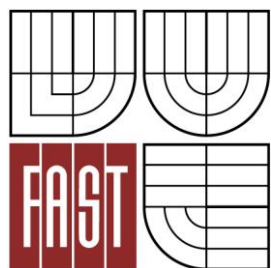




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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

INGRID FOLVARČNÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK VLK, Ph.D.

BRNO 2014



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	Ingrid Folvarčná
Název	Statická analýza nosného lana
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2013
Datum odevzdání bakalářské práce	30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....
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

Manuály k systému RFEM

Architektonický návrh nerealizovaného visutého mostu

Zásady pro vypracování

Cílem práce je osvojit si zásady modelování konstrukcí, prostudovat možnosti výpočtů a modelování lanových konstrukcí a 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.

Předepsané přílohy

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

Abstrakt

Předmětem bakalářské práce je návrh nosného lana visuté lávky pro pěší. Cílem je navrhnout počáteční geometrický tvar lana tak, aby lano po zatížení zaujalo požadovaný tvar. Návrh bude proveden ručním výpočtem, který bude porovnán s výpočtem ve výpočetním programu RFEM. Pro znázornění chování lana bude provedeno i zatížení, avšak lano již nebude posuzováno na mezní stavy.

Klíčová slova

Nosné lano, geometrický tvar lana, rovinný vláknový polygon, styčnicková metoda

Abstract

Subject of this thesis is to design the supporting rope of suspension bridge for pedestrians. The aim propose is the initial geometric shape of the rope and the rope load impressed upon the desired shape. The proposal will be carried out by hand calculation, which will be compared with the calculation in computing RFEM. To illustrate the behavior of the rope, the load will be carried out, but the rope will no longer be considered to limit states.

Keywords

Suspension cable, geometric shape of cable, fibrous planar polygon, contact point method

Bibliografická citace VŠKP

Ingrid Folvarčná *Statická analýza nosného lana*. Brno, 2014. 31 s. 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 zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 8.5.2014

.....
podpis autora
Ingrid Folvarčná

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce Ing. Zbyňku Vlkovi, Ph.D. za jeho ochotu, odborné rady a vedení. Bez jeho pomoci by tato bakalářská práce nevznikla.

OBSAH	8
1. ÚVOD	9
2. MOŽNOSTI TVARU VLÁKNA	10
3. ZADÁNÍ	11
3.1. Architektonický návrh lávky	11
3.2. Hlavní nosné lano	11
4. NÁVRH GEOMETRIE	12
4.1. Návrh geometrie lana ručním výpočtem	12
4.1.1. Geometrie lana před zavěšením závěsů se segmenty mostovky – první odhad	12
4.1.2. Geometrie lana po zavěšení závěsů se segmenty mostovky	15
4.1.2.1. Tíha segmentu	15
4.1.2.2. Návrh geometrie	16
4.1.3. Geometrie lana před zavěšením závěsů se segmenty mostovky – finální odhad	18
4.1.4. Geometrie lana po zavěšení závěsů se segmenty mostovky – finální odhad	19
4.1.5. Výpočet pomocí výpočetního programu	21
4.2. Návrh geometrie lana výpočetním programem	22
4.2.1. Postup návrhu	22
4.2.2. Zatížení v podélném směru	24
5. ZÁVĚR	27
SEZNAM TABULEK	28
SEZNAM OBRÁZKŮ	29
SEZNAM ZKRATEK	30
LITERATURA	31
STUDIJNÍ PRAMENY	31

1. ÚVOD

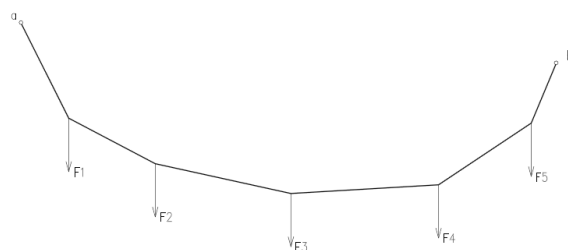
Konstrukcí, jejichž základní nosný prvek tvoří lano, můžeme najít ve stavebnictví několik. Jedná se o lanové střechy, visuté a zavěšené mosty, lanovky apod. Při návrhu lan se nejprve řeší geometrický tvar, který závisí na stálém zatížení. Ve chvíli, kdy je lano ustálené, nemění svůj tvar od stálého zatížení, jej můžeme zatížit proměnným zatížením a posoudit na příslušné mezní stavy.

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo stanovení počáteční geometrie tvaru nosného lana, která se po zavěšení segmentů mostovky ustálí v požadované poloze se vzepětím 26,822 m. Toto téma bylo autorem práce zvoleno za účelem prohloubení jeho znalostí problematiky lanových konstrukcí. V problematice nosných lan jsme se ve výuce učili výpočet vnitřních sil lan různými metodami a dopočet zbývajících parametrů – souřadnic, délky lana a průvěsu v daném bodě. Praktickým návrhem nosného lana jsme se nezabývali.

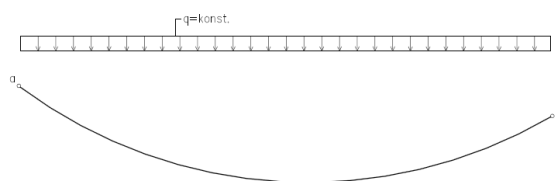
Návrh geometrie lana byl proveden dvěma způsoby, ručním výpočtem a užitím výpočetního programu RFEM. Předností tohoto programu je snadné ovládání a jednoduché uživatelské prostředí.

2. MOŽNOSTI TVARU VLÁKNA

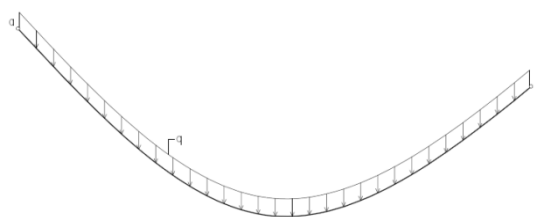
Zanedbáme-li ve statickém řešení lana jeho velmi malou tuhost v ohybu, dostáváme tzv. dokonale ohebné vlákno. Je to lano nehmotné, neprodloužitelné, které má ve všech průřezech ohybové momenty rovny 0. Dokonale ohebné vlákno přenáší jen tah a jeho geometrický tvar je závislý na zatížení. Změnou polohy nebo směru či velikosti zatížení se geometrický tvar vlákna výrazně mění [1]. Na následujících obrázcích jsou znázorněny jednotlivé geometrické tvary vlákna.



