěny velikosti reakcí, průběhy normálových sil jednotlivých úseků a svislé souřadnice vrcholů polygonu. Do analýzy budou započítány také deformace lana a následně bude určena výchozí délka, která se po zatížení ustálí na předem stanovené hodnotě.

Po ručním výpočtu proběhne také analýza pomocí softwaru RFEM, při které bude snahou vytvořit co nejpřesnější a nejpodrobnější model v souladu s výchozím návrhem. Výpočet bude respektovat i tvar jednotlivých dílčích částí.

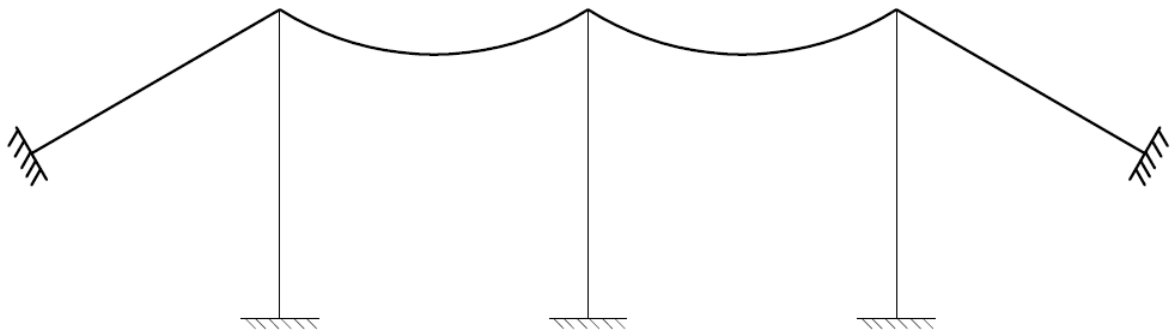
Po stanovení výsledků budou ruční a programové modely mezi sebou porovnány a proběhne také vyhodnocení jednotlivých hodnot.

2. TEORETICKÁ ČÁST

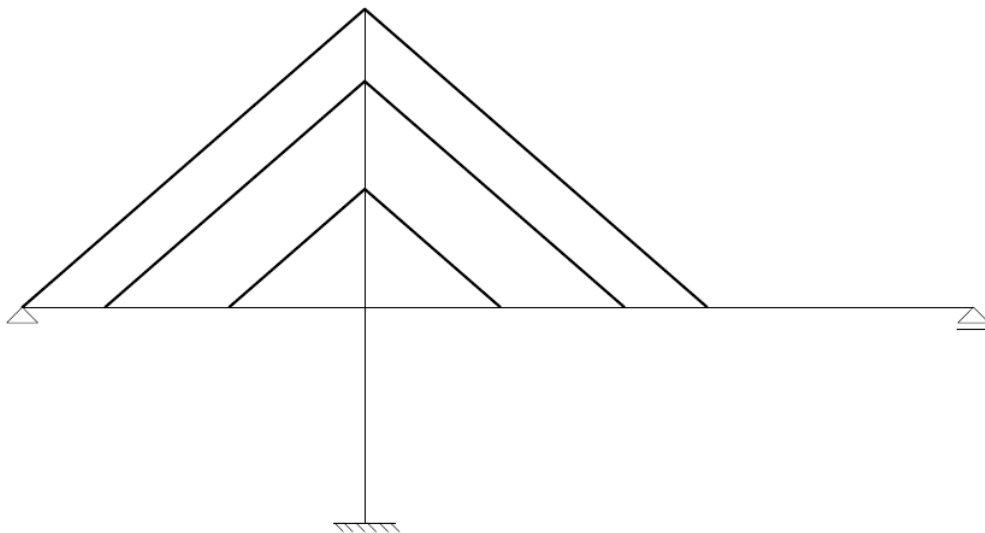
Lanem jako nosným prvkem se ve stavebnictví potkáme poměrně často. Mohou být zavěšeny na jednom nebo více polích, případně může jít o soustavu lan.

K lanovým konstrukcím patří:

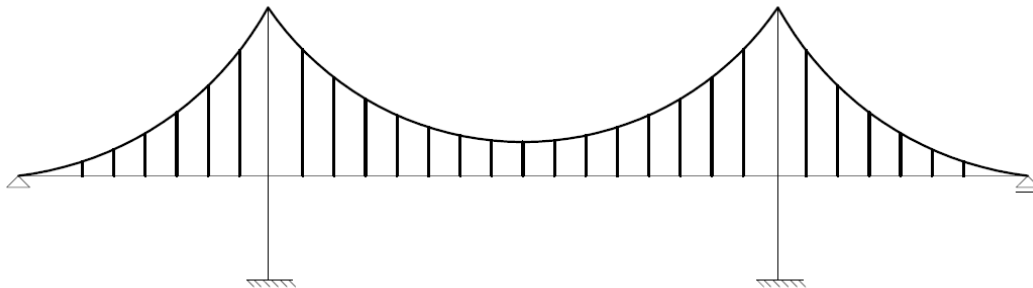
- lanové střechy
- lanovky
- střechy z lanových sítí
- zavěšené mosty
- visuté mosty s jednoduchou mostovkou
- visuté mosty se zavěšenou mostovkou



Obrázek 1: Schéma visuté střechy



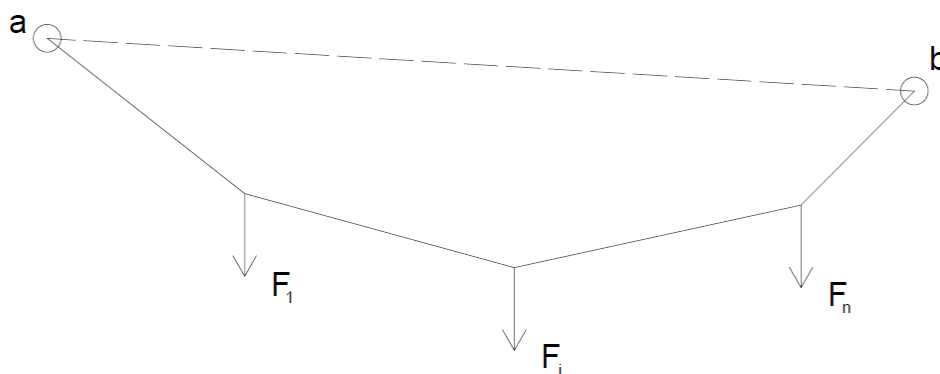
Obrázek 2: Schéma zavěšeného mostu



Obrázek 3: Schéma visutého mostu

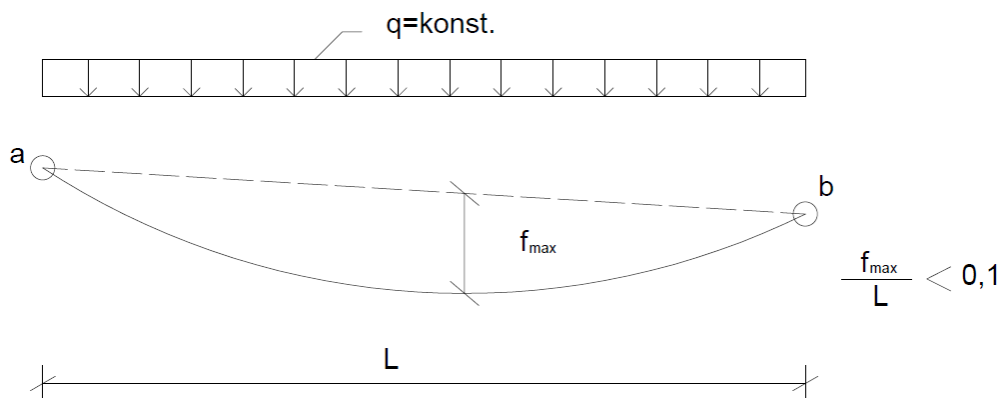
Předpokladem je, že lano má vysokou pevnost a tuhost v tahu a malou, resp. žádnou tuhost v ohybu. Z těchto poznatků plyne, že lano je dokonalé ohebné vlákno v rovině. Dokonalá ohebnost znamená, že lano je nehmotné, neprodloužitelné, ve všech průřezech jsou ohybové momenty $M = 0$ a přenáší pouze tah, tedy $N > 0$. Úlohy o lanu patří do nelineární mechaniky a geometrický tvar lana závisí na zatížení.

1. Zatížení soustavou svislých sil.

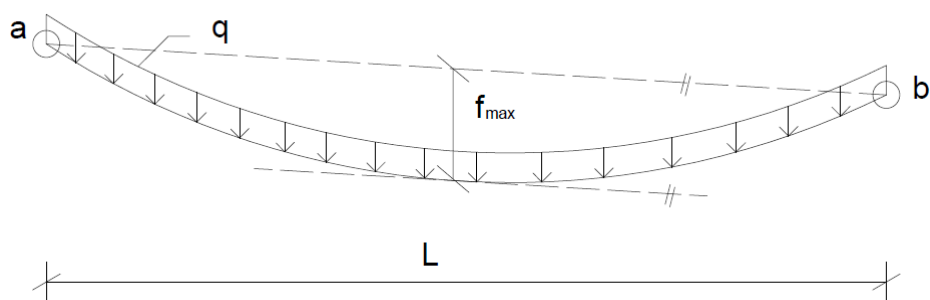


Obrázek 4: Zjednodušené schéma rovinného vláknového polygonu

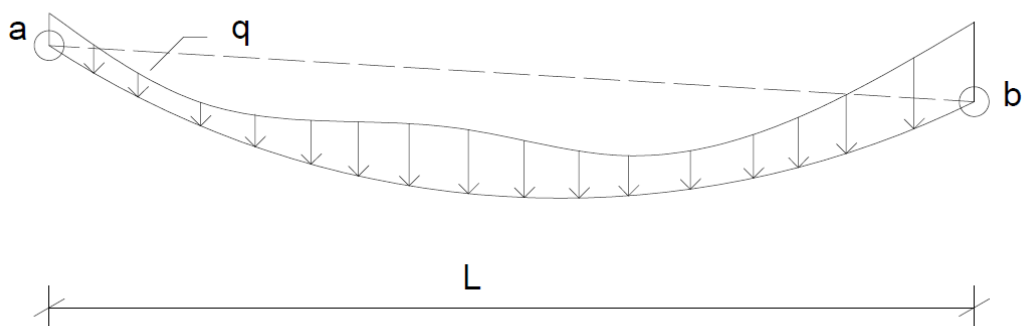
2. Zatížení spojitým zatížením



Obrázek 5: Parabolická řetězovka

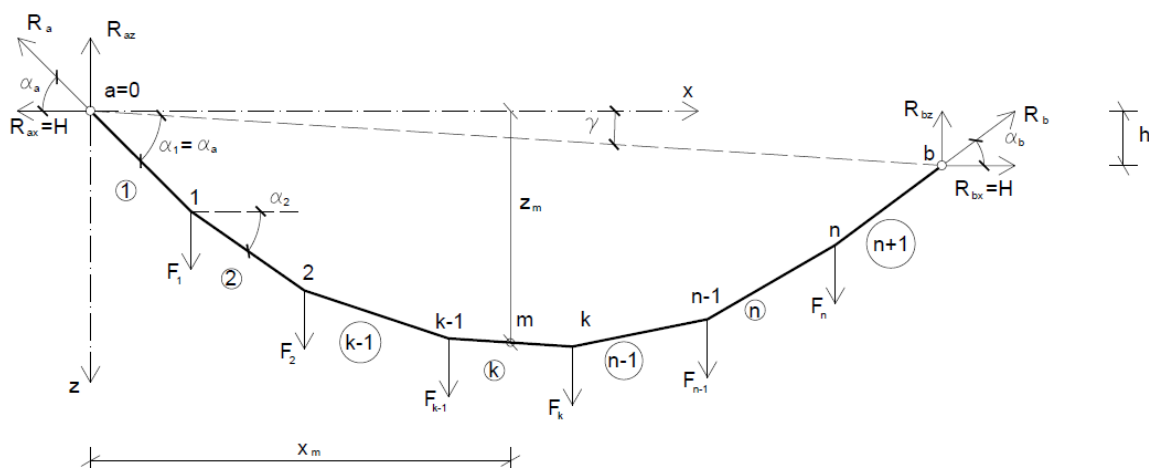


Obrázek 6: Pravá – tízná řetězovka



Obrázek 7: Obecná řetězovka

2.1 ROVINNÝ VLÁKNOVÝ POLYGON



Obrázek 8: Rovinný vláknový polygon

Předpokladem pro řešení rovinného vláknového polygonu je, že je kloubově zavěšen na dvou neposuvných bodech a, b , při čemž známe jejich polohu. Známa je také velikost soustavy svislých sil F_1 až F_n a vodorovné rozmístění vrcholů x_1 až x_n . Po ustálení tvaru a dosažení rovnováhy lze konstrukci vyšetřovat jako rovinnou kloubovou prutovou soustavu.

Neznámé veličiny jsou:

- geometrické: svislé souřadnice vrcholu z_1 až z_n n
- statické: složky reakcí $R_{ax}, R_{az}, R_{bx}, R_{bz}$ 4
- normálové síly N_1 až N_{n+1} $\underline{n+1}$
- celkem neznámých $2n+5$

K určení neznámých veličin polygonu jsou použité podmínky rovnováhy v jednotlivých vrcholech.

- Vrcholy $a, b, 1$ až n $n+2$
- 2 podmínky rovnováhy pro každý vrchol $\underline{2(n+2)}$
- celkem $2n+4$

Daná úloha je tedy $1 \times$ staticky neurčitá. Pro řešení je proto nutné použít doplňkovou podmínku. V tom případě se vyjde z předpokladu, že průvės polygonu je veden přes předem daný bod, jehož souřadnice jsou známé [1].

$$m[x_m; z_m]$$

Dále platí:

$$\sum M_{im}^L = 0; \sum M_{im}^P = 0$$

Postup řešení:

1) Podmínky rovnováhy

$$\begin{aligned} \sum F_{ix} = 0: & \quad R_{ax} = R_{bx} = H \\ \sum M_{ia} = 0: & \quad R_{bz}l + R_{bx}h - \sum F_i x_i = 0 \\ \sum M_{ib} = 0: & \quad -R_{az}l + R_{ax}h + \sum F_i(l - x_i) = 0 \end{aligned}$$

Bude použita také doplňková podmínka, pro určení horizontální síly lana H .

2) Vnitřní osově síly N_i ve stranách polynomu a úhly svírající vodorovnou osou α_i byly vyšetřeny pomocí:

- styčnickové metody
- průsečné metody

3) Svislé souřadnice vrcholu z geometrických vztahů

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{z_i}{x_i} \quad \Rightarrow \quad z_i = x_i \operatorname{tg} \alpha_i$$

4) Délka celého lana l z geometrie

$$l = \sum l_i$$

2.2 VLV PRUŽNÉHO PŘETVOŘENÍ LANA

Dokonalá ohebnost předpokládá, že lano je neprodloužitelné. V daném případě budou porovnány výsledky z výpočtového programu, který počítá i s prodloužením lana. Předpokládá se, že vodorovné souřadnice bodů ve styčnicku se nemění, měnit se budou pouze svislé souřadnice. Vyjde se z platnosti Hookova zákona [2].

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad \sigma = E\varepsilon \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Po sestavení rovnic platí, že:

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA}$$

3. VISUTÁ LÁVKA PRO PĚŠÍ

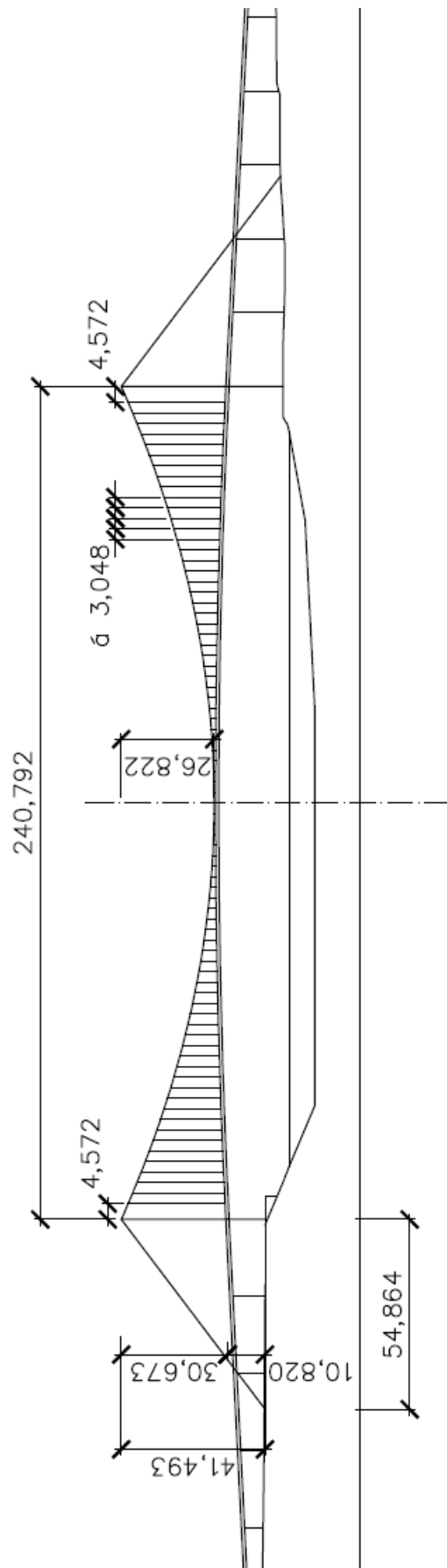
Pro analýzu nosného lana jsem se inspiroval architektonickým návrhem nerealizované visuté lávky pro pěší přes řeku Missouri ve městě Omaha (Nebraska, USA) od firmy Stráský, Hustý a partneři s.r.o. Pro zpracování jsem obdržel situaci mostu, architektonický návrh a průřezy jednotlivých nosných částí [3].

3.1 POPIS LÁVKY

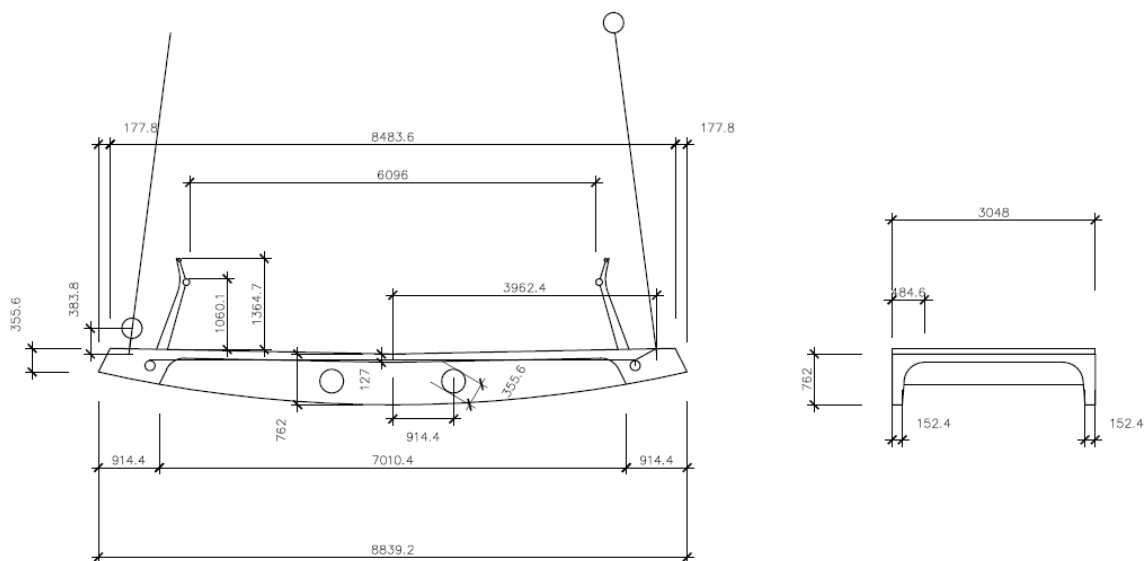
Lávka, pro kterou bude provedena statická analýza lana, je tvořena hlavním visutým mostem a rampami. Konstrukce je symetrická a mostovku tvoří prefabrikované segmenty. Vzdálenost mezi pylony je 240,792 metrů, výška od uložení po mostovku je 10,820 m a výška od mostovky k vrcholu je 30,673 m, celkově pak 41,493 m. Pylony mají různý průřez v uložení a ve vrcholu, jejich náběh je lineární.

3.2 POPIS NOSNÉHO LANA

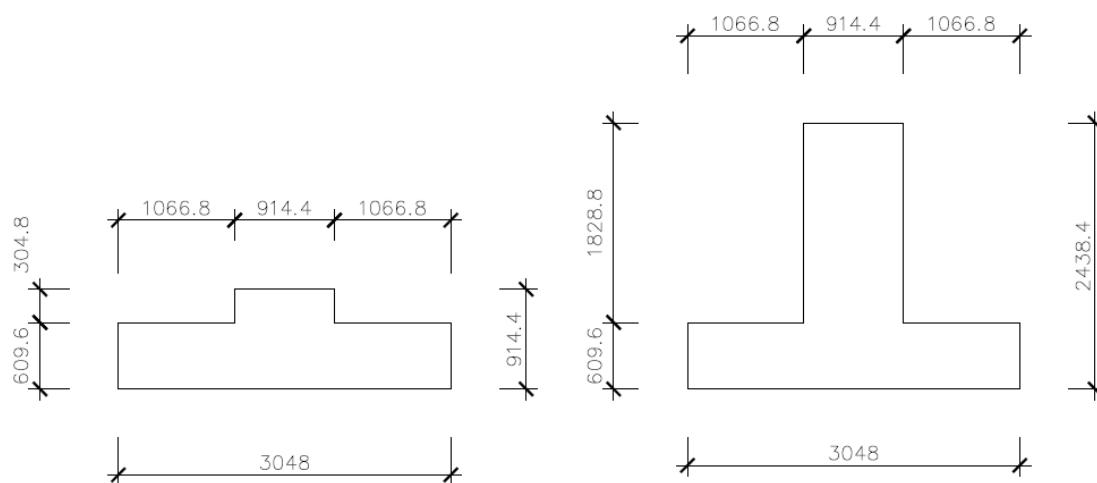
Nosné lano, pro které bude provedena statická analýza, má průvės 26,822 m. Lano je zavěšené ve stejné výšce, a tvoří ho 77 závěsů, na které jsou zavěšeny prefabrikované segmenty. První závěsy jsou ve vzdálenosti 4,572 m od pylonu, ostatní jsou rovnoměrně rozmístěny po vzdálenosti 3,048 m. Kotvení lana je v kotevních blocích a to 54,864 m od pylonu.



Obrázek 9: Architektonický návrh visuté lávky pro pěší



Obrázek 10: Příčný (levý) a podélný (pravý) řez prefabrikovaného segmentu



Obrázek 11: Průřez hlavy (levý) a paty (pravý) pylonu

4. VÝPOČET

Cílem analýzy je zjistit skutečný geometrický tvar lana po výstavbě mostu, a to tak, aby odpovídalo architektonickému návrhu. Předpokládá se tvar vláknového polygonu, u kterého je známé pouze rozpětí lana L a jeho průvės f . Při hledání skutečného tvaru bude započítáno také pružné přetvoření lana. Z tohoto předpokladu plyne, že hodnota průvěsu lana bude jiná na začátku výstavby a po dokončení.

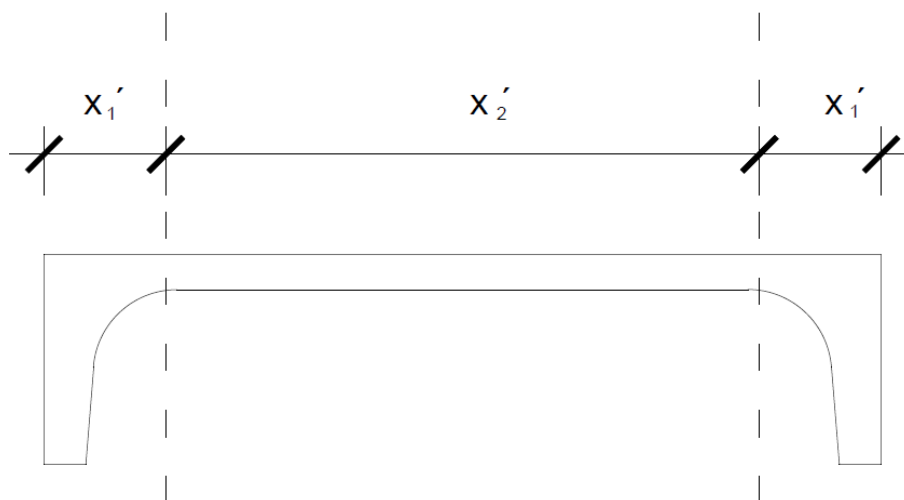
Pro danou problematiku byl nejdřív proveden ruční výpočet. Pro kontrolu byl zvolen programový systém RFEM pro statické analýzy metodou konečných prvků od firmy Dlubal. Výsledky budou následně mezi sebou porovnány.

4.1 ZATÍŽENÍ

Přesné hodnoty zatížení nebyly získány. Aby bylo možné najít skutečný tvar lana po ukončení stavby, kde se předpokládá pouze působení vlastní tíhy, byly odhadnuty velikosti působících zatížení. Podmínku $\frac{f_{\max}}{L} < 0,1$ pro tvar parabolické řetězovky není v tomto

případě zcela splněna $\frac{26,822}{240,792} = 0,111$. Nicméně hodnota byla překročena pouze o 0,011, což

je možné zanedbat. Proto bude konstrukce dále zatěžována spojitým rovnoměrným zatížením na průmět. Byla započítána tíha ocelového lana, závěsy a tíha betonového segmentu. Segment nemá po celé své délce konstantní průřez, proto byl profil podélně rozdělen na 3 části, při čemž 2 jsou stejné. Bylo uvažováno s objemovou tíhou betonu $\gamma_c = 25\text{kN/m}^3$.

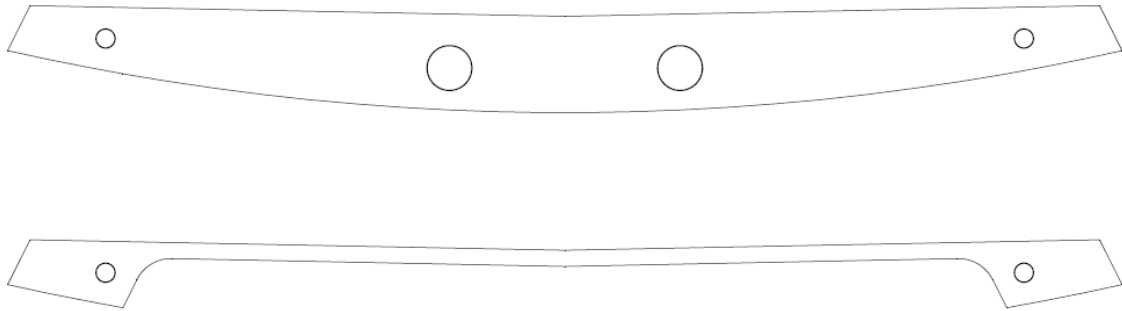


Obrázek 12: Ilustrace dělení prefabrikovaného segmentu v podélném směru

Obdržené plochy po odečtení kruhových otvorů jsou následující:

$$A_1 = 5,388m^2$$

$$A_2 = 1,696m^2$$



Obrázek 13: Příčný profil na krajích (horní) a uprostřed (dolní) segmentu

$$G_1 = A_1 \gamma_c x_1'$$

$$G_1 = 5,388m^2 \cdot 25kN / m^3 \cdot 0,4452m$$

$$G_1 = 59,968kN$$

$$G_2 = A_2 \gamma_c x_2'$$

$$G_2 = 1,696m^2 \cdot 25kN / m^3 \cdot 2,1576m$$

$$G_2 = 91,482kN$$

$$G_{segment} = 2G_1 + G_2$$

$$G_{segment} = 2 \cdot 59,968kN + 91,482kN$$

$$G_{segment} = 211,418kN$$

Tíha jednoho segmentu je tedy 211,418 kN. Tato hodnota byla vydělena délkou jednoho segmentu, aby byla převedena na rovnoměrné spojitě zatížení. Hlavní nosné lana jsou 2, proto bylo uvažováno pouze s polovinou hmotnosti segmentu.

$$g_{segment} = \frac{1}{2} \frac{G}{l_s} = \frac{1}{2} \frac{211,418kN}{3,048m} = 34,681kN / m$$

Průměr nosného lana je $d_l=0,5$ m a jeho předpokládaná délka je $l_{nl} = 248,538$ m. Závěsy mají průměr $d_2 = 0,25$ m, celkově 77 kusů s uvažovanou průměrnou délkou $l_z = 12,777$ m. Objemová tíha oceli je $\gamma_s = 78,5$ kN/m³. Tíha byla poté znova převedena na spojitě rovnoměrné zatížení.

$$G_{\text{nosné lano}} = \frac{\pi d_1^2}{4} \gamma_s l_{nl}$$

$$G_{\text{nosné lano}} = \frac{\pi 0,5^2}{4} m^2 \cdot 78,5 kN / m^3 \cdot 248,538 m$$

$$G_{\text{nosné lano}} = 3\,830,825 kN$$

$$g_{\text{nosné lano}} = \frac{G_{\text{nosné lano}}}{L} = \frac{3\,830,825 kN}{240,792 m} = 15,909 kN / m$$

$$G_{\text{závesy}} = n \frac{\pi d_2^2}{4} \gamma_s l_z$$

$$G_{\text{závesy}} = 77 \cdot \frac{\pi 0,25^2}{4} m^2 \cdot 78,5 kN / m^3 \cdot 12,777 m$$

$$G_{\text{závesy}} = 3\,791,047 kN$$

$$g_{\text{závesy}} = \frac{G_{\text{závesy}}}{L} = \frac{3\,791,047 kN}{240,792 m} = 15,744 kN / m$$

Výsledné spojitě zatížení, kterým bude zatíženo nosné lano na průmět délky, je dáno součtem všech spojitých zatížení od vlastní tíhy jednotlivých dílčích elementů.

$$g = g_{\text{segment}} + g_{\text{nosné lano}} + g_{\text{závesy}}$$

$$g = 34,681 kN / m + 15,909 kN / m + 15,744 kN / m$$

$$g = 66,334 kN / m$$

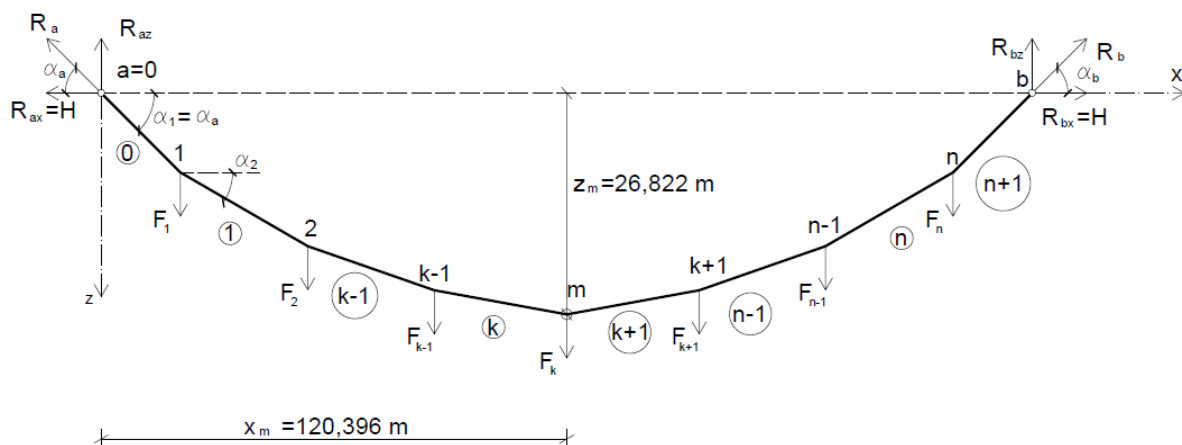
4.2 RUČNÍ VÝPOČET

Při ručním výpočtu se vyšlo z architektonického návrhu, při němž konstrukce je symetrická, zavěšení je ve stejné výškové úrovni a je známá poloha zavěšení. Tyto body jsou značeny jako bod $a = 0$ a bod $b = 78$. Nosné lano je vedeno přes zvolený bod m , což je prostřední závěs, který je v pořadí 39. závěs. Souřadnice bodů jsou následující a jsou udány v metrech:

$$a=0 \quad [0,000; 0,000]$$

$$m=39 \quad [120,396; 26,822]$$

$$b=78 \quad [240,792; 0,000]$$



Obrázek 14: Symetrický rovinný vláknový polygon pro ruční výpočet

Spojité rovnoměrné zatížení g na průmětu lana byly přepočítány na svislé síly F_i do jednotlivých styčnicků. Krajní závěs je od pylonu vzdálen 4,572 m, ostatní po 3,048 m, proto jsou síly v prvních dvou bodech odlišné, než v ostatních.

$$F_0 = \frac{1}{2} \cdot 4,572 \text{ m} \cdot 66,334 \text{ kN} / \text{m} = 151,640 \text{ kN}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot (4,572 + 3,048) \text{ m} \cdot 66,334 \text{ kN} / \text{m} = 252,733 \text{ kN}$$

$$F_{2+n} = \frac{1}{2} (3,048 + 3,048) \text{ m} \cdot 66,334 \text{ kN} / \text{m} = 202,186 \text{ kN}$$

Je známa velikosti svislých sil F_i , nyní už je tedy možné napsat momentovou podmínku k bodu a tak, aby byly stanoveny svislé reakce R_{az} , R_{bz} .

$$\sum M_a = 0: \quad R_{bz} L - \sum F_i x_i = 0$$

$$R_{bz} = 7\,986,348 \text{ kN}$$

$$\sum M_b = 0: \quad R_{az} L - \sum F_i x_i = 0$$

$$R_{az} = 7\,986,348 \text{ kN}$$

Pro kontrolu:

$$R_{az} = R_{bz} = \frac{1}{2} g L$$

$$R_{az} = R_{bz} = \frac{1}{2} \cdot 66,334 \text{ kN} / \text{m} \cdot 240,792 \text{ m}$$

$$R_{az} = R_{bz} = 7\,986,348 \text{ kN}$$

Již jsou stanovené svislé reakce R_{az} , R_{bz} , dále je potřeba vypočítat vodorovné reakce

$$R_{ax} = R_{bx} = H.$$

Pro řešení bude použita doplňková podmínka k bodu m , kde platí:

$$\sum M_m^L = 0: R_{ax} z_m - R_{az} x_m + \sum F_i (x_m - x_i) = 0$$

$$R_{ax} = 17\,924,174 \text{ kN}$$

Pro kontrolu:

$$R_{ax} z_m - R_{az} x_m + \frac{1}{2} g \left(\frac{L}{2} \right)^2 = 0$$

$$R_{ax} = \frac{R_{az} x_m - \frac{1}{2} g \left(\frac{L}{2} \right)^2}{z_m}$$

$$R_{ax} = \frac{7\,986,348 \text{ kN} \cdot 120,396 \text{ m} - \frac{1}{2} \cdot 66,334 \text{ kN/m} \cdot \left(\frac{240,792 \text{ m}}{2} \right)^2}{26,822 \text{ m}}$$

$$R_{ax} = 17\,924,174 \text{ kN}$$

Po výpočtu reakcí v bodech a a b je možné pokračovat v analýze skutečného tvaru nosného lana, které má plochu $A = 0,196 \text{ m}^2$ a modul pružnosti v tahu oceli je $E = 210 \text{ GPa}$. Hodnoty byly vypočítány z následujících vztahů a zpracovány v tabulkách:

Svislé složky osových sil N_{iz} :

$$-N_{(i-1)z} + N_{iz} + F_{(i-1)} = 0 \quad \Rightarrow \quad N_{iz} = N_{(i-1)} - F_{(i-1)}$$

Pro styčnick 0 tedy:

$$-7\,986,348 \text{ kN} + N_{0z} + 151,640 \text{ kN} = 0 \quad \Rightarrow \quad N_{0z} = 7\,834,709 \text{ kN}$$

Osové síly N_i a její směr α_i :

$$N_i = \sqrt{H^2 + N_{iz}^2}, \quad \text{tg} \alpha_i = \frac{N_{iz}}{H} \Rightarrow \alpha_i$$

Svislé souřadnice z'_i od předchozího vrcholu:

$$z'_i = x_i \text{tg} \alpha_{(i-1)}$$

Svislé souřadnice z_i od bodu a :

$$z_i = \sum z'_i$$

Délka strany polygonu l_i :

$$l_i = \sqrt{(x_i)^2 + (z'_i)^2}$$

Poměrné prodloužení jednotlivých stran lana Δl_i :

$$\Delta l_i = \frac{N_i l_i}{E A}$$

Tabulka 1: Výsledky prvního ručního výpočtu

i	N _i z [kN]	N _i [kN]	α _i [°]	z' _i [m]	z _i [m]	l _i [m]	Δ l _i [mm]
0	7 834,709	19 561,663	23,610	0,000	0,000	0,000	0,000
1	7 581,976	19 461,818	22,928	1,998	1,998	4,990	2,355
2	7 379,790	19 383,945	22,378	1,289	3,288	3,309	1,556
3	7 177,604	19 307,874	21,823	1,255	4,543	3,296	1,543
4	6 975,418	19 233,629	21,264	1,221	5,763	3,283	1,532
5	6 773,232	19 161,229	20,701	1,186	6,949	3,271	1,520
6	6 571,046	19 090,696	20,133	1,152	8,101	3,258	1,509
7	6 368,860	19 022,050	19,561	1,117	9,219	3,246	1,498
8	6 166,674	18 955,313	18,985	1,083	10,302	3,235	1,487
9	5 964,488	18 890,504	18,405	1,049	11,350	3,223	1,477
10	5 762,302	18 827,643	17,822	1,014	12,365	3,212	1,467
11	5 560,116	18 766,750	17,234	0,980	13,344	3,202	1,457
12	5 357,930	18 707,844	16,643	0,945	14,290	3,191	1,448
13	5 155,744	18 650,944	16,047	0,911	15,201	3,181	1,439
14	4 953,558	18 596,068	15,449	0,877	16,078	3,172	1,430
15	4 751,372	18 543,234	14,847	0,842	16,920	3,162	1,422
16	4 549,186	18 492,461	14,241	0,808	17,728	3,153	1,414
17	4 347,000	18 443,764	13,632	0,774	18,502	3,145	1,407
18	4 144,814	18 397,160	13,020	0,739	19,241	3,136	1,399
19	3 942,628	18 352,665	12,405	0,705	19,946	3,128	1,392
20	3 740,442	18 310,295	11,787	0,670	20,616	3,121	1,386
21	3 538,256	18 270,065	11,167	0,636	21,252	3,114	1,380
22	3 336,070	18 231,988	10,543	0,602	21,854	3,107	1,374
23	3 133,883	18 196,077	9,917	0,567	22,421	3,100	1,368
24	2 931,697	18 162,347	9,289	0,533	22,954	3,094	1,363
25	2 729,511	18 130,809	8,659	0,499	23,453	3,089	1,358
26	2 527,325	18 101,475	8,026	0,464	23,917	3,083	1,353
27	2 325,139	18 074,354	7,391	0,430	24,347	3,078	1,349
28	2 122,953	18 049,458	6,755	0,395	24,742	3,074	1,345
29	1 920,767	18 026,796	6,117	0,361	25,103	3,069	1,342
30	1 718,581	18 006,375	5,477	0,327	25,430	3,065	1,339
31	1 516,395	17 988,203	4,836	0,292	25,722	3,062	1,336
32	1 314,209	17 972,289	4,193	0,258	25,980	3,059	1,333
33	1 112,023	17 958,636	3,550	0,223	26,203	3,056	1,331
34	909,837	17 947,251	2,906	0,189	26,392	3,054	1,329
35	707,651	17 938,138	2,261	0,155	26,547	3,052	1,328
36	505,465	17 931,300	1,615	0,120	26,667	3,050	1,327
37	303,279	17 926,739	0,969	0,086	26,753	3,049	1,326
38	101,093	17 924,459	0,323	0,052	26,805	3,048	1,325
39	-101,093	17 924,459	-0,323	0,017	26,822	3,048	1,325

$$\sum \Delta l_0 = 55,668$$

$$\sum l_0 = 124,268$$

$$\epsilon = 4,48E-04$$

Konstrukce je symetrická a výpočet byl proveden po osu symetrie. Z tabulky lze vyčíst, že poloviční délka lana je $l_0 = 124,268$ m. Vlivem normálových sil dojde k prodloužení o $\Delta l_0 = 55,668$ mm. Souřadnice bodu m se mění a snahou je, aby po zatížení lana deformace procházela předem stanoveným místem. Bude upravován průvės lana f dokud nevyhoví podmínka $l_0 = l_{(k)} + \Delta l_{(k)}$, kde k je krok iterací.