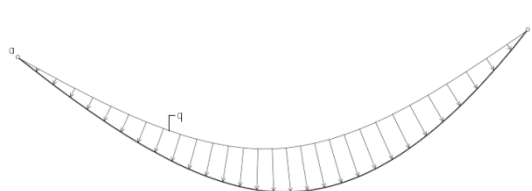
Obr. 2-1: *Rovinný vláknový polygon [1]*



Obr. 2-2: *Parabolická řetězovka [1]*



Obr. 2-3: *Pravá – tížní řetězovka [1]*

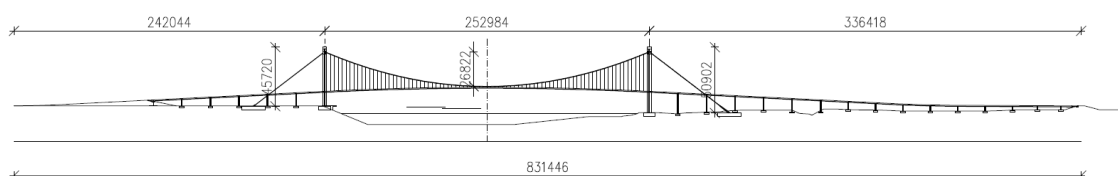


Obr. 2-4: *Obecná řetězovka [1]*

3. ZADÁNÍ

3.1. ARCHITEKTONICKÝ NÁVRH LÁVKY

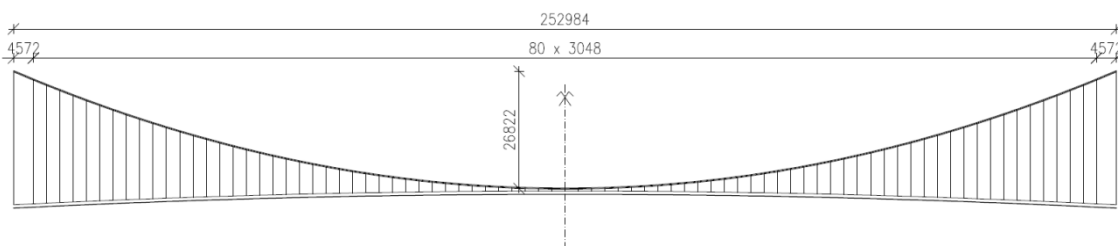
Jako podklad k řešení této práce byl zvolen architektonický návrh nerealizované lávky pro pěší přes řeku Missouri, Omaha, Nebraska, USA (2006) firmy Stráský, Hustý a partneři s.r.o. Lávka celkové délky 720 m je tvořena hlavním visutým mostem a rampami. Visutý most s rozpětím hlavního pole 253 m má mostovku sestavenou z prefabrikovaných segmentů tloušťky 0,4 m [3].



Obr. 3-1: Schéma lávky; Měřítko 1:3000

3.2. HLAVNÍ NOSNÉ LANO

Cílem byl návrh jednoho hlavního nosného lana mezi pylony, jež má vzepětí 26,822 m. Lano je zavěšené v závěsných bodech ve stejné výšce. Závěsné body se výškově neliší. Na laně je mezi hlavními pylony zavěšeno 82 prefabrikovaných segmentů mostovky. Lana jsou v půdorysné vzdálenosti 3,084 m. Pouze první závěsná lana držící segmenty mostovky jsou od pylonů na každé straně vzdálena 4,572 m. Hlavní nosné lano je symetrické.



Obr. 3-2: Tvar hlavního nosného lana, Měřítko 1:1000

4. NÁVRH GEOMETRIE LANA

V prvním způsobu návrhu je známé rozpětí lana a jeho vzepětí. Před zatížením se dopočítají souřadnice z jednotlivých bodů pomocí statické podmínky rovnováhy. Jelikož se dané strany polygonu přetvoří, čímž dojde ke změně souřadnic z, kontroluje se změna vzepětí po přetvoření. Pokud neodpovídá požadované hodnotě 26,822 m, mění se počáteční vzepětí tak dlouho, dokud se lano v této hodnotě neustálí. Tento výpočet byl proveden ručně a výsledkem jsou souřadnice z lana před zatížením (před zavěšením jednotlivých závěsů se segmenty mostovky) a souřadnice z po zavěšení závěsů se segmenty. Geometrie lana před zatížením se převedla do výpočetního programu RFEM, zatížila se a porovnali se výsledky výpočtu.

Druhý způsob byl proveden pouze ve výpočetním programu RFEM. Po prvním návrhu geometrie lana a zatížení byl proveden výpočet. Geometrie lana byla poté opravena o výsledky tohoto výpočtu. Oprava geometrie pomocí iterace probíhala tak dlouho, dokud nebylo dosaženo potřebného vzepětí v nejnižším bodě lana, kterým prochází osa symetrie.

4.1. NÁVRH GEOMETRIE LANA RUČNÍM VÝPOČTEM

Návrh geometrie lana byl proveden pomocí rovinného vláknového polygonu kloubově zavěšeného ve dvou neposuvných bodech. Na laně je zavěšeno celkem 83 prefabrikovaných segmentů a každý tento segment představuje sílu v daném bodě. Nejprve byla zjištěna geometrie lana před zavěšením závěsů, poté po zavěšení závěsů.

4.1.1. GEOMETRIE LANA PŘED ZAVĚŠENÍM ZÁVĚSŮ SE SEGMENTY MOSTOVKY – PRVNÍ ODHAD

V okamžiku, kdy se lano ukotví mezi pylony, je lano zatíženo pouze vlastní vahou. V prvotním výpočtu se uvažuje hodnota vzepětí $f = 26,822$ m, které se následně upravuje. Vlastní tíha nosného lana byla určena z průřezové plochy nosné lana. Vychází se z předpokládané velikosti vodorovné síly H polygonu, která se vypočte dle následujícího vzorce:

$$H = \frac{qL^2}{8f} \quad (4.1)$$

Plochu dopočítáme dle Hookova zákona:

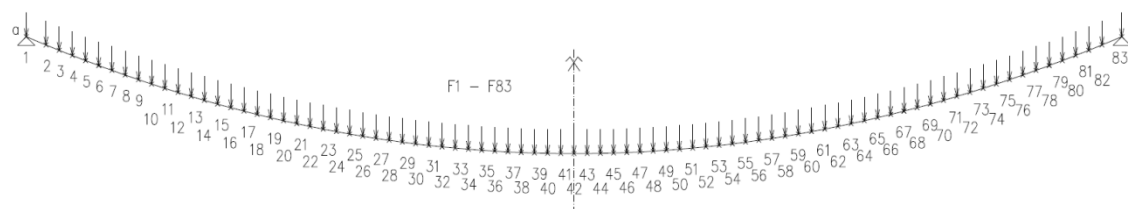
$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (4.2)$$

Navržený poloměr jednoho kabelu	$r' = 0,038 \text{ m}$
Navržený poloměr nosného lana	$r = 0,25 \text{ m}$
Modul pružnosti	$E = 195 \text{ GPa}$

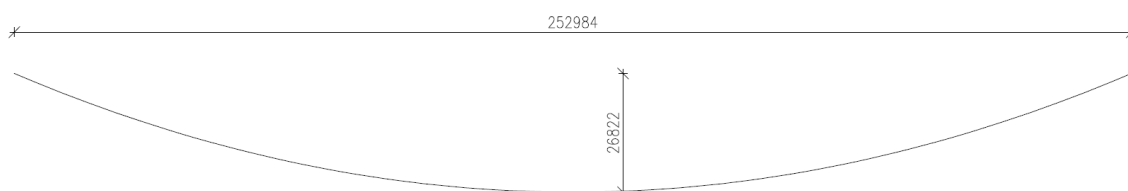
Ze statických podmínek rovnováhy se dopočítají složky reakcí, a poté souřadnice z vrcholů polygonu

$$z_k = \frac{1}{H} [R_{az} x_k - \sum_{i=1}^{k-1} F_i (x_k - x_i)] \quad (4.3)$$

Tímto výpočtem jsou známy souřadnice všech bodů polygonu, geometrický tvar nosného lana před zatížením. Jelikož se vycházelo z konečného vzepětí lana $f=26,822 \text{ m}$, které je potřeba dosáhnout až po instalaci segmentů mostovky, hodnota vzepětí byla opravována dle toho, jak se dané strany polygonu přetvořovaly po zatížení segmenty.



Obr. 4-1: Statické schéma lana pro ruční výpočet



Obr. 4-2: Tvar hlavního nosného lana před instalací segmentů mostovky po prvním návrhu, $f=26,822 \text{ m}$

V následující tabulce jsou uvedeny souřadnice jednotlivých bodů a velikosti síly F' , které představují vlastní tíhu lana. Konstrukce je symetrická dle styčnicku č. 42, proto jsou uvedeny souřadnice a síly pouze na jedné polovině lana.

F'	[N]	z_i [m]	x_i [m]	F'	[N]	z_i [m]	x_i [m]
1	48300	0.000	0.000	22	48300	20.590	65.532
2	48300	1.893	4.572	23	48300	21.197	68.580
3	48300	3.124	7.620	24	48300	21.774	71.628
4	48300	4.324	10.668	25	48300	22.319	74.676
5	48300	5.492	13.716	26	48300	22.833	77.724
6	48300	6.630	16.764	27	48300	23.316	80.772
7	48300	7.736	19.812	28	48300	23.768	83.820
8	48300	8.811	22.860	29	48300	24.189	86.868
9	48300	9.855	25.908	30	48300	24.578	89.916
10	48300	10.867	28.956	31	48300	24.937	92.964
11	48300	11.849	32.004	32	48300	25.264	96.012
12	48300	12.799	35.052	33	48300	25.560	99.060
13	48300	13.719	38.100	34	48300	25.825	102.108
14	48300	14.607	41.148	35	48300	26.059	105.156
15	48300	15.464	44.196	36	48300	26.261	108.204
16	48300	16.290	47.244	37	48300	26.432	111.252
17	48300	17.084	50.292	38	48300	26.573	114.300
18	48300	17.848	53.340	39	48300	26.682	117.348
19	48300	18.580	56.388	40	48300	26.760	120.396
20	48300	19.281	59.436	41	48300	26.806	123.444
21	48300	19.951	62.484	42	48300	26.822	126.492

Tab. 4-1: Souřadnice hlavního nosného lana před instalací segmentů mostovky po prvním návrhu, $f=26,822$ m

Ze statické podmínky rovnováhy ke styčníku č. 42, přes který prochází osa symetrie a v kterém je známo vzepětí, dopočítáme reakce R_a a R_b . Momentová podmínka z leva:

$$-R_{az} \frac{L}{2} + R_{az} f + \sum_{i=1}^{42} F_i \left(\frac{L}{2} - x_i \right) = 0 \quad (4.4)$$

A obdobně z prava:

$$-R_{bz} \frac{L}{2} + R_{bz} f + \sum_{i=44}^{83} F_i \left| \frac{L}{2} - x_i \right| = 0 \quad (4.5)$$

Výsledky reakcí:

$$R_{az} = R_{bz} = 2004,450 \text{ kN}$$

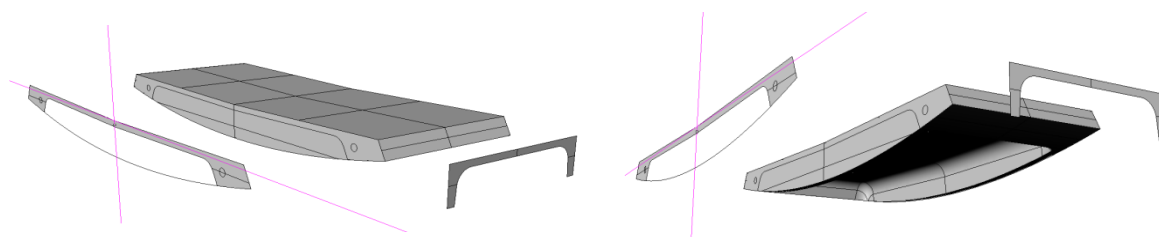
$$R_{ax} = R_{bx} = 4724,414 \text{ kN}$$

$$R_a = R_b = 5132,047 \text{ kN}$$

4.1.2. GEOMETRIE LANA PO ZAVĚŠENÍ ZÁVĚSŮ SE SEGMENTY MOSTOVKY – PRVNÍ ODHAD

4.1.2.1. TÍHA SEGMENTU

Tíha jednoho segmentu se pohybuje okolo 13,5 tuny. Ve výpočtech byla uvažována hodnota segmentu 16,2 tuny. Příčinou navýšení hmotnosti je nestanovení tíhy závěsů a mostního vybavení. Navýšení je zcela odhadnuto z důvodu zjednodušení, proto je pravděpodobné, že se jedná o navýšení přehnané.