Tabulka 2: Jednotlivé výsledky z iteračních kroků

k	$z_m = f$ [m]	i	N_i [kN]	α_i [°]	$l_{(k)}$ [m]	$\Delta l_{(k)}$ [mm]	ϵ [-]	$\sum l_k + \sum \Delta l_k$ [m]	$(\sum l_k + \sum \Delta l_k) - l_0$ [mm]
1	26,200	0	19 952,299	23,121	124,095	56,833	4,58E-04	124,152	-116,114
		39	18 349,980	0,316					
2	26,500	0	19 761,420	23,357	124,178	56,264	4,53E-04	124,234	-33,724
		39	18 142,251	0,319					
3	26,600	0	19 698,825	23,436	124,206	56,077	4,51E-04	124,262	-6,068
		39	18 074,049	0,320					
4	26,650	0	19 667,717	23,475	124,220	55,985	4,51E-04	124,276	7,795
		39	18 040,140	0,321					
5	26,625	0	19 683,255	23,456	124,213	56,031	4,51E-04	124,269	0,861
		39	18 057,079	0,321					
6	26,620	0	19 686,367	23,452	124,212	56,040	4,51E-04	124,268	-0,526
		39	18 060,470	0,321					
7	26,623	0	19 684,500	23,454	124,212	56,035	4,51E-04	124,268	0,306
		39	18 058,435	0,321					
8	26,621	0	19 685,744	23,453	124,212	56,038	4,51E-04	124,268	-0,249
		39	18 059,792	0,321					
9	26,622	0	19 685,122	23,453	124,212	56,037	4,51E-04	124,268	0,029
		39	18 059,114	0,321					

Bylo provedeno 9 iterací tak, že byla měněna hodnota průvėsu lana f . Z tabulky lze vyčíst, že velikost f je nepřímó úměrná osové síle N_i , a přímó úměrná úhlu α v bodech O . Iterační kroky 6 až 9 již splňují podmínku $l_0 = l_{(k)} + \Delta l_{(k)}$, tedy $l_0 = 124,268$ m, ale cílem bylo najít co nejpřesnější hodnotu. To bylo zjištěno z rozdílů hodnot. Nejmenší rozdíl byl stanoven v devátém kroku, kde byl nastaven průvės na 26,622 m. Hodnoty v tomto kroku budeme považovat jako počáteční stav a budeme je porovnávat s výsledky ze softwaru.

Tabulka 3: Výsledky 9. iteraci ručního výpočtu

i	$N_i z$ [kN]	N_i [kN]	α_i [°]	z'_i [m]	z_i [m]	l_i [m]	Δl_i [mm]
0	7 834,709	19 685,122	23,453	0,000	0,000	0,000	0,000
1	7 581,976	19 585,906	22,775	1,984	1,984	4,984	2,367
2	7 379,790	19 508,528	22,228	1,280	3,263	3,306	1,564
3	7 177,604	19 432,945	21,676	1,246	4,509	3,293	1,552
4	6 975,418	19 359,179	21,120	1,211	5,720	3,280	1,540
5	6 773,232	19 287,251	20,559	1,177	6,898	3,267	1,528
6	6 571,046	19 217,180	19,995	1,143	8,041	3,255	1,517
7	6 368,860	19 148,988	19,426	1,109	9,150	3,244	1,506
8	6 166,674	19 082,695	18,854	1,075	10,225	3,232	1,496
9	5 964,488	19 018,320	18,277	1,041	11,266	3,221	1,486
10	5 762,302	18 955,883	17,697	1,007	12,272	3,210	1,476
11	5 560,116	18 895,403	17,113	0,973	13,245	3,199	1,466
12	5 357,930	18 836,899	16,525	0,938	14,183	3,189	1,457
13	5 155,744	18 780,390	15,934	0,904	15,088	3,179	1,448
14	4 953,558	18 725,894	15,339	0,870	15,958	3,170	1,440
15	4 751,372	18 673,428	14,741	0,836	16,794	3,161	1,431
16	4 549,186	18 623,009	14,139	0,802	17,596	3,152	1,423
17	4 347,000	18 574,654	13,534	0,768	18,364	3,143	1,416
18	4 144,814	18 528,380	12,926	0,734	19,097	3,135	1,409
19	3 942,628	18 484,201	12,316	0,700	19,797	3,127	1,402
20	3 740,442	18 442,133	11,702	0,665	20,462	3,120	1,395
21	3 538,256	18 402,191	11,085	0,631	21,094	3,113	1,389
22	3 336,070	18 364,388	10,466	0,597	21,691	3,106	1,383
23	3 133,883	18 328,737	9,845	0,563	22,254	3,100	1,378
24	2 931,697	18 295,251	9,221	0,529	22,783	3,094	1,373
25	2 729,511	18 263,943	8,595	0,495	23,278	3,088	1,368
26	2 527,325	18 234,822	7,967	0,461	23,738	3,083	1,363
27	2 325,139	18 207,901	7,337	0,427	24,165	3,078	1,359
28	2 122,953	18 183,187	6,705	0,392	24,557	3,073	1,355
29	1 920,767	18 160,692	6,071	0,358	24,916	3,069	1,352
30	1 718,581	18 140,421	5,436	0,324	25,240	3,065	1,349
31	1 516,395	18 122,385	4,800	0,290	25,530	3,062	1,346
32	1 314,209	18 106,588	4,162	0,256	25,786	3,059	1,343
33	1 112,023	18 093,036	3,524	0,222	26,008	3,056	1,341
34	909,837	18 081,736	2,884	0,188	26,195	3,054	1,339
35	707,651	18 072,690	2,244	0,154	26,349	3,052	1,338
36	505,465	18 065,903	1,603	0,119	26,468	3,050	1,336
37	303,279	18 061,377	0,962	0,085	26,554	3,049	1,336
38	101,093	18 059,114	0,321	0,051	26,605	3,048	1,335
39	-101,093	18 059,114	-0,321	0,017	26,622	3,048	1,335

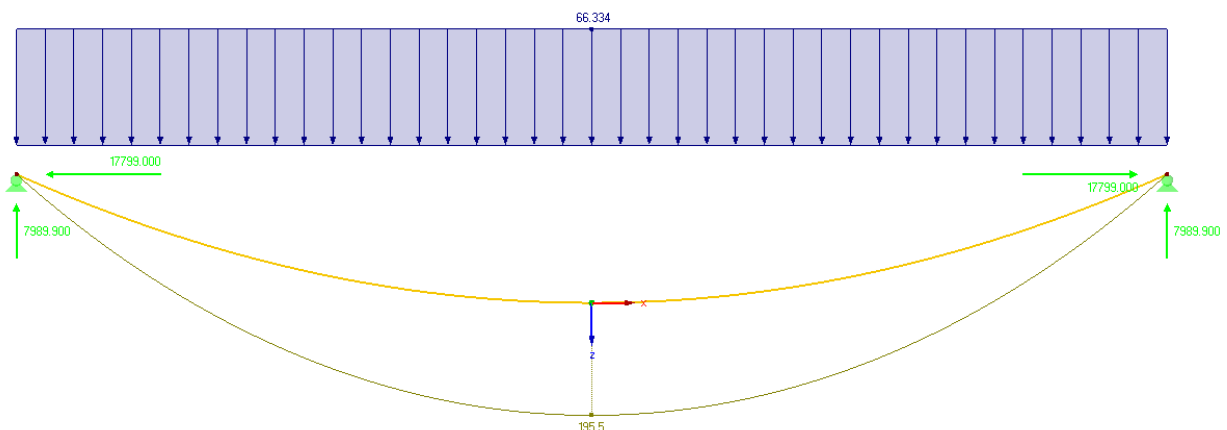
$\Sigma \Delta l_9 =$ **56,037**
 $\Sigma l_9 =$ **124,212**
 $\epsilon =$ **4,51E-04**

4.3 VÝPOČET POMOCÍ PROGRAMU

Následně byly vytvořeny modely pro analýzu lana v softwaru RFEM, kde bylo zatížení od vlastní tíhy již určeno ručním výpočtem, kterým byla zkoumaná konstrukce zatěžována. Pro analýzu byla zvolena metoda velkých deformací, pro řešení systému byla zvolena metoda Newton-Raphsonova. Maximální počet iterací byl zvolen 100 a počet přírůstků zatížení pro zatěžovací stavy bylo 5. Počet dělení prutu bylo nastaveno na 10. Pro ocelové prvky byla zvolena ocel třídy S355, betonové prvky byly modelovány z betonu třídy C35/45 [4].

4.3.1 MODEL Č. 1

V modelu č. 1 byl vytvořen jednoduchý model lana, který byl veden přes 3 předem definované body: a [0,000; 0,000], m [120,396; 26,822], b [240,792; 0,000] jako parabola o průměru lana $d_l = 0,5$ m. Délka lana je $l = 248,537$ m, při čemž lano bylo uloženo v bodech a a b na pevných kloubech. Velikost zatížení na průmět lana od vlastní tíhy byla $g = 66,334$ kN/m.



Obrázek 15: Model 1 – Zatížení nosného lana vlastní tíhou

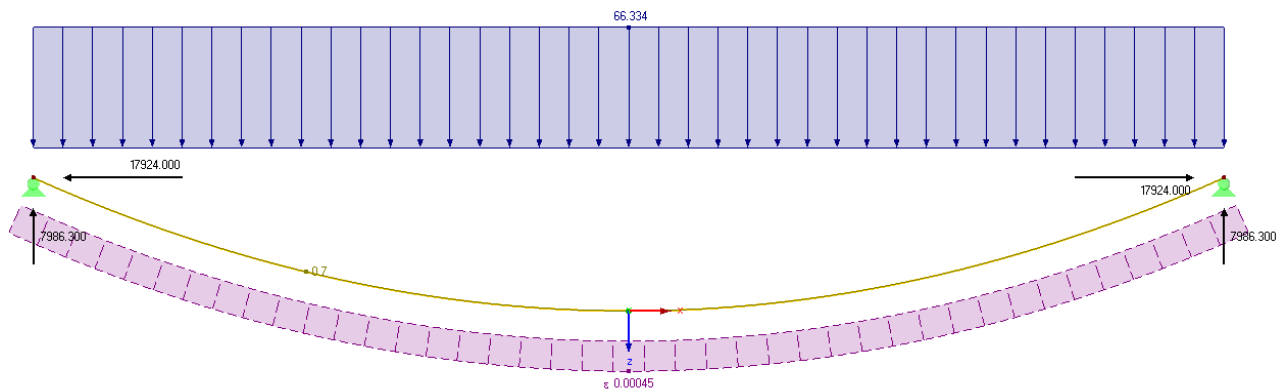
Výsledky z modelu č. 1 jsou následující:

$$R_{ax} = R_{bz} = H = 17\,799,000\text{ kN}$$

$$R_{az} = R_{bz} = 7\,989,900\text{ kN}$$

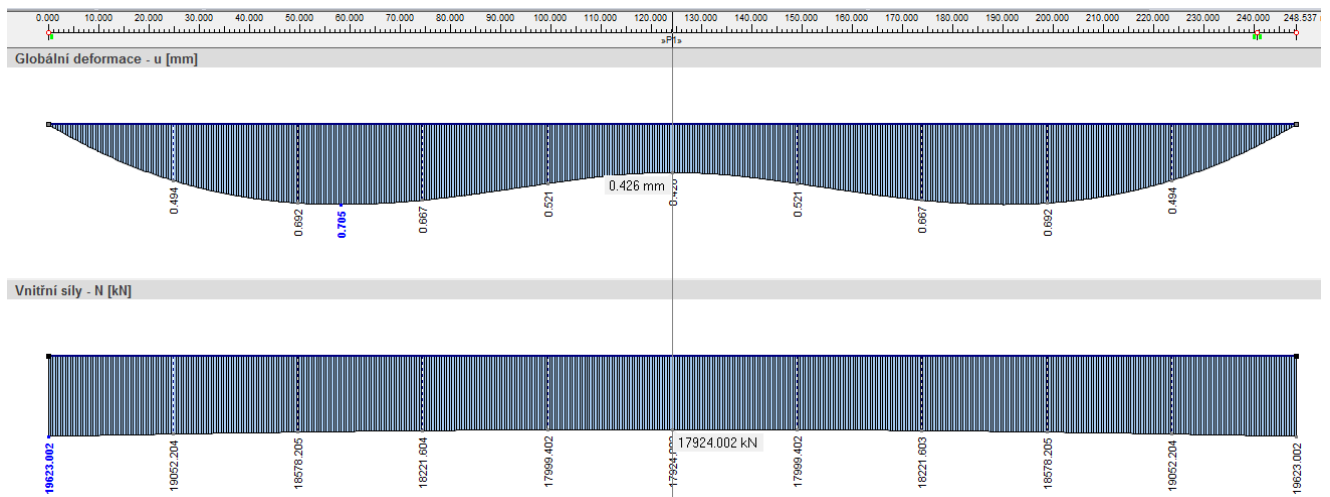
$$u = 195,5\text{ mm}$$

Reakce, které byly stanoveny ručním výpočtem jsou téměř totožné s výsledky z modelu č. 1, což znamená, že můžeme předpokládat správnost výsledků. Průhyb $u = 195,5\text{ mm}$ říká, že i výpočetní program započítává prodloužení lana, a proto bylo následně provedeno zkrácení o $\varepsilon = -0,00045$.



Obrázek 16: Model 1 – Zatížení vlastní tíhou a zkrácení lana

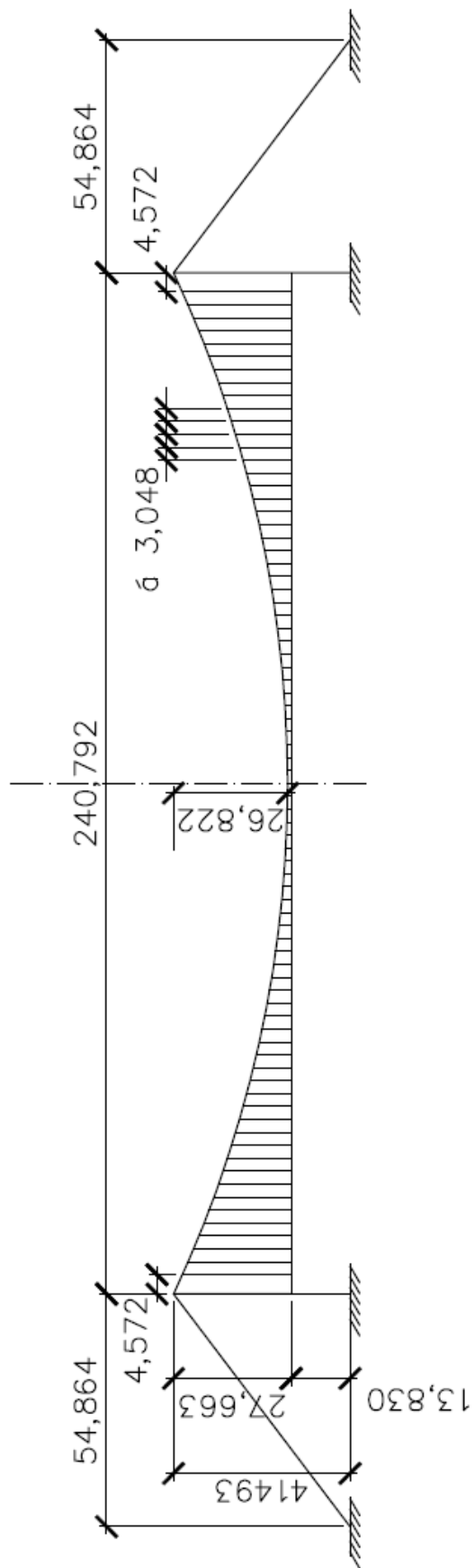
Výsledkem zkrácení byla změna reakce a přetvoření lana. Cílem bylo, aby průhyb byl co nejmenší vůči bodu *m*.



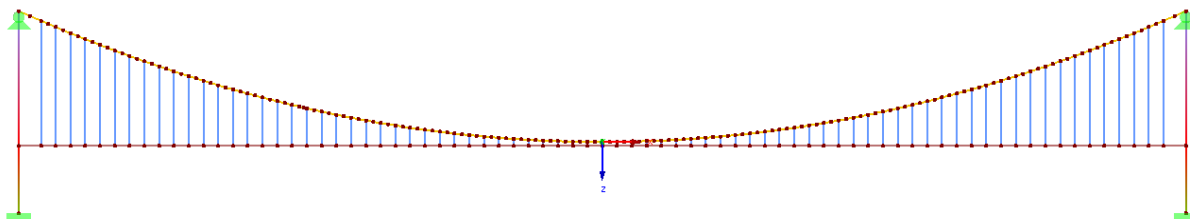
Obrázek 17: Model 1 – Průběh deformace a vnitřní síly lana

4.3.2 MODEL Č. 2

V modelu č. 2 byly namodelovány pylony, bylo namodelováno také všech 77 závěsů a mostovka. Z architektonického návrhu je patrné, že mostovka je nadvýšená, a byla vytvořena také jako parabola. Při dodržení přesnosti se vyskytly problémy, a to charakteru, že při modelování závěsů software nebyl schopný spojit dvě paraboly přes svislice. Aby bylo možné v modelování pokračovat, bylo nutné vytvořit mostovku bez nadvýšení. Kvůli tomu bylo nakonec přistoupeno k úpravě geometrie konstrukce.



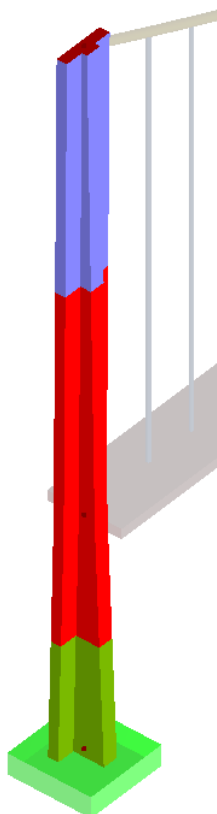
Obrázek 18: Model 2 – Změněný architektonický návrh pro softwarový výpočet



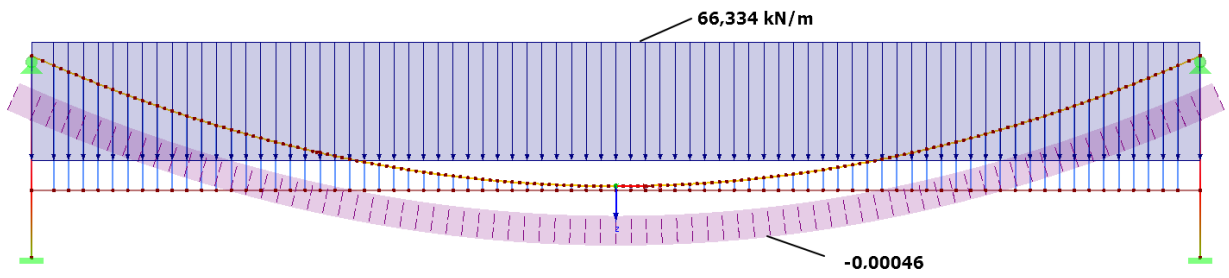
Obrázek 19: Model 2 – Geometrie modelu

Byl upraven model nyní již s přímou mostovkou. Celková výška pylonů zůstala stejná, změna se vyskytla pouze při jejím dělení horní a dolní části. Průřez pylonů po celé délce není konstantní, má lineární náběh, jeho tvar byl vytvořen stejně, jak byl udán v podkladech typem prutu jako nosník. Závěsy mají průměr $d_2 = 0,25$ m, typ prutu byl definován jako lano. Mostovka má typ prutu nosník s rozměry $b = 4,420$ m, $h = 0,610$ m.

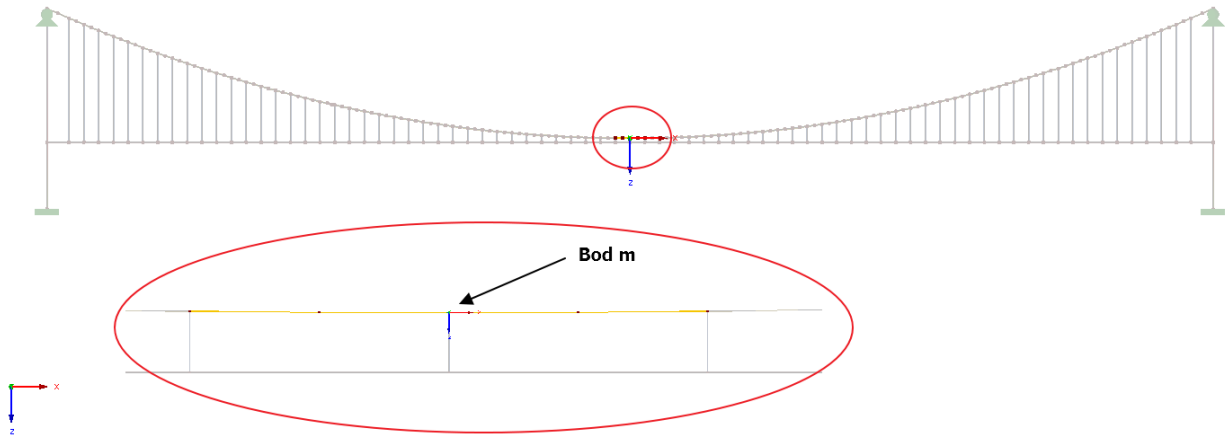
V zatížení byla změněna hodnota prodloužení na $\varepsilon = -0,00046$, aby svislý posun bodu m byl co nejmenší. Zkoumán byl bod m a první strana polygonu, která je označena jako 0 .



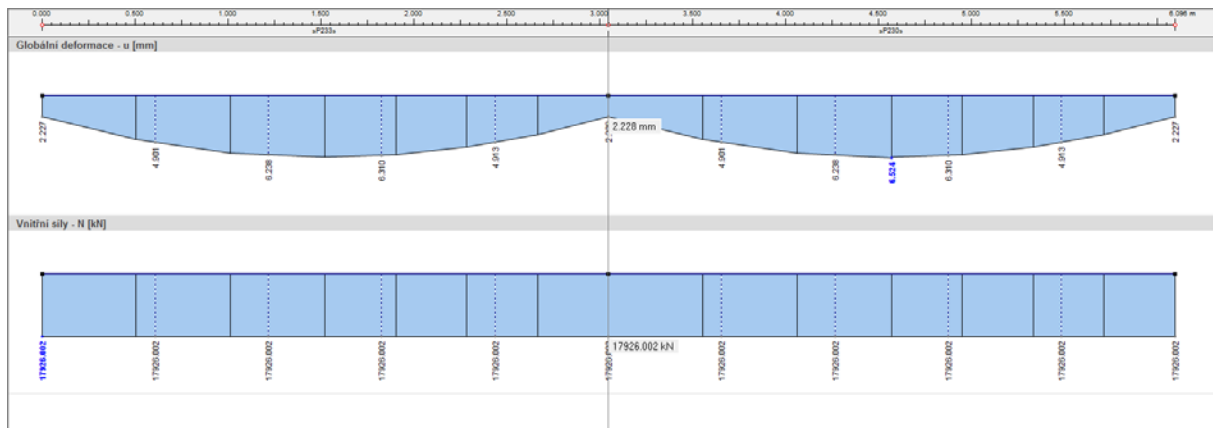
Obrázek 20: Model 2 – Pylon s lineárním náběhem (Obrázek 11)



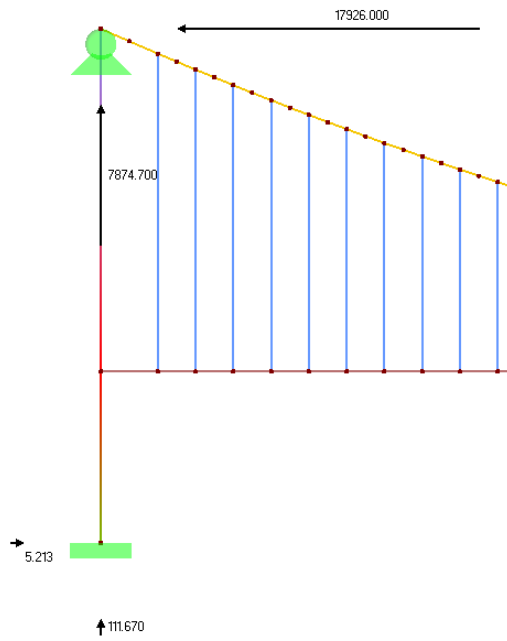
Obrázek 21: Model 2 – Zatížení



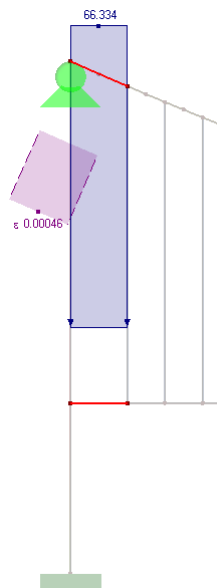
Obrázek 22: Model 2 – Zkoumaný bod *m*



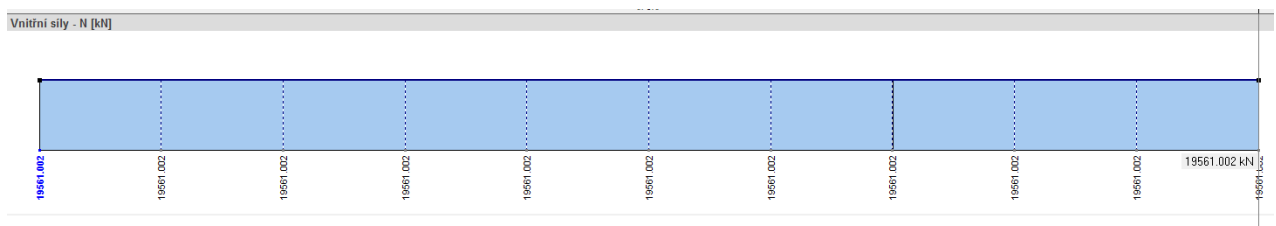
Obrázek 23: Model 2 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu *m*



Obrázek 24: Model 2 – Reakce



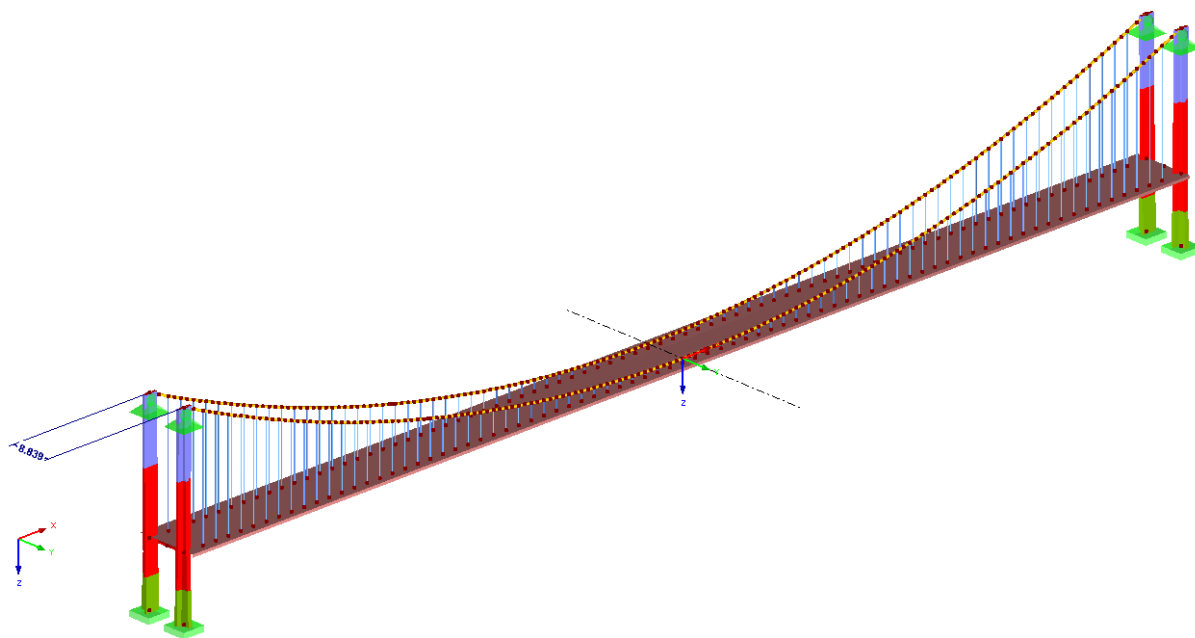
Obrázek 25: Model 2 – Zkoumaná strana polygonu 0



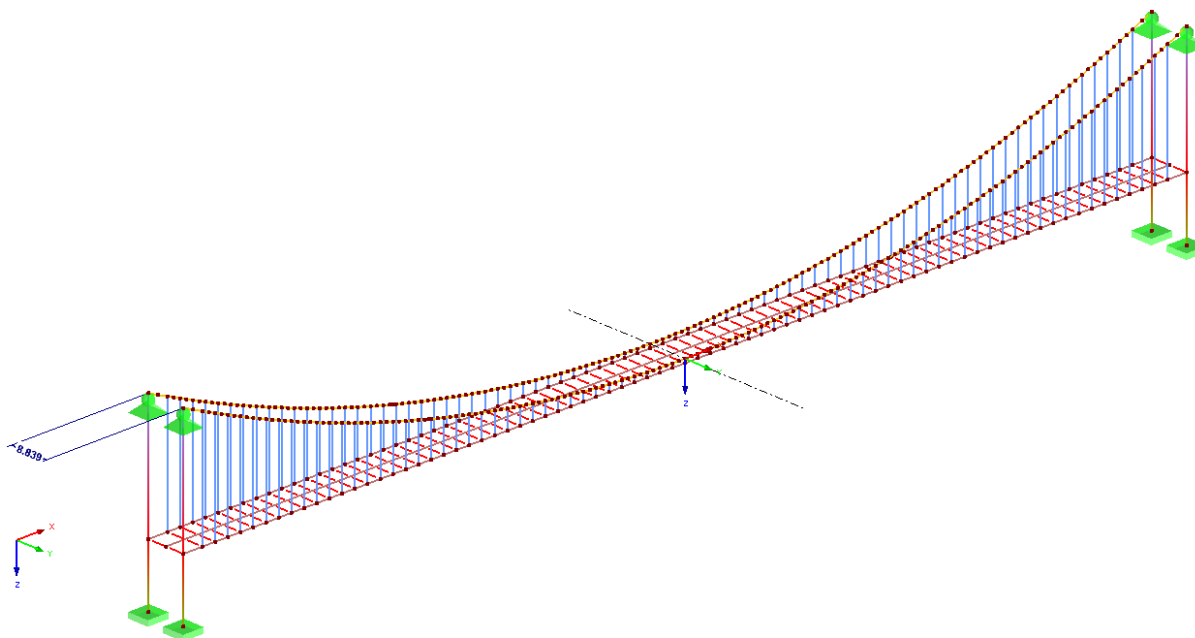
Obrázek 26: Model 2 – Průběh vnitřních sil na straně polygonu 0

4.3.3 MODEL Č. 3

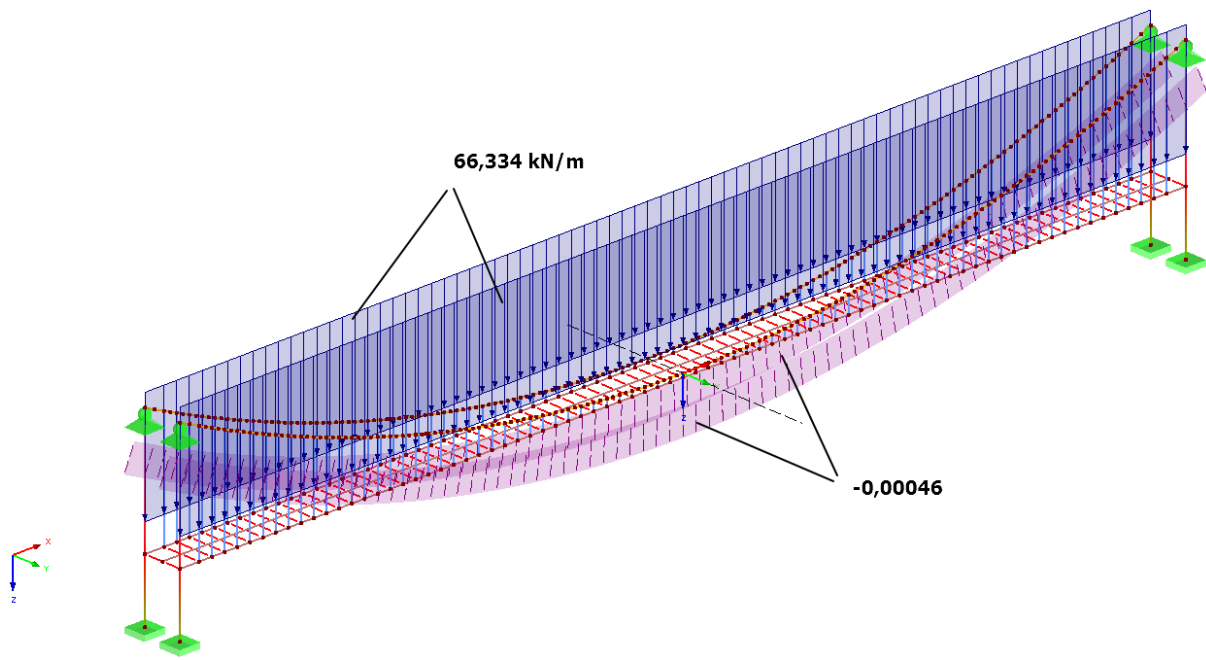
Úpravou modelu č. 3 se již návrh dostává do 3D úlohy. Stejně jako ve 2D úloze bylo vytvořeno hlavní nosné lano, oba pylony a závěsy ve vzdálenosti 8,839 m. Konstrukce byla spojena vazbou vetknutí-vetknutí. Zatížení nebylo upraveno, zkoumán byl nadále bod m a strana polygonu 0 .



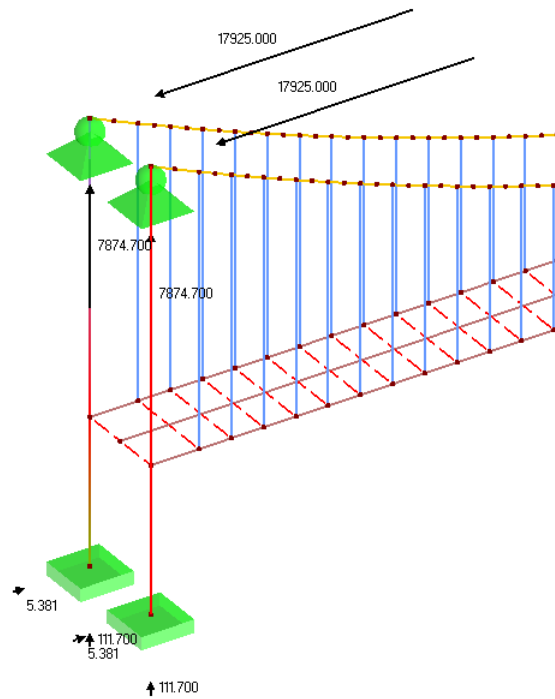
Obrázek 27: Model 3 – Geometrie plného modelu



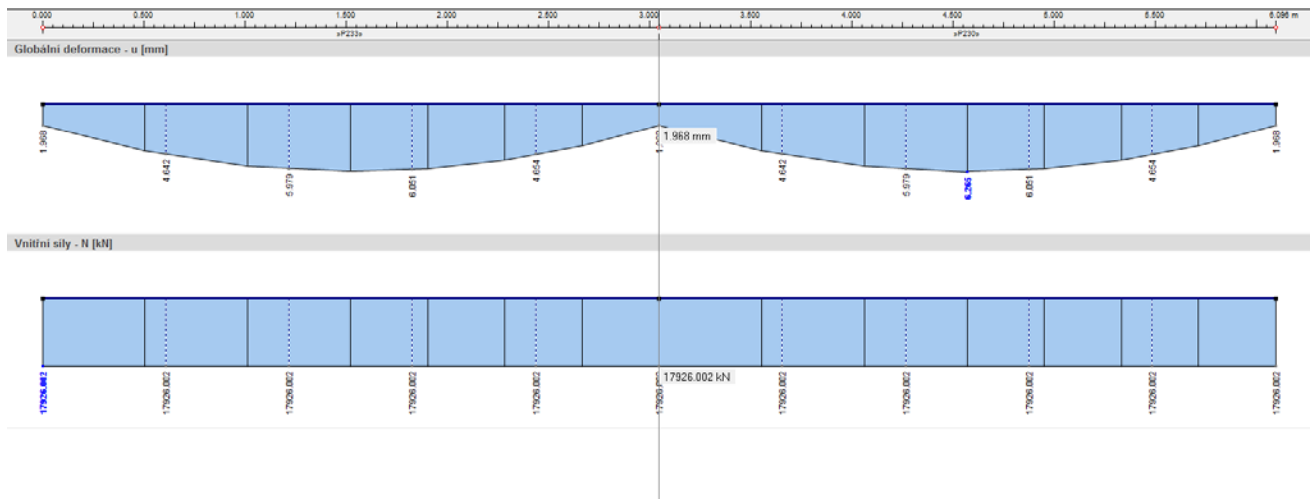
Obrázek 28: Model 2 – Geometrie drátěného modelu



Obrázek 29: Model 3 – Zatížení



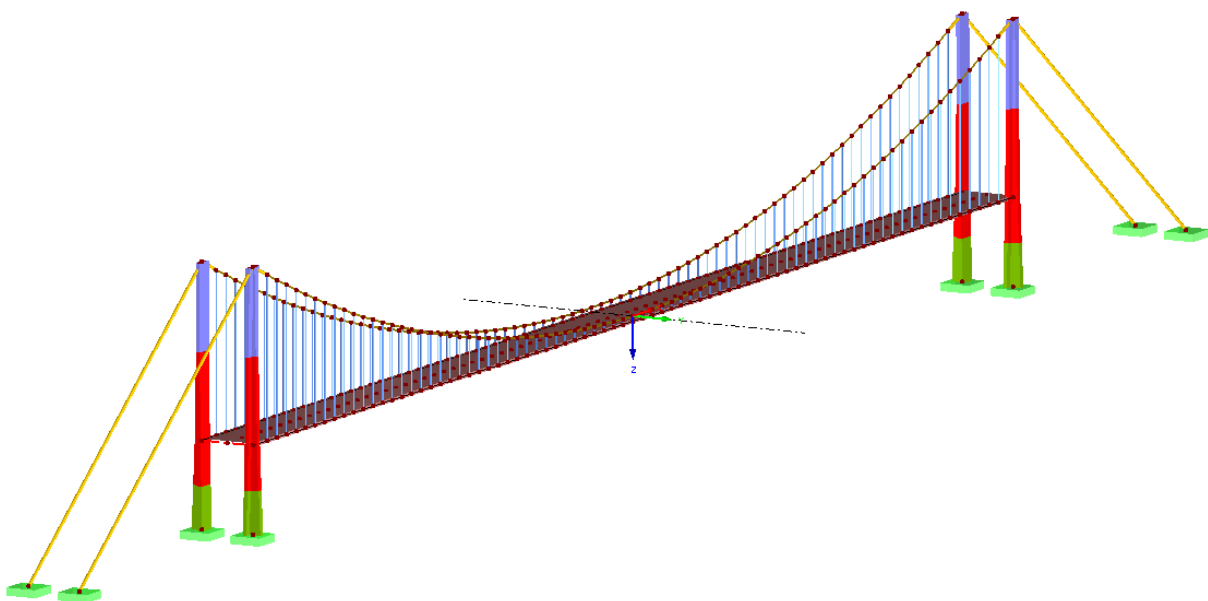
Obrázek 30: Model 3 – Reakce



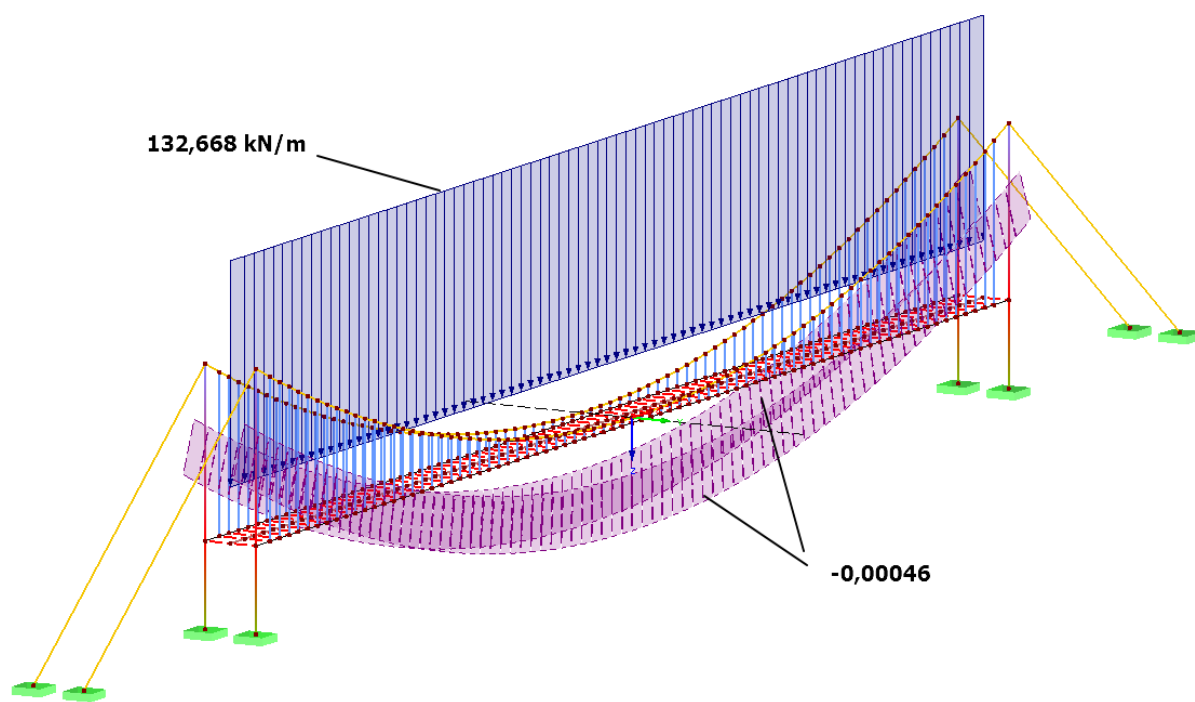
Obrázek 31: Model 3 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu m