Obr. 4-3: 3D náhledy – segment mostovky

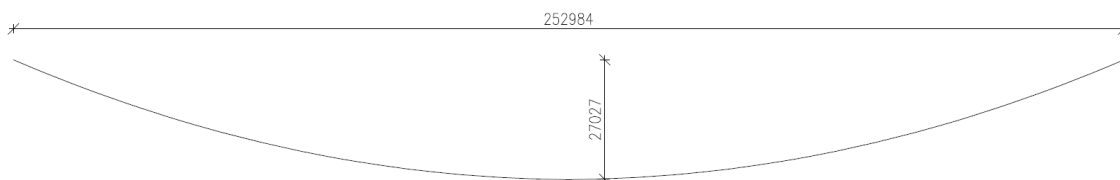
4.1.2.2. NÁVRH GEOMETRIE

Geometrii lana před zatížením z kapitoly 4.1.1. můžeme zatížit silami, které představují tíhu jednotlivých segmentů mostovky. Tíha těchto segmentů byla stanovena v 4.1.2.1.

Po zatížení dojde ke změně velikosti reakcí, které se podobně jako v předchozím případě vypočítají pomocí momentové podmínky. Styčnickovou metodou se vypočítají normálové síly ve všech stranách polygonu a pythagorovou větou délky stran polygonu. Dále dojde k protažení jednotlivých stran polygonu a změně souřadnic z jednotlivých bodů. Protažení počítáno ze vztahu:

$$\Delta l = \frac{NL}{EA} \quad (4.6)$$

Protažením dostaneme novou délku lana mezi závěsy (mezi styčníky) a můžeme opravit souřadnice z všech styčníků. Jelikož se v prvním návrhu vycházelo ze vzepětí $f=26,822$ m, po zatížení je vzepětí 27,093 m (viz. Tab.4-2). Je tedy potřeba opravit prvotní návrh a výpočet opakovat tak dlouho, až se po protažení vzepětí ustálí na požadované hodnotě 26,822 m.



Obr. 4-4: Tvar hlavního nosného lana po instalaci segmentů mostovky po prvním návrhu, $f=27,093$ m

F	[kN]	z_i [m]	x_i [m]	N_x [kN]	N_z [kN]	N [kN]	l [m]	Δl [m]	z_i upr
1	81	0.000	0.000	8008.323	3280.500	8654.185	4.948	0.00112	0.000
2	81	1.893	4.572	8008.323	3199.500	8623.806	3.287	0.00074	1.896
3	81	3.124	7.620	8008.323	3118.500	8594.084	3.276	0.00074	3.129
4	81	4.324	10.668	8008.323	3037.500	8565.024	3.264	0.00073	4.331
5	81	5.492	13.716	8008.323	2956.500	8536.634	3.254	0.00073	5.501
6	81	6.630	16.764	8008.323	2875.500	8508.921	3.242	0.00072	6.641

F	[kN]	z _i [m]	x _i [m]	N _x [kN]	N _z [kN]	N [kN]	l [m]	Δl [m]	z _{i upr}
7	81	7.736	19.812	8008.323	2794.500	8481.890	3.232	0.00072	7.749
8	81	8.811	22.860	8008.323	2713.500	8455.549	3.222	0.00071	8.826
9	81	9.855	25.908	8008.323	2632.500	8429.904	3.212	0.00071	9.872
10	81	10.867	28.956	8008.323	2551.500	8404.962	3.202	0.00070	10.887
11	81	11.849	32.004	8008.323	2470.500	8380.728	3.193	0.00070	11.871
12	81	12.799	35.052	8008.323	2389.500	8357.209	3.184	0.00069	12.823
13	81	13.719	38.100	8008.323	2308.500	8334.411	3.175	0.00069	13.746
14	81	14.607	41.148	8008.323	2227.500	8312.339	3.166	0.00069	14.636
15	81	15.464	44.196	8008.323	2146.500	8291.001	3.158	0.00068	15.496
16	81	16.290	47.244	8008.323	2065.500	8270.400	3.150	0.00068	16.324
17	81	17.084	50.292	8008.323	1984.500	8250.544	3.142	0.00068	17.121
18	81	17.848	53.340	8008.323	1903.500	8231.436	3.135	0.00067	17.888
19	81	18.580	56.388	8008.323	1822.500	8213.083	3.128	0.00067	18.623
20	81	19.281	59.436	8008.323	1741.500	8195.490	3.121	0.00067	19.327
21	81	19.951	62.484	8008.323	1660.500	8178.661	3.114	0.00067	20.000
22	81	20.590	65.532	8008.323	1579.500	8162.601	3.108	0.00066	20.642
23	81	21.197	68.580	8008.323	1498.500	8147.314	3.102	0.00066	21.252
24	81	21.774	71.628	8008.323	1417.500	8132.806	3.096	0.00066	21.833
25	81	22.319	74.676	8008.323	1336.500	8119.080	3.091	0.00066	22.382
26	81	22.833	77.724	8008.323	1255.500	8106.140	3.086	0.00065	22.900
27	81	23.316	80.772	8008.323	1174.500	8093.990	3.081	0.00065	23.387
28	81	23.768	83.820	8008.323	1093.500	8082.634	3.077	0.00065	23.843
29	81	24.189	86.868	8008.323	1012.500	8072.074	3.073	0.00065	24.269
30	81	24.578	89.916	8008.323	931.500	8062.315	3.069	0.00065	24.663
31	81	24.937	92.964	8008.323	850.500	8053.358	3.065	0.00064	25.027
32	81	25.264	96.012	8008.323	769.500	8045.207	3.062	0.00064	25.360
33	81	25.560	99.060	8008.323	688.500	8037.864	3.059	0.00064	25.663
34	81	25.825	102.108	8008.323	607.500	8031.331	3.057	0.00064	25.935
35	81	26.059	105.156	8008.323	526.500	8025.611	3.055	0.00064	26.178
36	81	26.261	108.204	8008.323	445.500	8020.704	3.053	0.00064	26.389
37	81	26.432	111.252	8008.323	364.500	8016.613	3.051	0.00064	26.571
38	81	26.573	114.300	8008.323	283.500	8013.339	3.050	0.00064	26.725
39	81	26.682	117.348	8008.323	202.500	8010.882	3.049	0.00064	26.851
40	81	26.760	120.396	8008.323	121.500	8009.244	3.048	0.00064	26.951
41	81	26.806	123.444	8008.323	40.500	8008.425	3.048	0.00064	27.028
42	81	26.822	126.492	8008.323	40.500	8008.425	3.048	0.00064	27.093

Tab. 4-2: Souřadnice hlavního nosného lana po instalaci segmentů mostovky po prvním návrhu, $f=27,093$ m

Reakce:

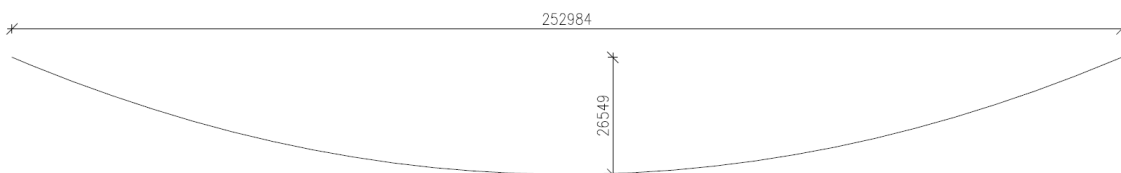
$$R_{az} = R_{bz} = 3361,500 \text{ kN}$$

$$R_{ax} = R_{bx} = 7922,931 \text{ kN}$$

$$R_a = R_b = 8606,539 \text{ kN}$$

4.1.3. GEOMETRIE LANA PŘED ZAVĚŠENÍM ZÁVĚSŮ SE SEGMENTY MOSTOVKY – FINÁLNÍ ODHAD

Po opravě vzepětí a přepočtu všech požadovaných veličin stejným postupem, jako v kapitole 4.1.1., bylo navrženo vzepětí lana před zatížením mostovky na 26,549 m.



Obr. 4-5: Tvar hlavního nosného lana před instalací segmentů mostovky - finální návrh, $f=26,549 \text{ m}$

F'	[N]	z_i [m]	x_i [m]	F'	[N]	z_i [m]	x_i [m]
1	48300	0.000	0.000	22	48300	20.380	65.532
2	48300	1.874	4.572	23	48300	20.982	68.580
3	48300	3.092	7.620	24	48300	21.552	71.628
4	48300	4.280	10.668	25	48300	22.092	74.676
5	48300	5.436	13.716	26	48300	22.601	77.724
6	48300	6.562	16.764	27	48300	23.079	80.772
7	48300	7.657	19.812	28	48300	23.526	83.820
8	48300	8.721	22.860	29	48300	23.943	86.868
9	48300	9.754	25.908	30	48300	24.328	89.916
10	48300	10.757	28.956	31	48300	24.683	92.964
11	48300	11.728	32.004	32	48300	25.007	96.012
12	48300	12.669	35.052	33	48300	25.300	99.060
13	48300	13.579	38.100	34	48300	25.562	102.108
14	48300	14.458	41.148	35	48300	25.793	105.156
15	48300	15.306	44.196	36	48300	25.994	108.204
16	48300	16.124	47.244	37	48300	26.163	111.252
17	48300	16.910	50.292	38	48300	26.302	114.300
18	48300	17.666	53.340	39	48300	26.410	117.348

F'	[N]	z _i [m]	x _i [m]	F'	[N]	z _i [m]	x _i [m]
19	48300	18.391	56.388	40	48300	26.487	120.396
20	48300	19.085	59.436	41	48300	26.534	123.444
21	48300	19.748	62.484	42	48300	26.549	126.492

Tab. 4-3: Souřadnice hlavního nosného lana před instalací segmentů mostovky – finální návrh, $f=26,549$ m

Reakce:

$$R_{az} = R_{bz} = 2004,450 \text{ kN}$$

$$R_{ax} = R_{bx} = 4772,995 \text{ kN}$$

$$R_a = R_b = 5176,804 \text{ kN}$$

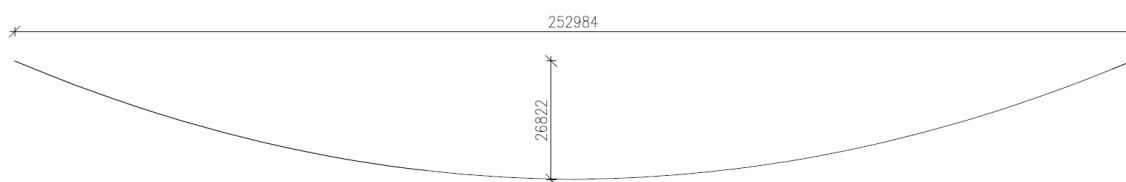
4.1.4. GEOMETRIE LANA PO ZAVĚŠENÍ ZÁVĚSŮ SE SEGMENTY MOSTOVKY – FINÁLNÍ NÁVRH

Navržená geometrie z kapitoly 4.1.3. se vzepětím 26,549 m se po instalaci segmentů mostovky přetvoří do takového tvaru, že dojde k ustálení s požadovaným vzepětím 26,822 m. Postup výpočtu je totožný jako v kapitole 4.1.2.2. Následující tabulka uvádí konečný tvar geometrie lana včetně normálových sil a jednotlivých hodnot protažení stran polygonu.