4.3.4 MODEL Č. 4

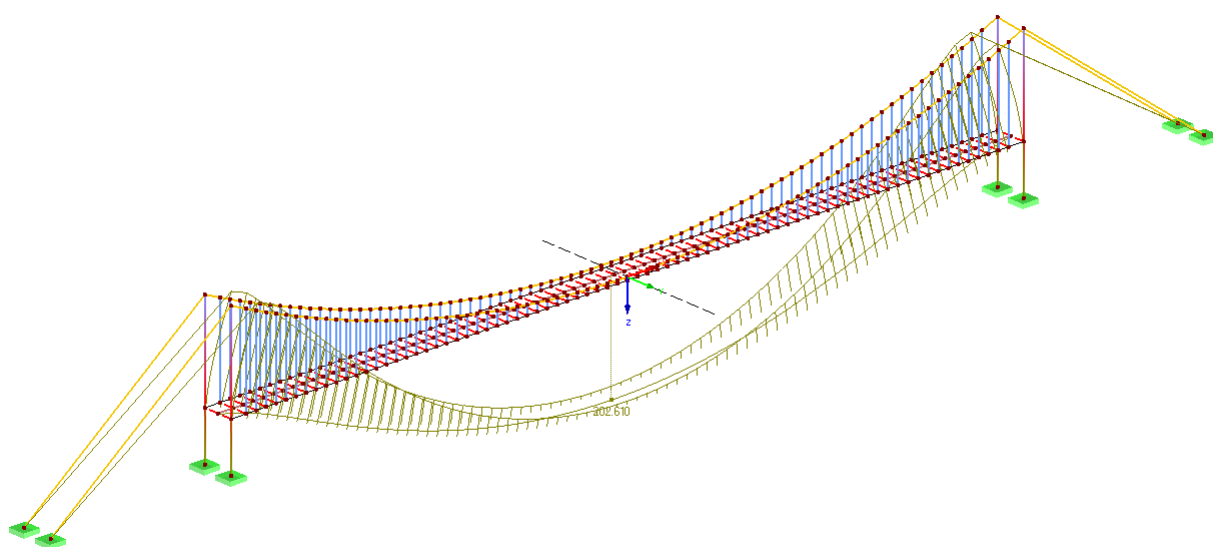
V modelu č. 4 bylo přidáno nosné lano ve vodorovné vzdálenosti 54,864 m za pylony a bylo uloženo ve stejné výškové úrovni jako pylon. V praxi je kotvení lana realizováno v kotevním bloku, proto byl v modelu vytvořen typ podpory vetknutí. Následně byly kloubové podpory v hlavě pylonu odstraněny. Poloha zatížení byla změněna na střednici mostovky a upravena na hodnotu celkové vlastní tíhy $g = 132,668 \text{ kN/m}$.



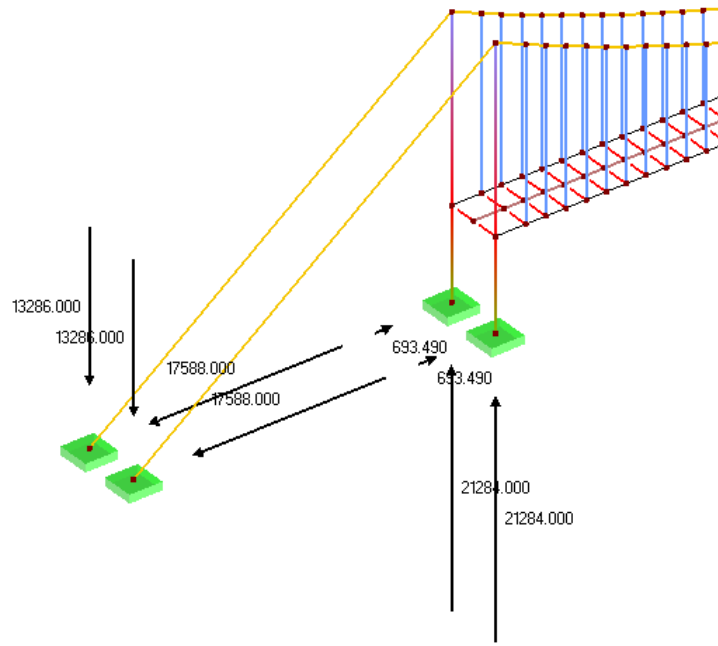
Obrázek 32: Model 4 – Geometrie plného modelu



Obrázek 33: Model 4 – Zatížení

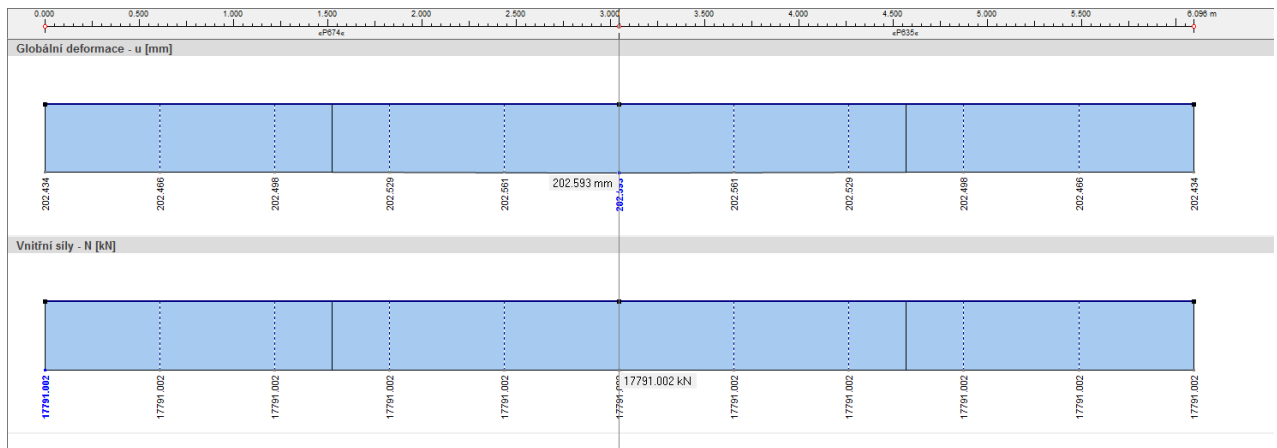


Obrázek 34: Model 4 – Průběh deformace celé konstrukce

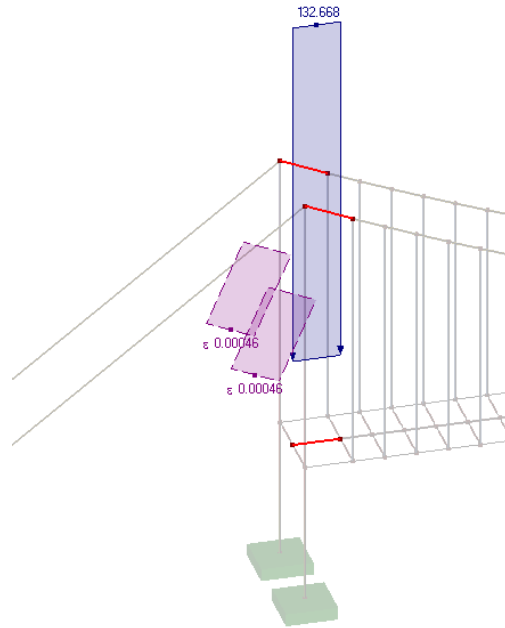


Obrázek 35: Model 4 – Reakce

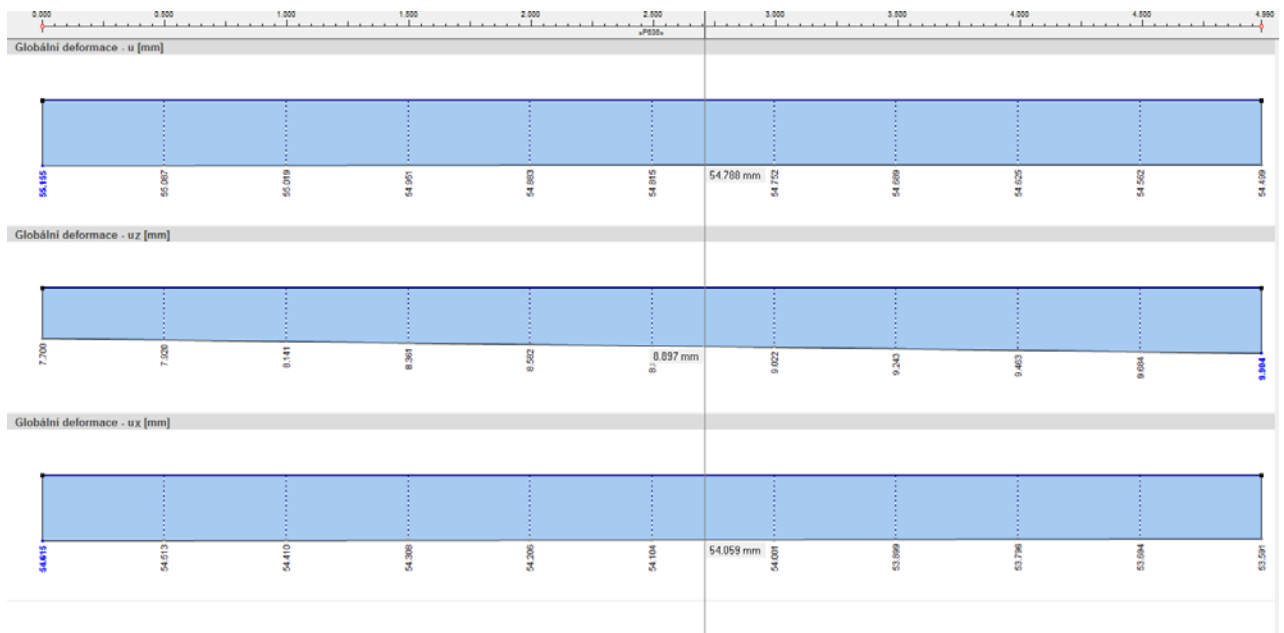
Z obrázku 34 lze vidět, že došlo k velkým deformacím. Tyto deformace byly způsobeny změnou uložení. Je potřeba zjistit míru deformace v monitorovaných částech m a θ , případně v úseku mezi vetknutí a pylonem.



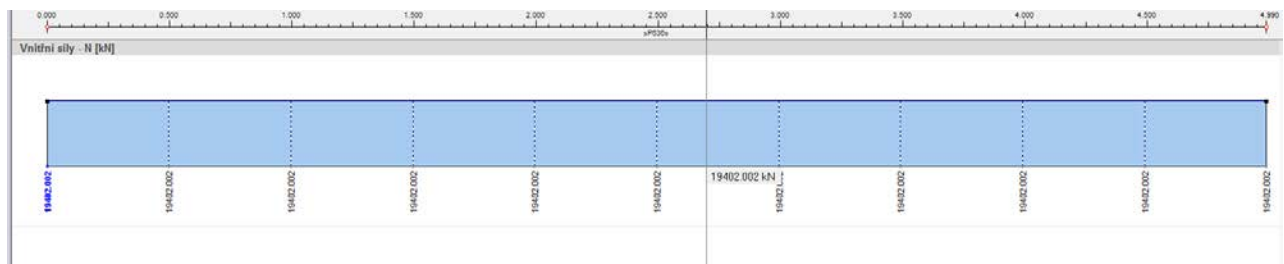
Obrázek 36: Model 4 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu m



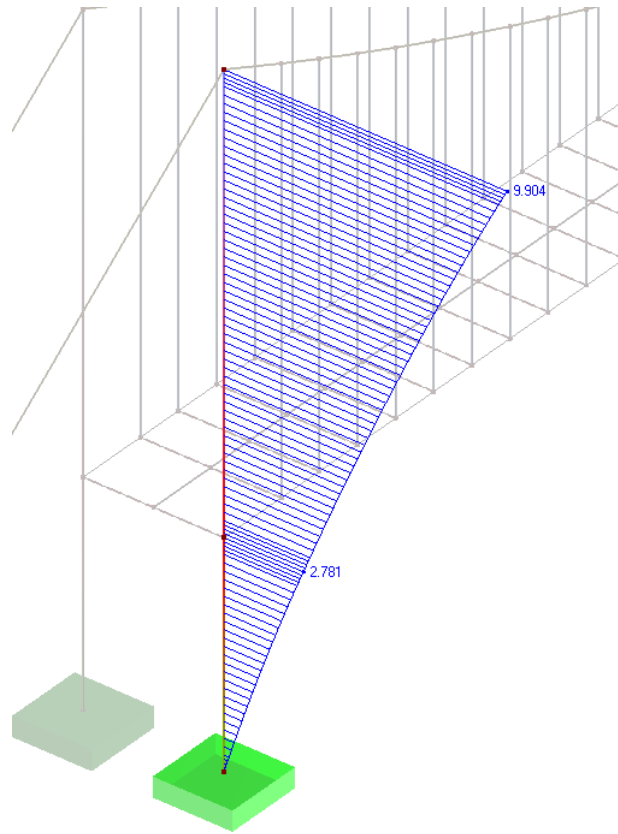
Obrázek 37: Model 4 – Zkoumaná strana polygonu 0



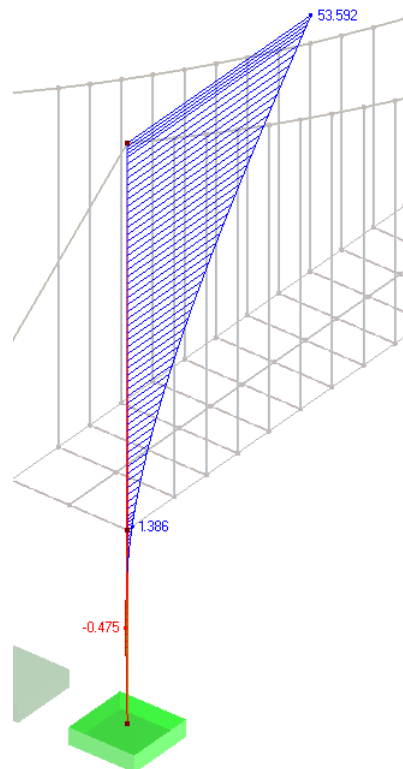
Obrázek 38: Model 4 – Celkové, svislé a vodorovné deformace na straně polygonu 0



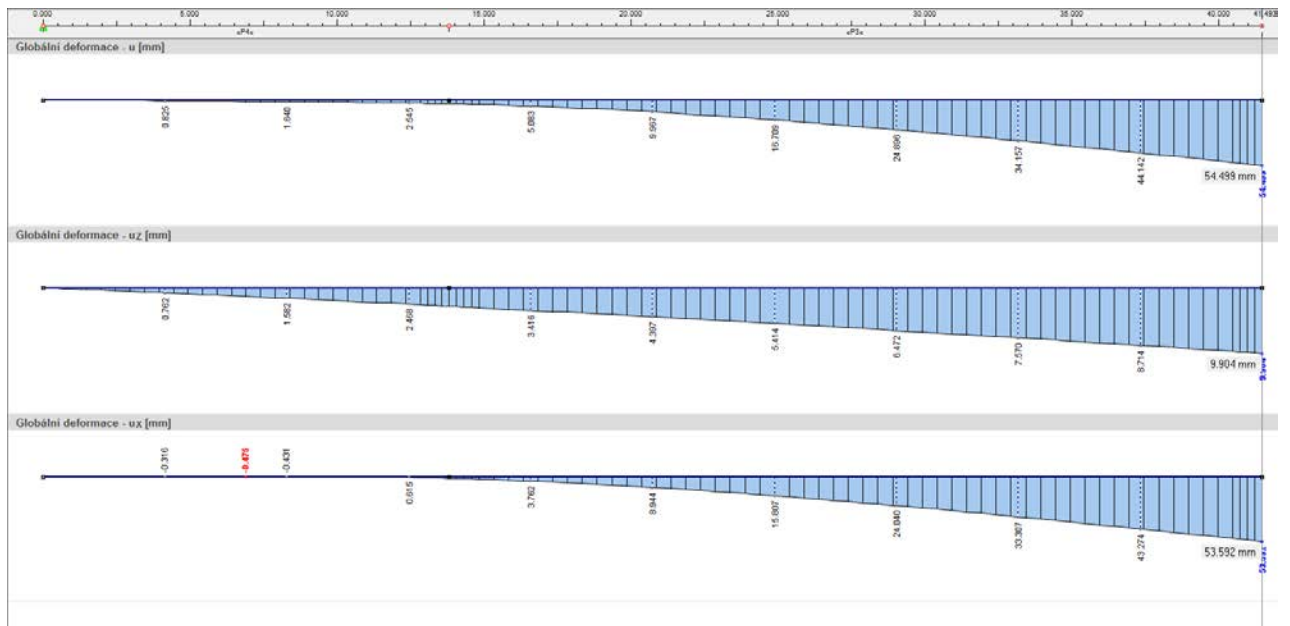
Obrázek 39: Model 4 – Průběh vnitřních sil na straně polygonu 0



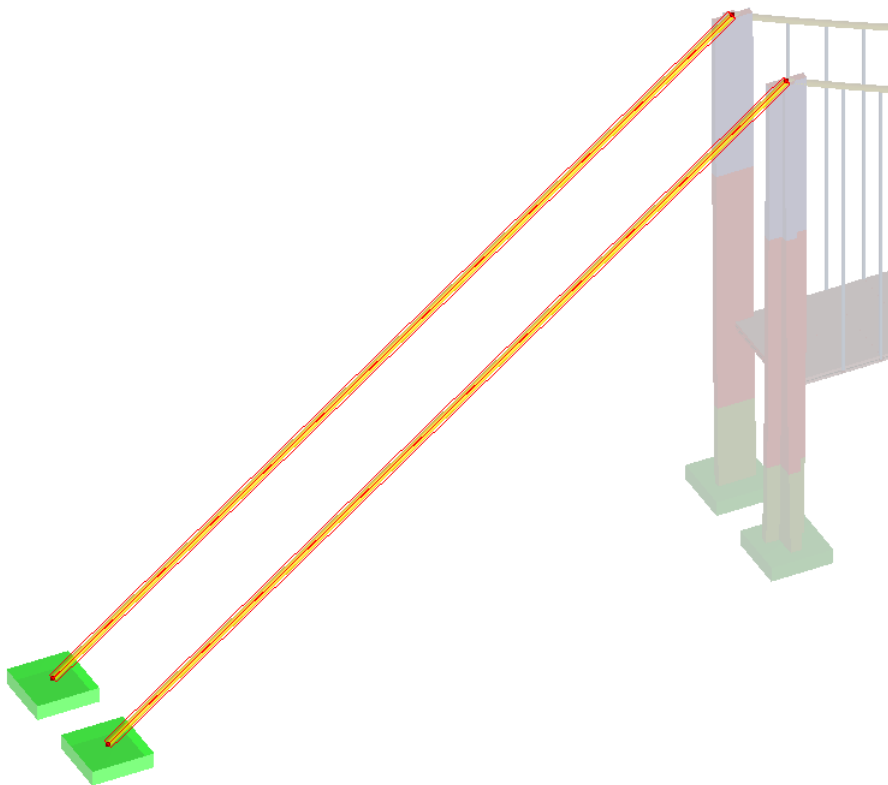
Obrázek 40: Model 4 – Svislý posun pylonu