F	[kN]	z _i [m]	x _i [m]	N _x [kN]	N _z [kN]	N [kN]	l [m]	Δl [m]	z _{i upr}
1	81.000	0.000	0.000	8008.323	3280.500	8654.185	4.941	0.00112	0.000
2	81.000	1.874	4.572	8008.323	3199.500	8623.806	3.282	0.00074	1.877
3	81.000	3.092	7.620	8008.323	3118.500	8594.084	3.271	0.00073	3.097
4	81.000	4.280	10.668	8008.323	3037.500	8565.024	3.260	0.00073	4.287
5	81.000	5.436	13.716	8008.323	2956.500	8536.634	3.249	0.00072	5.445
6	81.000	6.562	16.764	8008.323	2875.500	8508.921	3.239	0.00072	6.573
7	81.000	7.657	19.812	8008.323	2794.500	8481.890	3.228	0.00072	7.670
8	81.000	8.721	22.860	8008.323	2713.500	8455.549	3.218	0.00071	8.736
9	81.000	9.754	25.908	8008.323	2632.500	8429.904	3.209	0.00071	9.772
10	81.000	10.757	28.956	8008.323	2551.500	8404.962	3.199	0.00070	10.777
11	81.000	11.728	32.004	8008.323	2470.500	8380.728	3.190	0.00070	11.750
12	81.000	12.669	35.052	8008.323	2389.500	8357.209	3.181	0.00069	12.694

F	[kN]	z_i [m]	x_i [m]	N_x [kN]	N_z [kN]	N [kN]	l [m]	Δl [m]	$z_{i\text{ upr}}$
13	81.000	13.579	38.100	8008.323	2308.500	8334.411	3.172	0.00069	13.606
14	81.000	14.458	41.148	8008.323	2227.500	8312.339	3.164	0.00069	14.487
15	81.000	15.306	44.196	8008.323	2146.500	8291.001	3.156	0.00068	15.338
16	81.000	16.124	47.244	8008.323	2065.500	8270.400	3.148	0.00068	16.159
17	81.000	16.910	50.292	8008.323	1984.500	8250.544	3.140	0.00068	16.947
18	81.000	17.666	53.340	8008.323	1903.500	8231.436	3.133	0.00067	17.706
19	81.000	18.391	56.388	8008.323	1822.500	8213.083	3.126	0.00067	18.434
20	81.000	19.085	59.436	8008.323	1741.500	8195.490	3.119	0.00067	19.131
21	81.000	19.748	62.484	8008.323	1660.500	8178.661	3.113	0.00066	19.797
22	81.000	20.380	65.532	8008.323	1579.500	8162.601	3.107	0.00066	20.432
23	81.000	20.982	68.580	8008.323	1498.500	8147.314	3.101	0.00066	21.038
24	81.000	21.552	71.628	8008.323	1417.500	8132.806	3.095	0.00066	21.611
25	81.000	22.092	74.676	8008.323	1336.500	8119.080	3.090	0.00066	22.155
26	81.000	22.601	77.724	8008.323	1255.500	8106.140	3.085	0.00065	22.668
27	81.000	23.079	80.772	8008.323	1174.500	8093.990	3.081	0.00065	23.150
28	81.000	23.526	83.820	8008.323	1093.500	8082.634	3.076	0.00065	23.602
29	81.000	23.943	86.868	8008.323	1012.500	8072.074	3.072	0.00065	24.024
30	81.000	24.328	89.916	8008.323	931.500	8062.315	3.069	0.00065	24.414
31	81.000	24.683	92.964	8008.323	850.500	8053.358	3.065	0.00064	24.774
32	81.000	25.007	96.012	8008.323	769.500	8045.207	3.062	0.00064	25.104
33	81.000	25.300	99.060	8008.323	688.500	8037.864	3.059	0.00064	25.404
34	81.000	25.562	102.108	8008.323	607.500	8031.331	3.057	0.00064	25.673
35	81.000	25.793	105.156	8008.323	526.500	8025.611	3.055	0.00064	25.913
36	81.000	25.994	108.204	8008.323	445.500	8020.704	3.053	0.00064	26.123
37	81.000	26.163	111.252	8008.323	364.500	8016.613	3.051	0.00064	26.303
38	81.000	26.302	114.300	8008.323	283.500	8013.339	3.050	0.00064	26.456
39	81.000	26.410	117.348	8008.323	202.500	8010.882	3.049	0.00064	26.581
40	81.000	26.487	120.396	8008.323	121.500	8009.244	3.048	0.00064	26.680
41	81.000	26.534	123.444	8008.323	40.500	8008.425	3.048	0.00064	26.758
42	81.000	26.549	126.492	8008.323	40.500	8008.425	26.723	0.00559	26.822

Tab. 4-4: Souřadnice hlavního nosného lana po instalaci segmentů mostovky - finální návrh, $f=26,822$ m

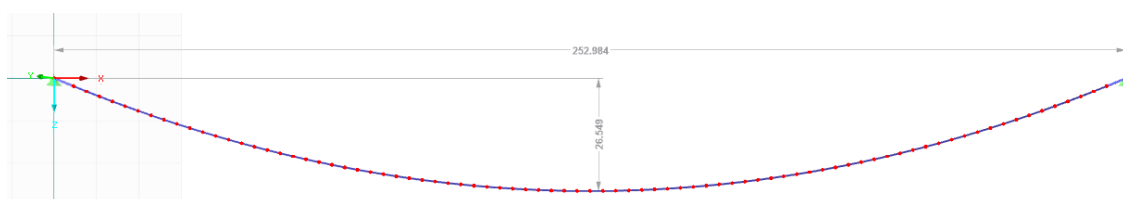


Obr. 4-6: Tvar hlavního nosného lana po instalaci segmentů mostovky - finální návrh, $f=26,822\text{ m}$

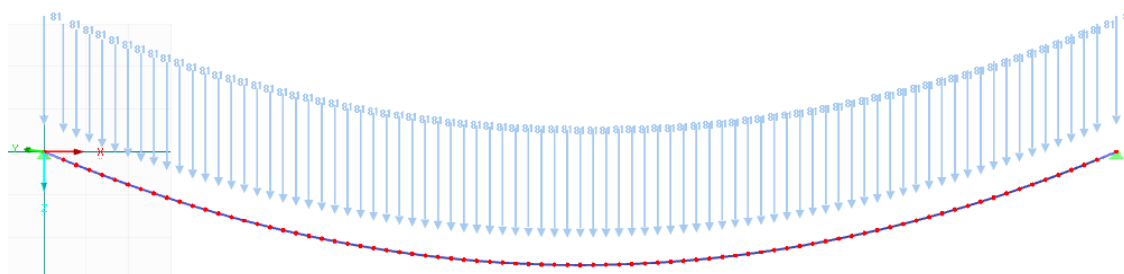
4.1.5. VÝPOČET POMOCÍ VÝPOČETNÍHO PRAGRAMU

Navržená geometrie lana ručním výpočtem z kapitoly 4.1.3. se nyní převede do výpočetního softwaru RFEM. Zatíží se silami, představující tíhu segmentů a provede se výpočet. Výsledné přetvoření lana se poté porovná s přetvořením, které bylo vypočítáno ručním výpočtem.