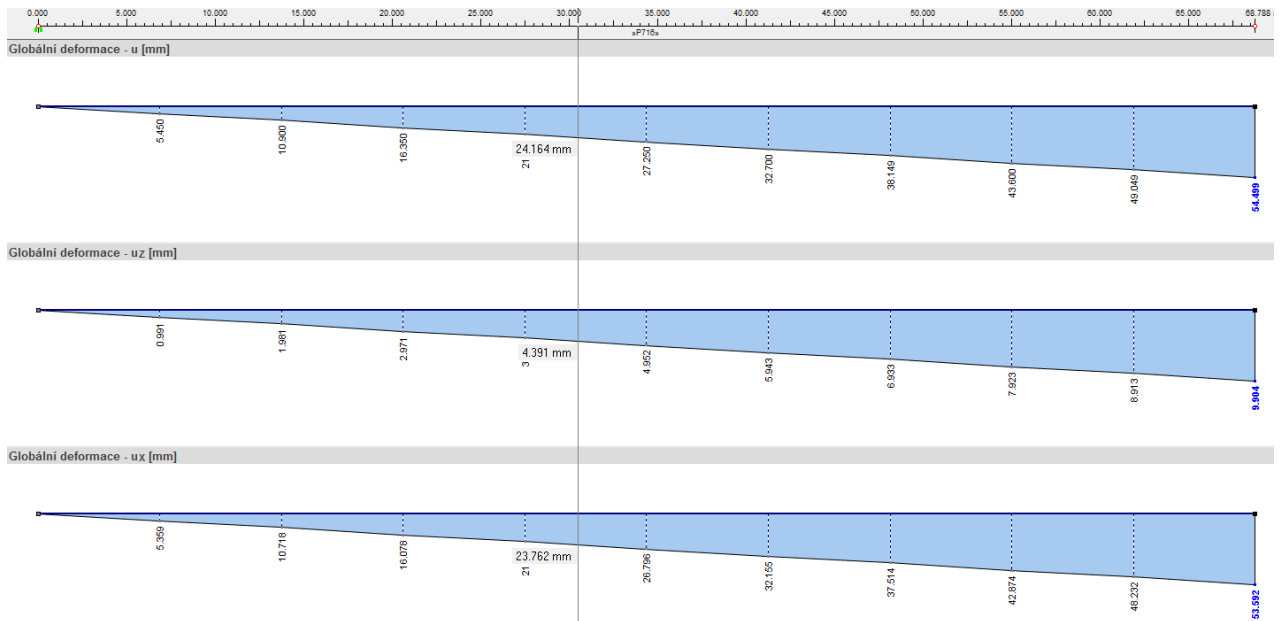
Obrázek 41: Model 4 – Vodorovný posun pylonu



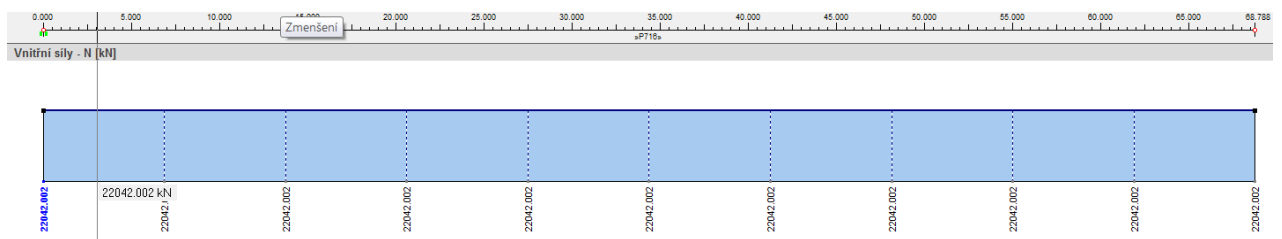
Obrázek 42: Model 4 – Celkové, svislé a vodorovné deformace pylonu



Obrázek 43: Model 4 – Zkoumaný úseku lana mezi pylonem a vetknutím



Obrázek 44: Model 4 – Celkové, svislé a vodorovné deformace úseku lana mezi pylonem a vetknutím

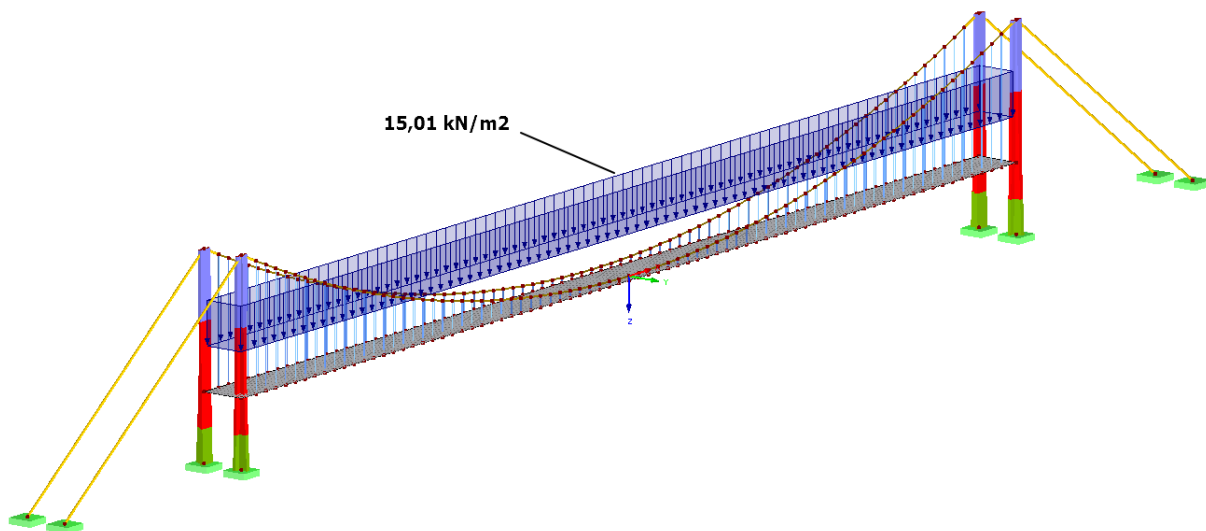


Obrázek 45: Model 4 – Průběh vnitřních sil na úseku lana mezi pylonem a vetknutím

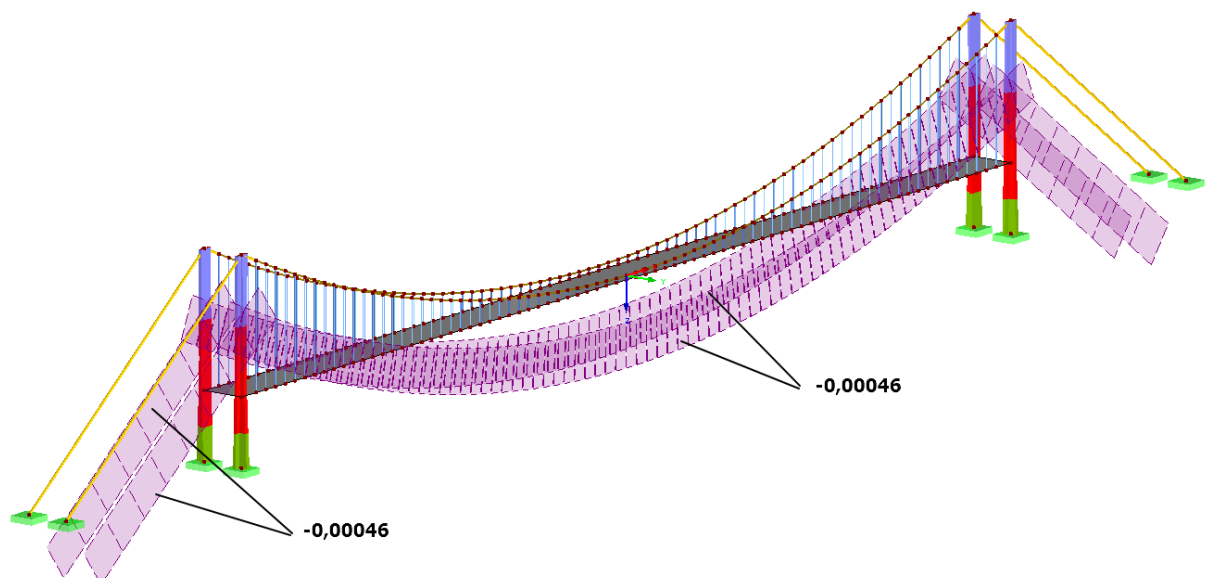
Byl zjištěn pokles bodu m o 202,953 mm, v úseku 0 došlo také relativně velkým posunům společného bodu s pylonem a krajním částem lana a to $u_z = 9,904\text{ mm}$, $u_x = 53,591\text{ mm}$. K deformacím zřejmě došlo kvůli prodloužením krajního lana. Aby mohly být tyto jevy eliminovány, bylo potřeba navrhnout zkrácení krajní části lana.

4.3.5 MODEL Č. 5

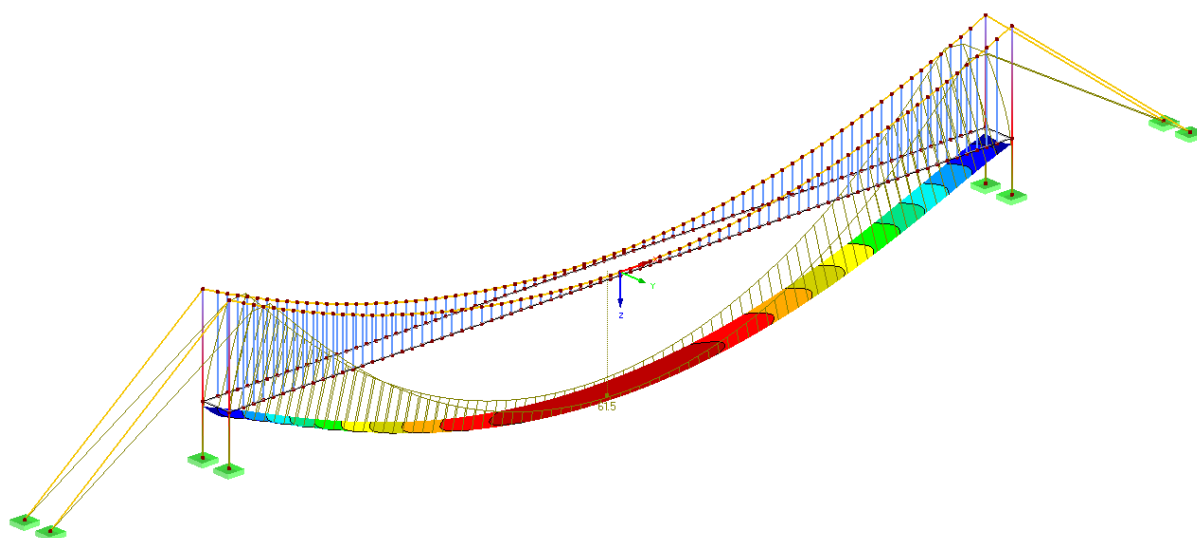
Geometrie konstrukce v modelu č. 5 nebyla upravena, změněna byla pouze mostovka. Byla zrušena vazba vetknutí-vetknutí a namísto toho vytvořena deska o šířce $b = 8,839\text{ m}$ a tloušťce $t = 0,610\text{ m}$. Deska byla zatížena plošným rovnoměrným zatížením $p = 15,010\text{ kN/m}^2$. Bylo navrženo také zkrácení krajního lana o $\varepsilon = -0,00046$.



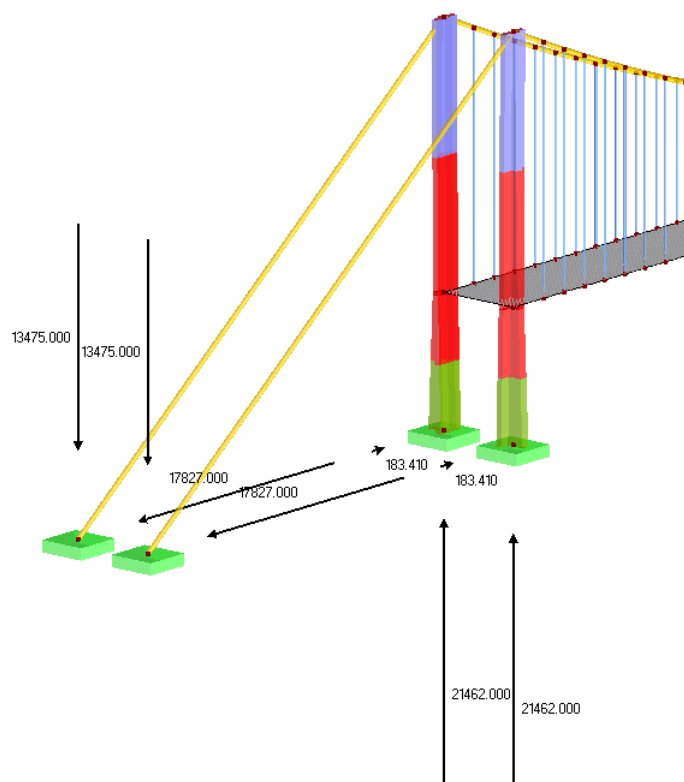
Obrázek 46: Model 5 – Plošné zatížení na desku mostovky



Obrázek 47: Model 5 – Zatížení zkrácením lana



Obrázek 48: Model 5 – Průběh deformace celé konstrukce

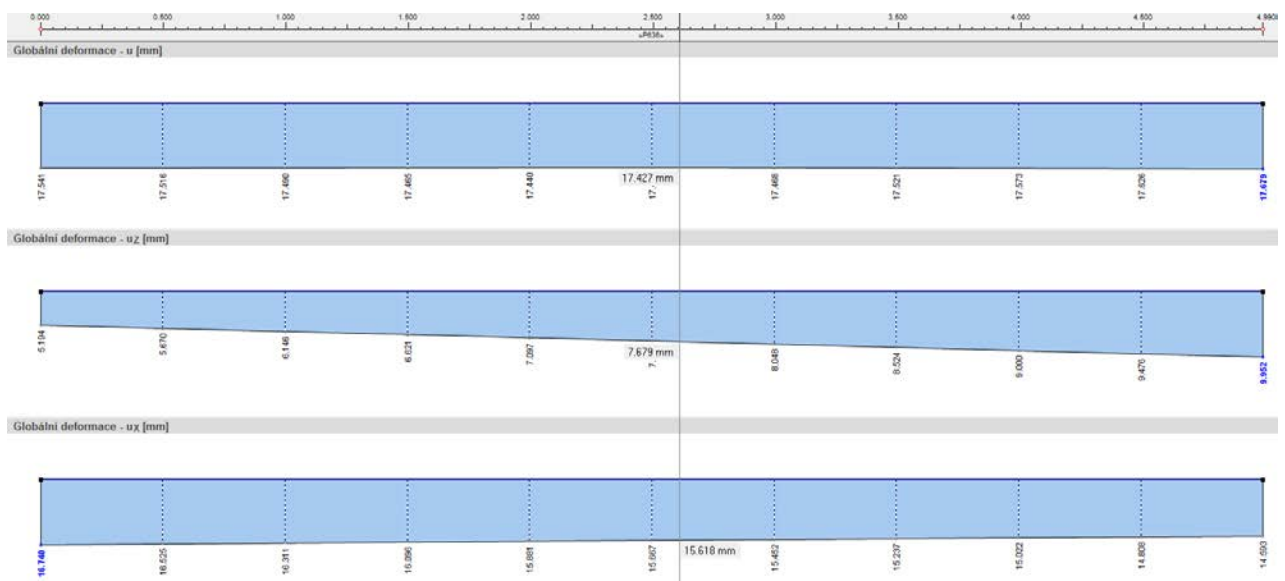


Obrázek 49: Model 5 – Reakce

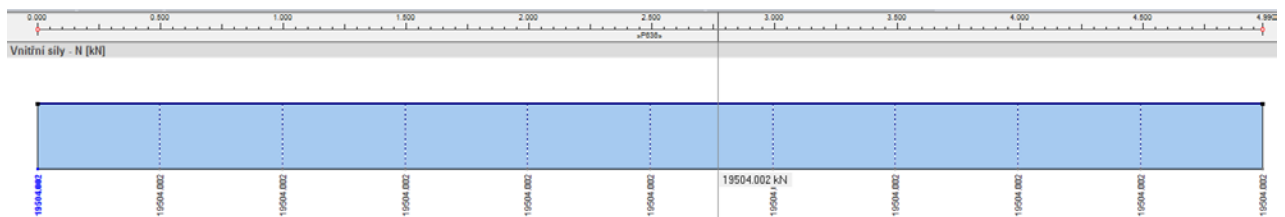
Z Obr. 48 je patrné, že dochází k menším deformacím. Problematika vyžaduje další kontrolu deformací zkoumaného bodu m , a úseků θ a mezi vetknutím a pylonem.



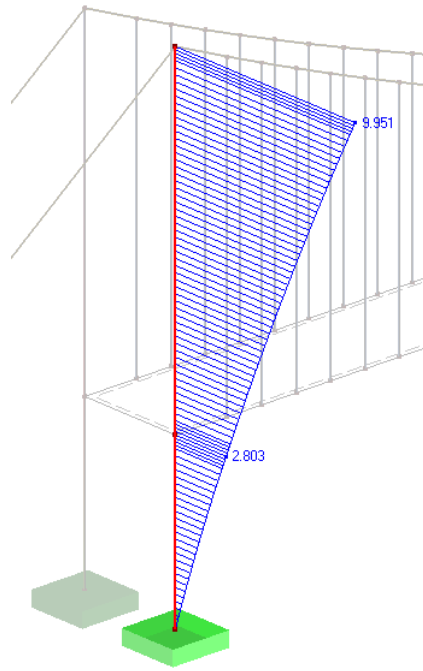
Obrázek 50: Model 5 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu m



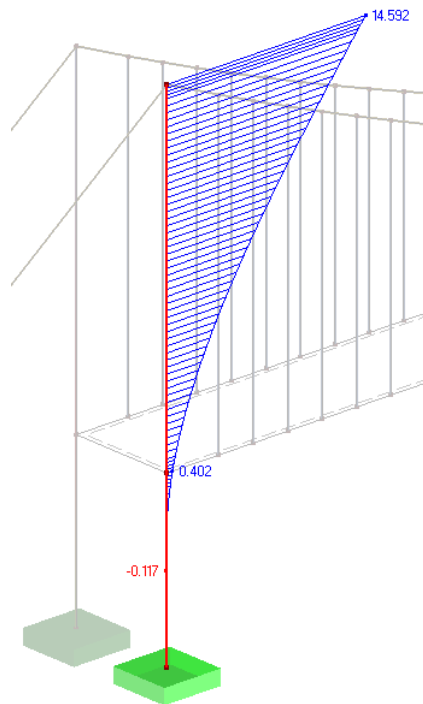
Obrázek 51: Model 5 – Celkové, svislé a vodorovné deformace na straně polygonu θ



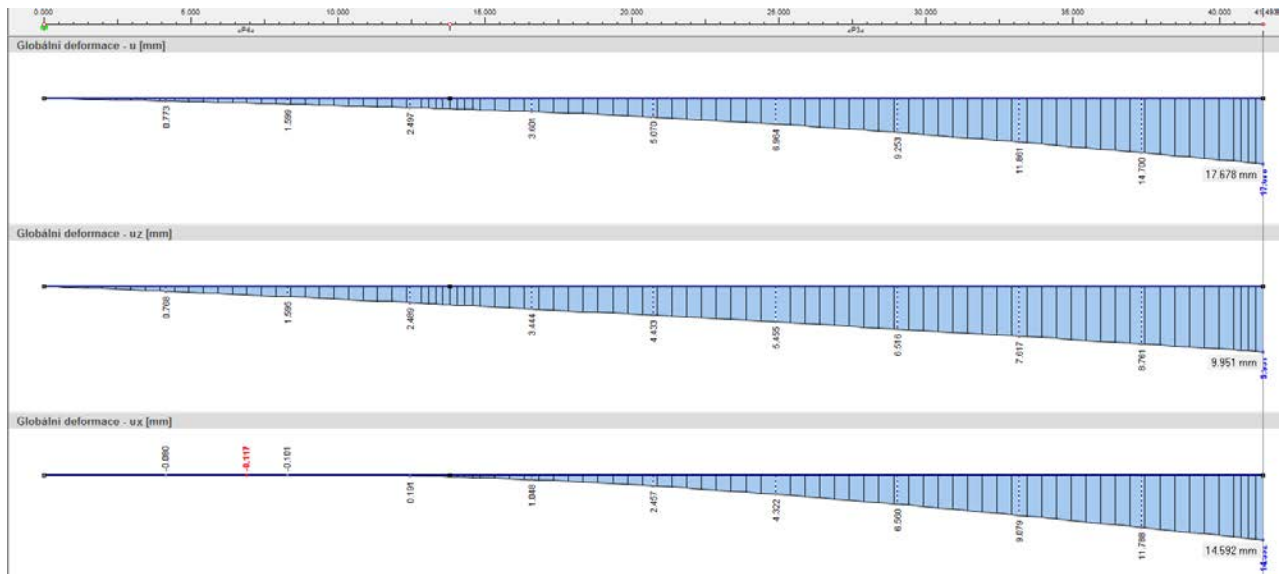
Obrázek 52: Model 5 – Průběh vnitřních sil na straně polygonu θ



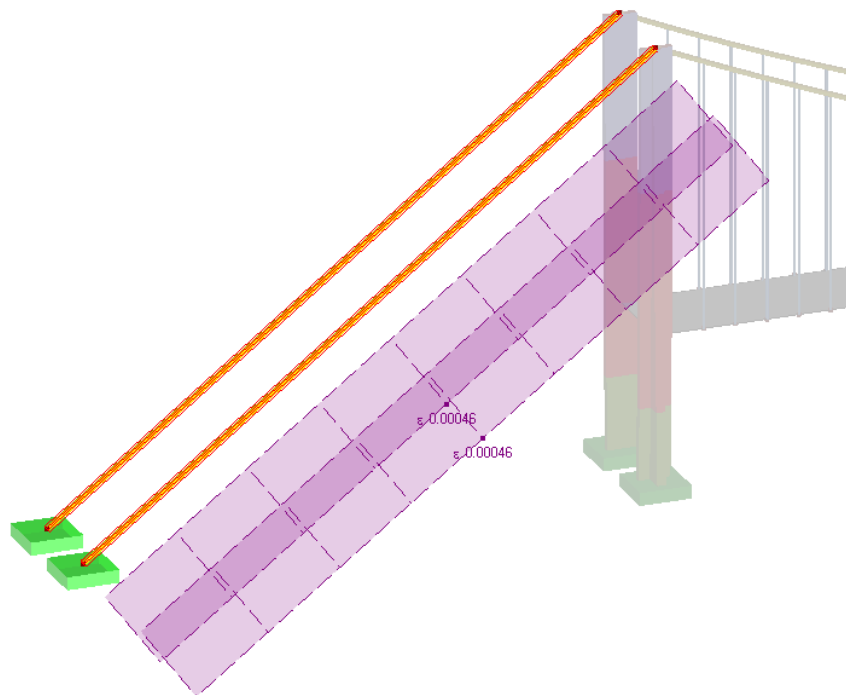
Obrázek 53: Model 5 – Svislý posun pylonu



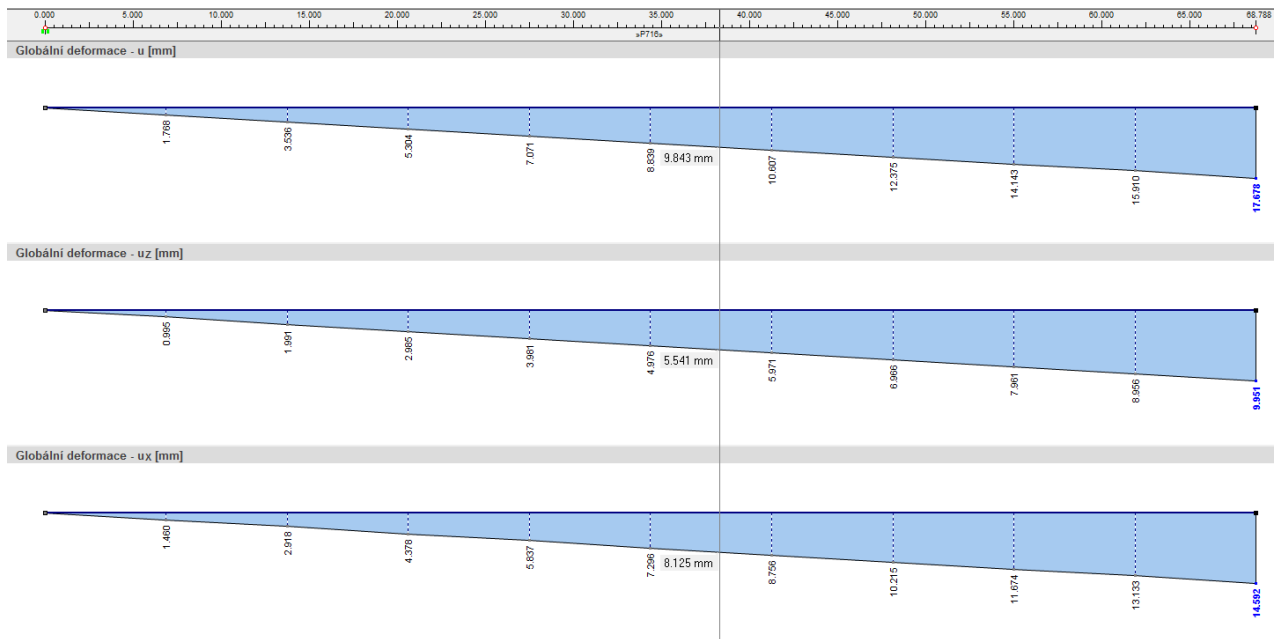
Obrázek 54: Model 5 – Vodorovný posun pylonu



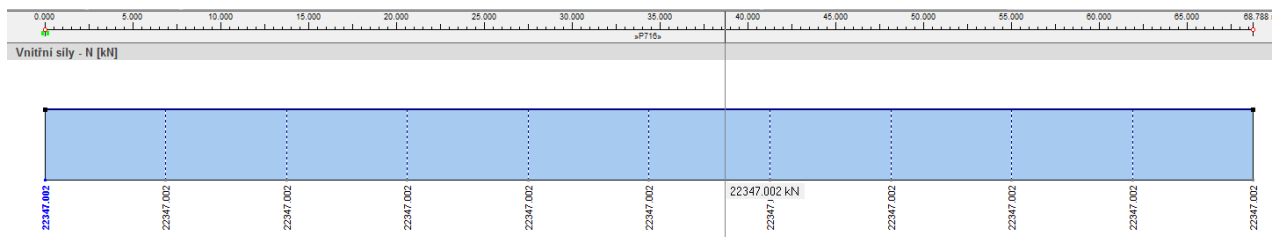
Obrázek 55: Model 5 – Celkové, svislé a vodorovné deformace pylonu



Obrázek 56: Model 5 – Zkoumaný úsek lana mezi pylonem a vetknutím včetně zkrácením



Obrázek 57 :Model 5 – Celkové, svislé a vodorovné deformace úseku lana mezi pylonem a vetknutím

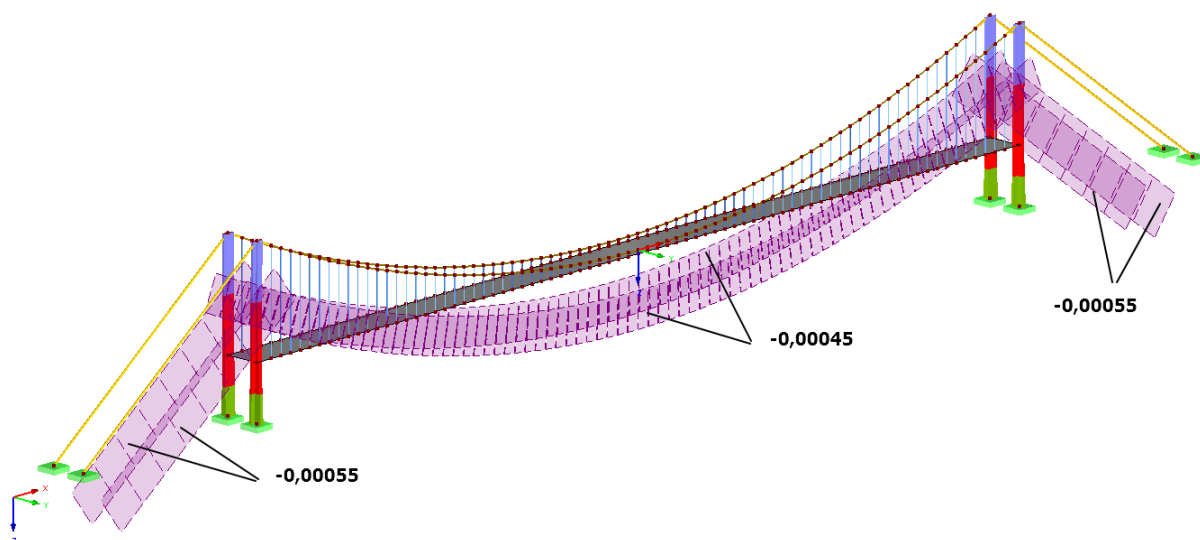


Obrázek 58: Model 5 – Průběh vnitřních sil na úseku lana mezi pylonem a vetknutím

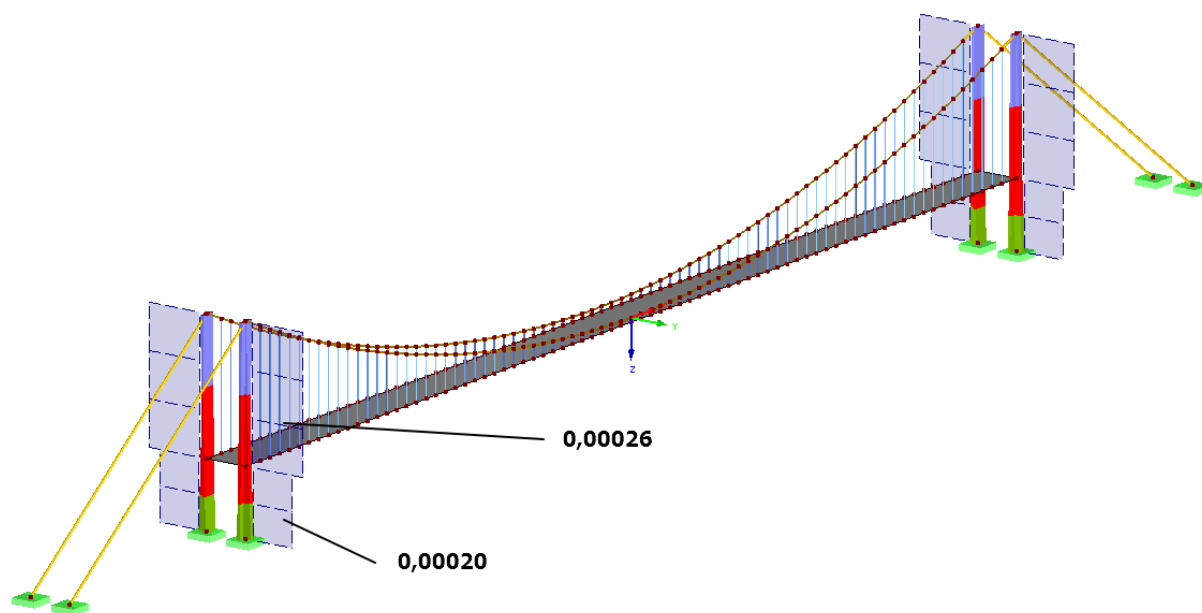
Dochází k menšímu poklesu bodu m , přesná hodnota je 59,648 mm, v úseku 0 došlo také k výrazně menším posunům společného bodu s pylonem a krajních částí lana, hodnoty posunů jsou $u_z = 9,951$ mm a $u_x = 14,592$ mm.

4.3.6 MODEL Č. 6

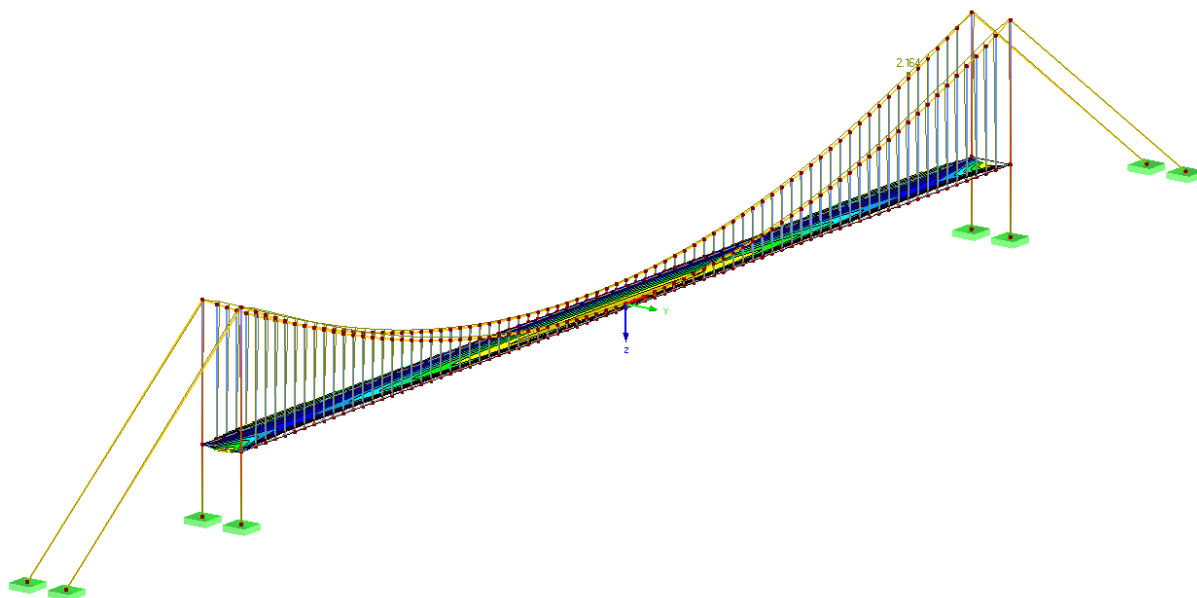
Cílem tohoto modelu bylo dosáhnout v monitorovaných bodech nejmenších poklesů. Kvůli eliminaci svislých deformací u_z z předchozího modelu bylo v modelu č. 6 uvažováno o počátečním prodloužení pylonu. Pylon je v modelu vytvořen z více prutů, proto je velikost prodloužení jiný na každý prut. Aby došlo k eliminaci vodorovných deformací u_x , bylo zkráceno krajní lano.



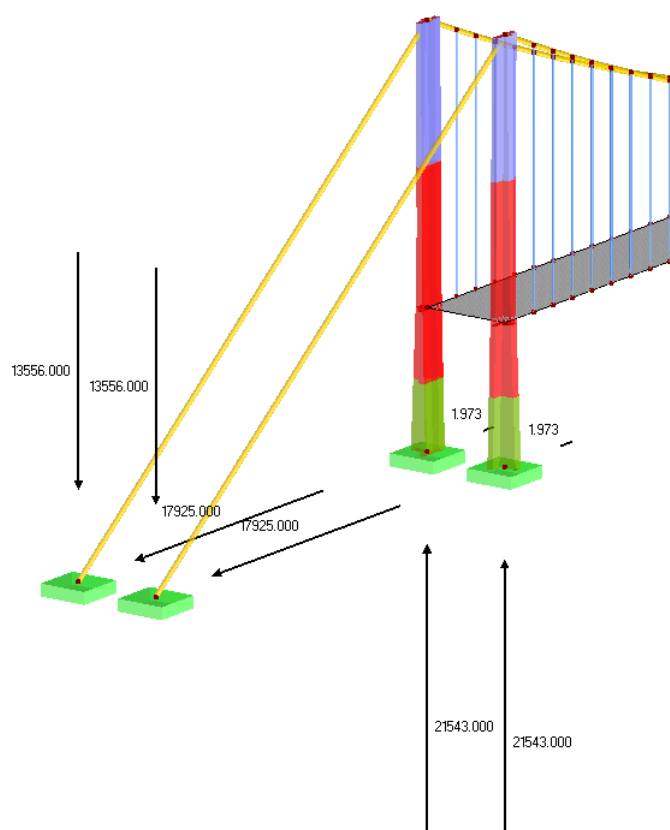
Obrázek 59: Model 6 – Zatížení zkrácením lana



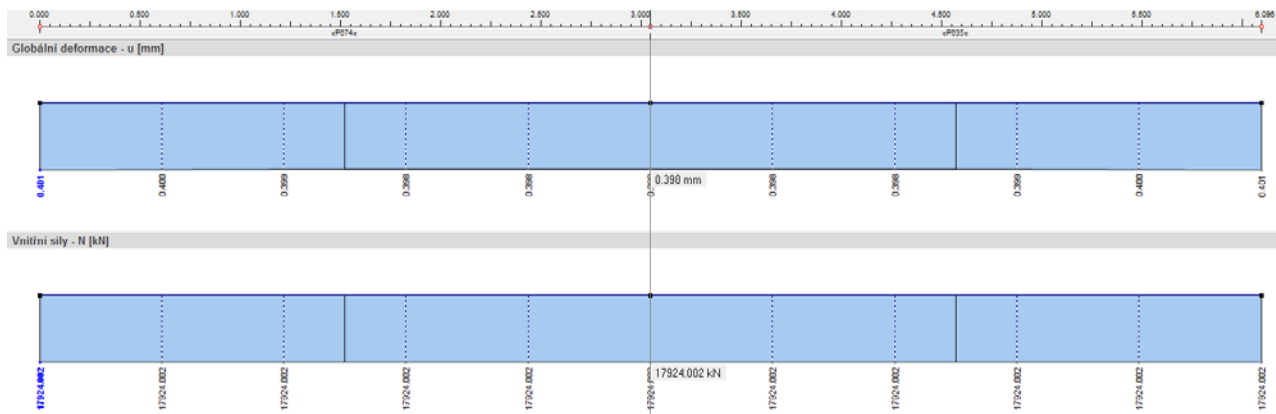
Obrázek 60: Model 6 – Zatížení prodloužením pylonů



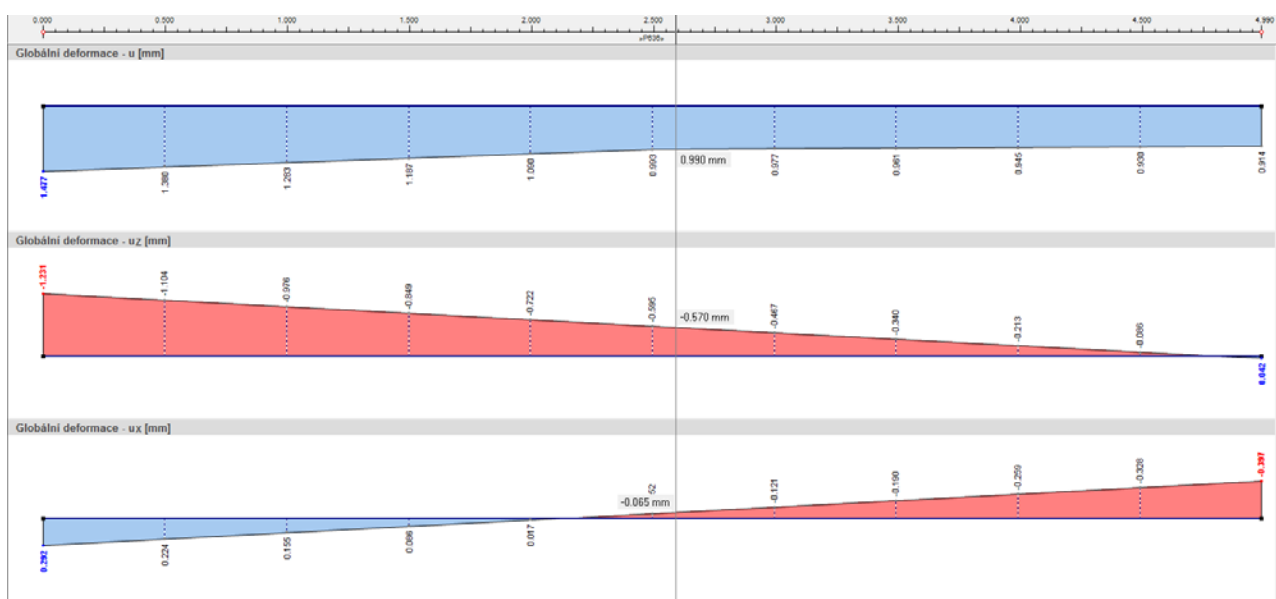
Obrázek 61: Model 6 – Průběh deformace celé konstrukce