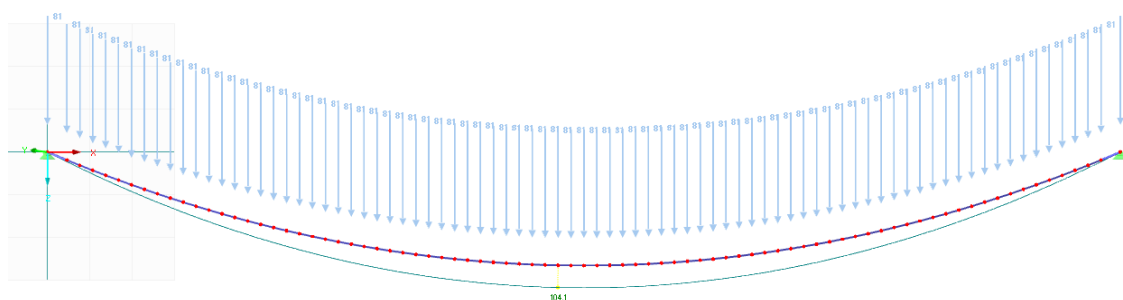
Modul pružnosti E , plocha lana r a síly představující tíhy segmentů jsou totožné, jako v ručním výpočtu. Vlastní tíhu lana program nepočítá, je již zahrnuta v silách, kterými je lano zatíženo.



Obr. 4-7: Statické schéma lana ve výpočetním softwaru RFEM



Obr. 4-8: Zatížené statické schéma lana ve výpočetním softwaru RFEM



Obr. 4-9: Zatížené statické schéma lana ve výpočetním softwaru RFEM včetně znázornění průhybu

Tímto výpočtem se vzepětí lana zvětšilo o 0,104 m.

4.2. NÁVRH GEOMETRIE LANA VÝPOČETNÍM PROGRAMEM

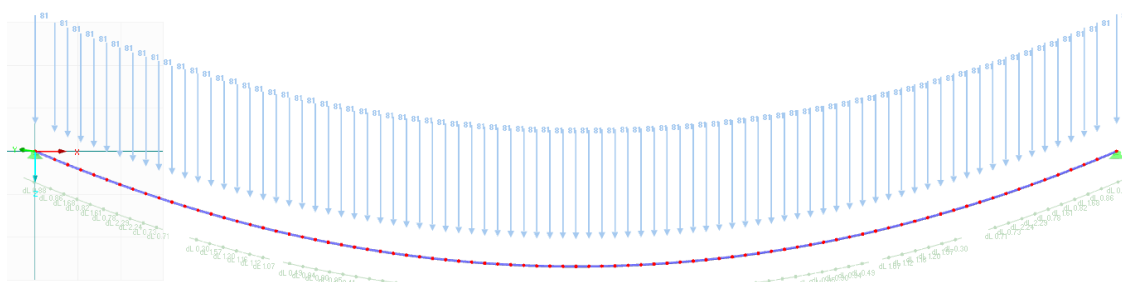
Druhý způsob návrhu geometrie nosného lana byl proveden pouze ve výpočetním programu RFEM. Rovinný vláknový polygon se stejným počtem bodů a stran polygonu jako v ručním výpočtu, byl zatížen silami představujícími tíhu segmentů. Tíha nosného lana opět nebyla počítána výpočetním programem, je již zahrnuta v silách, kterými bylo zatěžováno. Poloměr lana r a modul pružnosti E zůstává stejný, jako v kapitole 4.1.

4.2.1. POSTUP NÁVRHU

Přetvoření geometrie lana, které nastane po zatížení, bylo použito pro opravu souřadnic z . Výpočetní program spočítá posuny $u_{(z)}$ jednotlivých bodů, pomocí kterých se dopočítá protažení jednotlivých stran rovinného vláknového polygonu

$$\Delta l = l - l' \quad (4.7)$$

a opraví se souřadnice z. Protážení se následně použije jako zatížení. Jedná se o typ zatížení podélný posun v záporné hodnotě. Oprava souřadnic se provede několikrát, dokud se nedosáhne posunu menšího než 3 mm. Jelikož se jedná o několikrát se opakující výpočet, v následující tabulce jsou uvedeny konečné navržené hodnoty pořadnic z a podélné posuny.



Obr. 4-10: Zatížené statické schéma lana ve výpočetním softwaru RFEM; síly, podélné posuny

x_i [m]	z_i [m]	l [m]	F [kN]	Δl [mm]	$u_{(z)}$ [mm]	z_i' [m]
0.000	0.000	4.949	81.000	-0.880	0.000	0.000
4.572	1.894	3.287	81.000	-0.860	-0.300	1.894
7.620	3.124	3.275	81.000	-1.680	0.100	3.124
10.668	4.323	3.264	81.000	-0.820	0.200	4.323
13.716	5.492	3.253	81.000	-1.610	0.500	5.493
16.764	6.629	3.242	81.000	-0.780	0.100	6.629
19.812	7.735	3.232	81.000	-2.290	0.300	7.735
22.860	8.810	3.222	81.000	-2.240	0.200	8.810
25.908	9.854	3.212	81.000	-0.730	-0.300	9.854
28.956	10.866	3.202	81.000	-0.710	0.100	10.866
32.004	11.848	3.193	81.000	0.000	0.100	11.848
35.052	12.798	3.184	81.000	0.000	0.500	12.799
38.100	13.717	3.175	81.000	-0.300	0.800	13.718
41.148	14.605	3.166	81.000	-1.570	1.000	14.606
44.196	15.463	3.158	81.000	-1.200	0.700	15.464
47.244	16.288	3.150	81.000	-1.160	0.800	16.289
50.292	17.083	3.142	81.000	-1.120	0.700	17.084
53.340	17.846	3.135	81.000	-1.070	0.500	17.847
56.388	18.579	3.128	81.000	0.000	0.200	18.579
59.436	19.280	3.121	81.000	-0.490	0.500	19.281
62.484	19.950	3.114	81.000	-0.940	0.500	19.951
65.532	20.589	3.108	81.000	-0.900	0.300	20.589
68.580	21.197	3.102	81.000	-0.850	0.300	21.197