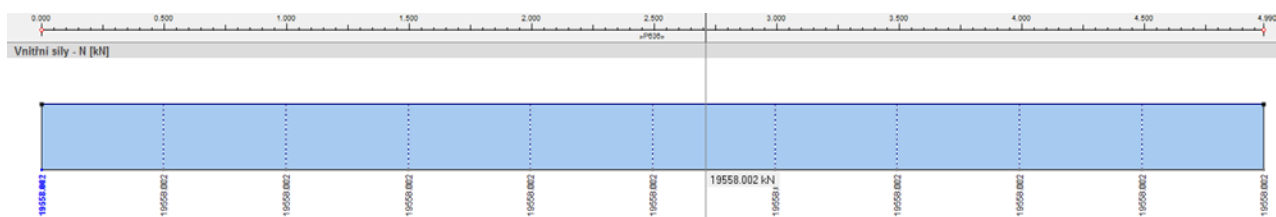
Obrázek 62: Model 6 – Reakce



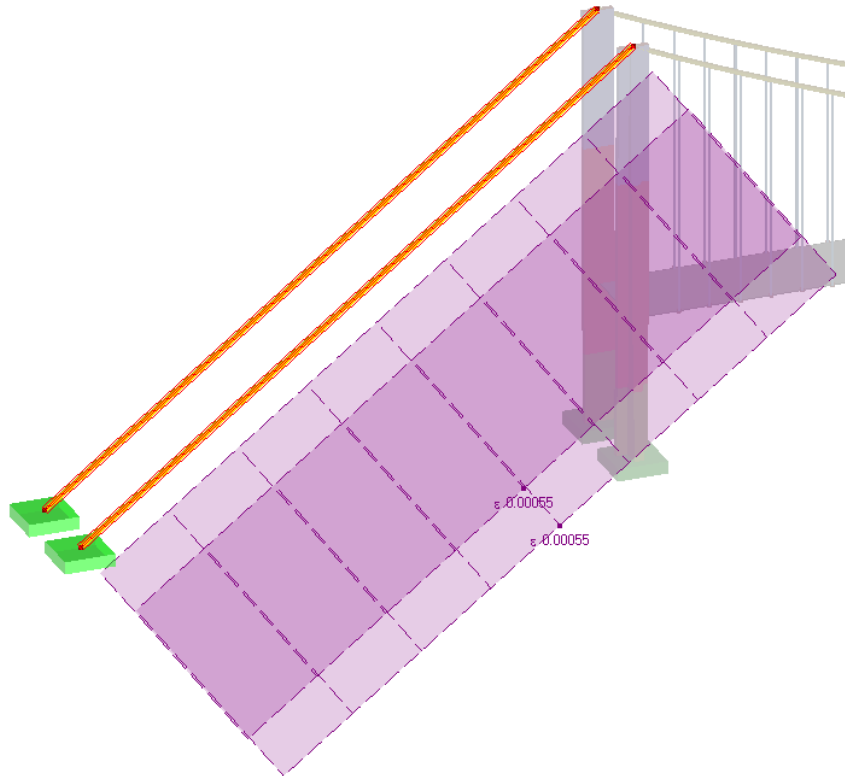
Obrázek 63: Model 6 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu m



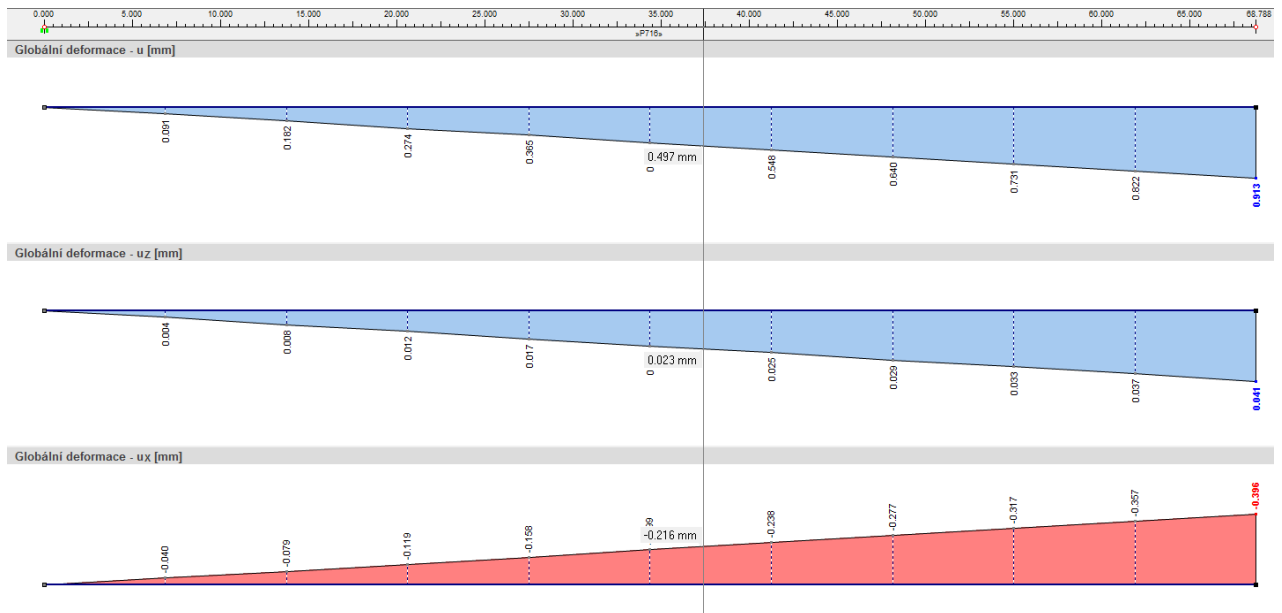
Obrázek 64: Model 6 – Celkové, svislé a vodorovné deformace na straně polygonu 0



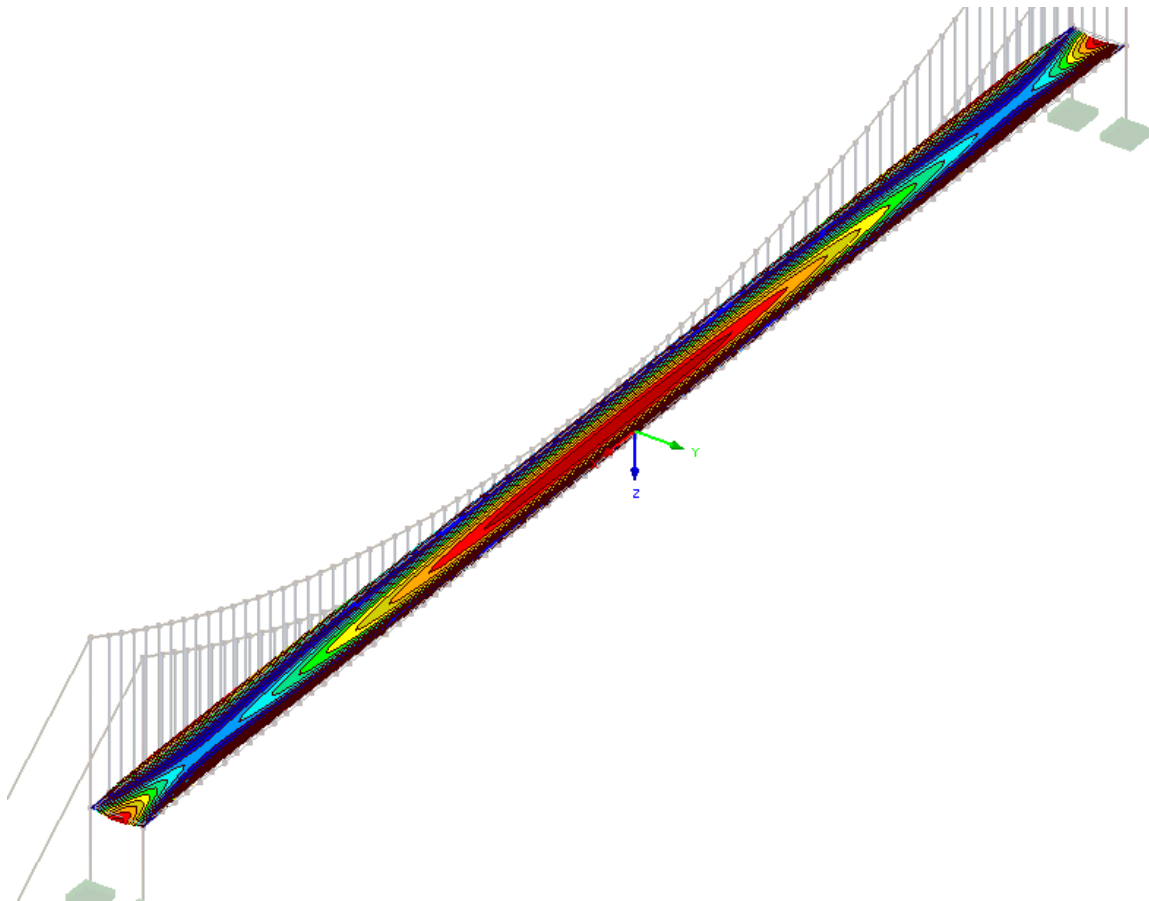
Obrázek 65: Model 6 – Průběh vnitřních sil na straně polygonu 0



Obrázek 66: Model 6 – Zkoumaný úsek lana mezi pylonem a vetknutím včetně zkrácením



Obrázek 67: Model 6 – Celkové, svislé a vodorovné deformace úseku lana mezi pylonem a vetknutím



Obrázek 68: Model 6 – Průběh deformace desky

Výsledný pokles bodu m je 0,398 mm, v úseku 0 byly zjištěny deformace $u_z = 0,041$ mm a $u_x = 0,396$ mm. Cílem bylo dostat zkoumané posuny bodů hodnotě blízké nule, čehož bylo dosaženo v modelu č. 6. Tuto verzi je možné považovat za finální. Obrázek 68 zobrazuje deformaci desky mostovky, kde je maximální průhyb 4,270 mm uprostřed desky.

4.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Důležité výsledky z ručního výpočtu a všech modelů ze softwaru byly zpracované v tabulce a následně mezi sebou porovnány.

Tabulka 4: Porovnání výsledků jednotlivých modelů

		Síla H [kN]	Shoda [%]	Bod m		Úsek θ		
				N [kN]	u [mm]	N [kN]	u_z [mm]	u_x [mm]
Modely	Ruční výpočet	18 058,831	100,000	18 059,114	0,029	19 685,122	-	-
	1	17 924,000	99,253	17 924,002	0,426	19 623,002	-	-
	2	17 926,000	99,264	17 926,002	2,228	19 561,002	-	-
	3	17 925,000	99,259	17 926,002	1,968	19 561,002	-	-
	4	17 588,000	97,393	17 791,002	202,593	19 402,002	9,904	53,591
	5	17 827,000	98,716	17 883,002	59,648	19 504,002	9,951	14,592
	6	17 925,000	99,259	17 924,002	0,398	19 558,002	0,041	0,396

Při porovnání výsledků byl brán ruční výpočet jako výchozí. U modelů 1 až 3 bylo uložení lana v hlavě pylonů pomocí kloubové podpory. Horizontální síly H se shodují v 99 % s ručním výpočtem. V modelech 4 a 5 byla zrušena kloubová podpora na pylonu. Relativně velkým deformacím dochází kvůli téměř žádnému nebo nepříliš dostačujícímu zkrácení krajní části nosného lana. V modelu 6 již bylo snahou se dostat v bodě m a úseku θ na co nejmenší deformace, což vykazuje i 99% shoda horizontální síly H . Bylo potřebné zde navrhnout prodloužení pylonu.

5. ZÁVĚR

Pro statickou analýzu nosného lana byl vytvořen ruční výpočet a výpočetní modely v softwaru RFEM. Podkladem práce byl architektonický návrh nezrealizované visuté lávky pro pěší, pro kterou byl zjištěn skutečný tvar nosného lana po ukončení výstavby mostu. Zatížení mostu bylo provedeno samotnou vlastní tíhou, která byla určena z geometrie konstrukce.

V ručním výpočtu byly zjištěny velikosti reakcí, normálové síly v dílčích částech a svislé posuny vrcholů polygonu. Cílem bylo, aby bod m po zatížení konstrukci měl stejné souřadnice jako v architektonickém návrhu. Celkem bylo provedeno 9 iteračních kroků, při kterých byl změněn počáteční průvės lana f . Při zpracování výsledků byla zkoumána závislost mezi průvěsem f a horizontální silou H . Výsledky z devátého iteračního kroku byly považovány za výchozí stav pro porovnání výsledků ze statického programu RFEM.

Pomocí softwaru RFEM bylo vytvořeno celkem 6 modelů. Postupně docházelo k tvorbě modelů od jednodušších po složitější, při čemž byl zkoumán posun předem definovaných bodů. Cílem bylo vymodelovat celý most a upravovat délku nosného lana a výšku pylonu, dokud se definované 3 body neustálí na předem určených místech. Nejpodrobnějším a nejvíce přesným modelem byl šestý model. Následně byly porovnány horizontální síly H mezi ručním a softwarovým výpočtem, kde byla prokázána ve většině případů shoda vyšší než 99 %.

Bylo ukázáno, že při projekci mostu by bylo nutné navrhnout kratší lano, a to kvůli jeho prodloužení. Nutné je také navrhnout vyšší pylon kvůli jeho poklesu, který je způsoben od svislé složky normálové síly v úseku 0 . Výsledné posuny našich monitorovaných bodů jsou blízké nule, nosné lano je téměř přesně vedeno přes předem stanovené body.

Po pozdějším zjišťování, jaké typy ocelových lan jsou používány v praxi, dochází k určitým neshodám. Firma METALLAN spol. s r.o. udává ve svém katalogu osmipramenné ocelové lano WARRINGTON, které se skládá ze 152 drátů dělených na 8×19 . Jmenovitá pevnost drátu je uvedena 1 770 MPa [5].

Sice typ nosného lana neodpovídá typu používanému v praxi, přesto lze provedené výpočty považovat za přesné, a to z důvodu, že lano má ve všech výpočtech stejné parametry.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] KADLČÁK, Jaroslav. *Statika nosných lan visutých střech*. Praha: Academia, 1990. ISBN 8020002510.

[2] KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí I*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 8021412046.

[3] *Stráský, Hustý a partneři s.r.o. (SHP)* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.shp.eu/strasky-husty-a-partneri/projekty/souteze/lavka-pro-pesi-pres-reku-missouri-omaha-nebraska-usa-2006/>

[4] *Dlupal Software, Inc.* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <https://www.dlupal.com/en/downloads-and-information/documents/manuals>

[5] *METALLAN spol. s r.o.* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.metallan.cz/vazaci-prostredky/ocelova-lana--metraz/osmipramenna-ocelova-lana-warrington/osmipramenne-ocelove-lano---warrington---152-dratu-8-x-19.htm>

7. SEZNAM ZKRATEK

M	ohybový moment
N	normálová síla
F	síla
a	podporový bod
b	podporový bod, šířka průřezu
f	průvės lana
q	spojité zatížení na prut
L	vzdálenost podporových bodů
R	reakce
H	vodorovná síla lana
x	vodorovná vzdálenost, vodorovné souřadnice
z	svislá vzdálenost, svislé souřadnice
m	předen určený bod lana
l	délka
E	modul pružnosti v tahu
ϵ	poměrné přetvoření
σ	normálové napětí
A	plocha průřezu
γ	objemová tíha materiálu
G	tíha prvku
g	spojité zatížení od vlastní tíhy
d	průměr
n	počet kusů, počet neznámých
α	úhel
k	iterační krok
u	složka posunutí
h	výška průřezu
t	tloušťka průřezu
p	plošné spojité zatížení
i	index u síly F_i nebo vodorovné vzdálenosti x_i nebo vrcholových bodů polygonu

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma visuté střechy	10
Obrázek 2: Schéma zavěšeného mostu	10
Obrázek 3: Schéma visutého mostu	11
Obrázek 4: Zjednodušené schéma rovinného vláknového polygonu.....	11
Obrázek 5: Parabolická řetězovka.....	12
Obrázek 6: Pravá – tížná řetězovka.....	12
Obrázek 7: Obecná řetězovka	12
Obrázek 8: Rovinný vláknový polygon	13
Obrázek 9: Architektonický návrh visuté lávky pro pěší.....	15
Obrázek 10: Příčný (levý) a podélný (pravý) řez prefabrikovaného segmentu	16
Obrázek 11: Průřez hlavy (levý) a paty (pravý) pylonu.....	16
Obrázek 12: Ilustrace dělení prefabrikovaného segmentu v podélném směru.....	17
Obrázek 13: Příčný profil na krajích (horní) a uprostřed (dolní) segmentu.....	18
Obrázek 14: Symetrický rovinný vláknový polygon pro ruční výpočet	20
Obrázek 15: Model 1 – Zatížení nosného lana vlastní tíhou.....	25
Obrázek 16: Model 1 – Zatížení vlastní tíhou a zkrácení lana.....	26
Obrázek 17: Model 1 – Průběh deformace a vnitřní síly lana.....	26
Obrázek 18: Model 2 – Změněný architektonický návrh pro softwarový výpočet.....	27
Obrázek 19: Model 2 – Geometrie modelu	28
Obrázek 20: Model 2 – Pylon s lineárním náběhem (Obrázek 11).....	28
Obrázek 21: Model 2 – Zatížení.....	29
Obrázek 22: Model 2 – Zkoumaný bod m	29
Obrázek 23: Model 2 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu m	29
Obrázek 24: Model 2 – Reakce	30
Obrázek 25: Model 2 – Zkoumaná strana polygonu 0	30
Obrázek 26: Model 2 – Průběh vnitřních sil na straně polygonu 0	30
Obrázek 27: Model 3 – Geometrie plného modelu	31
Obrázek 28: Model 2 – Geometrie drátěného modelu	31
Obrázek 29: Model 3 – Zatížení.....	32
Obrázek 30: Model 3 – Reakce	32

Obrázek 31: Model 3 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu m	33
Obrázek 32: Model 4 – Geometrie plného modelu	33
Obrázek 33: Model 4 – Zatížení.....	34
Obrázek 34: Model 4 – Průběh deformace celé konstrukce.....	34
Obrázek 35: Model 4 – Reakce	35
Obrázek 36: Model 4 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu m	35
Obrázek 37: Model 4 – Zkoumaná strana polygonu 0	36
Obrázek 38: Model 4 – Celkové, svislé a vodorovné deformace na straně polygonu 0	36
Obrázek 39: Model 4 – Průběh vnitřních sil na straně polygonu 0	36
Obrázek 40: Model 4 – Svislý posun pylonu	37
Obrázek 41: Model 4 – Vodorovný posun pylonu.....	37
Obrázek 42: Model 4 – Celkové, svislé a vodorovné deformace pylonu	38
Obrázek 43: Model 4 – Zkoumaný úseku lana mezi pylonem a vetknutím.....	38
Obrázek 44: Model 4 – Celkové, svislé a vodorovné deformace úseku lana mezi pylonem a vetknutím.....	39
Obrázek 45: Model 4 – Průběh vnitřních sil na úseku lana mezi pylonem a vetknutím.....	39
Obrázek 46: Model 5 – Plošné zatížení na desku mostovky.....	40
Obrázek 47: Model 5 – Zatížení zkrácením lana	40
Obrázek 48: Model 5 – Průběh deformace celé konstrukce.....	41
Obrázek 49: Model 5 – Reakce	41
Obrázek 50: Model 5 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu m	42
Obrázek 51: Model 5 – Celkové, svislé a vodorovné deformace na straně polygonu 0	42
Obrázek 52: Model 5 – Průběh vnitřních sil na straně polygonu 0	42
Obrázek 53: Model 5 – Svislý posun pylonu	43
Obrázek 54: Model 5 – Vodorovný posun pylonu.....	43
Obrázek 55: Model 5 – Celkové, svislé a vodorovné deformace pylonu	44
Obrázek 56: Model 5 – Zkoumaný úsek lana mezi pylonem a vetknutím včetně zkrácením..	44
Obrázek 57 :Model 5 – Celkové, svislé a vodorovné deformace úseku lana mezi pylonem a vetknutím.....	45
Obrázek 58: Model 5 – Průběh vnitřních sil na úseku lana mezi pylonem a vetknutím.....	45
Obrázek 59: Model 6 – Zatížení zkrácením lana	46
Obrázek 60: Model 6 – Zatížení prodloužením pylonů	46

Obrázek 61: Model 6 – Průběh deformace celé konstrukce.....	47
Obrázek 62: Model 6 – Reakce	47
Obrázek 63: Model 6 – Průběh deformace a vnitřní síly kolem bodu m	48
Obrázek 64: Model 6 – Celkové, svislé a vodorovné deformace na straně polygonu 0	48
Obrázek 65: Model 6 – Průběh vnitřních sil na straně polygonu 0	48
Obrázek 66: Model 6 – Zkoumaný úsek lana mezi pylonem a vetknutím včetně zkrácením..	49
Obrázek 67: Model 6 – Celkové, svislé a vodorovné deformace úseku lana mezi pylonem a vetknutím.....	49
Obrázek 68: Model 6 – Průběh deformace desky	50

9. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výsledky prvního ručního výpočtu.....	22
Tabulka 2: Jednotlivé výsledky z iteračních kroků.....	23
Tabulka 3: Výsledky 9. iteraci ručního výpočtu	24
Tabulka 4: Porovnání výsledků jednotlivých modelů.....	51