x_i [m]	z_i [m]	l [m]	F [kN]	Δl [mm]	$u_{(z)}$ [mm]	z_i' [m]
71.628	21.773	3.097	81.000	-0.410	0.200	21.773
74.676	22.319	3.091	81.000	-0.770	0.200	22.319
77.724	22.833	3.086	81.000	-0.720	0.100	22.833
80.772	23.316	3.081	81.000	-0.340	0.000	23.316
83.820	23.768	3.077	81.000	-0.630	0.000	23.768
86.868	24.189	3.073	81.000	-0.290	-0.100	24.189
89.916	24.578	3.069	81.000	-0.270	-0.100	24.578
92.964	24.937	3.065	81.000	-0.250	-0.100	24.937
96.012	25.264	3.062	81.000	-0.220	-0.100	25.264
99.060	25.560	3.059	81.000	-0.200	-0.100	25.560
102.108	25.825	3.057	81.000	-0.180	-0.100	25.825
105.156	26.059	3.055	81.000	-0.150	-0.100	26.059
108.204	26.262	3.053	81.000	0.000	-0.100	26.262
111.252	26.433	3.051	81.000	-0.110	-0.100	26.433
114.300	26.573	3.050	81.000	-0.080	-0.100	26.573
117.348	26.682	3.049	81.000	0.000	-0.100	26.682
120.396	26.760	3.048	81.000	-0.040	-0.100	26.760
123.444	26.807	3.048	81.000	-0.500	0.000	26.807
126.492	26.821	3.048	81.000	-0.500	1.400	26.822

Tab. 4-5: Geometrie, zatížení a výsledné přetvoření lana

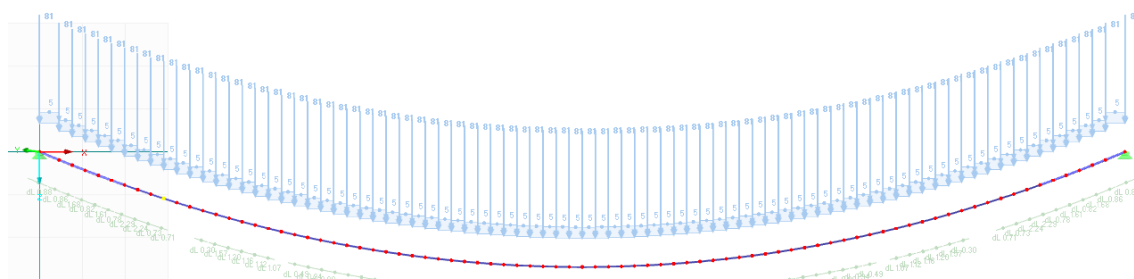
Podařilo se docílit maximálního posunu 1,400 mm, čímž se splnil předem stanovený limit posunu 3 mm a po přetvoření se hodnota vzepětí ustálila na 26,822 m.

4.2.2. ZATÍŽENÍ V PODÉLNÉM SMĚRU

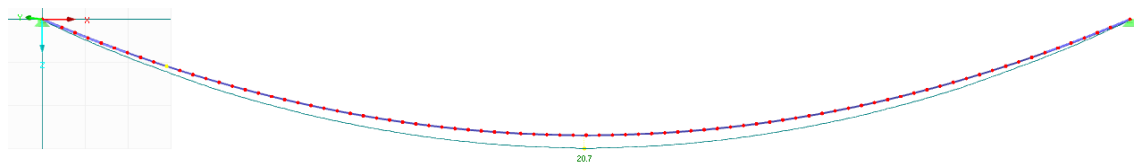
Pro ilustraci chování lana, které je zatíženo davem lidí, se provede zatížení lana tímto modelem. Jedná se o model zatížení davem – hodnota $q=5\text{kN/m}$. Zatížení bude zadáno na průmět prutu. Na reálné konstrukci by bylo zatížení umístěno na mostovce a deformace by se projevila i na závěsech segmentů, proto se jedná pouze o ilustraci. Jelikož je již tento krok mimo téma této bakalářské práce, nebude provedeno posouzení z hlediska mezních stavů.

ZS1 – dav lidí na celém rozpětí konstrukce

ZS2 – dav lidí na polovině rozpětí konstrukce

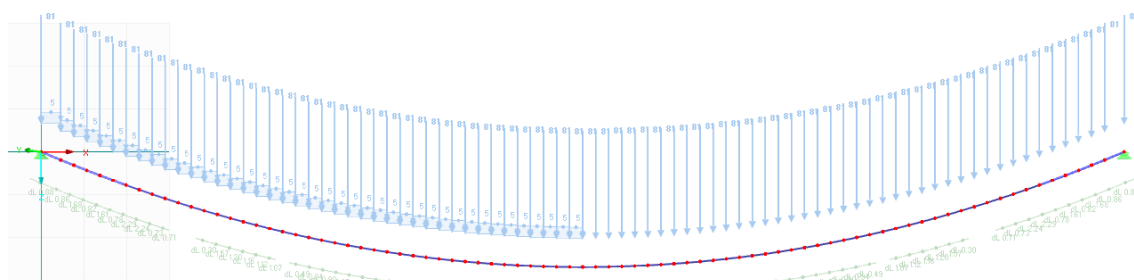


Obr.4-11: ZS1 - zatížení lana

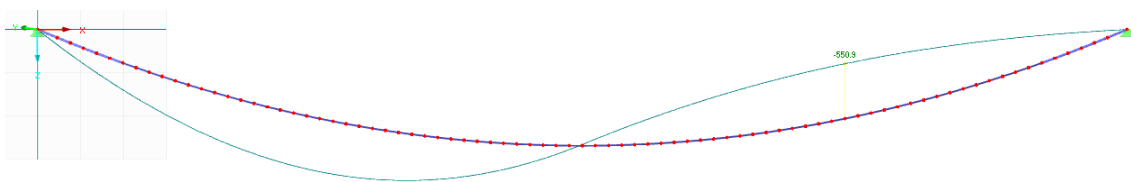


Obr. 4-12: ZS1 - deformace lana

Při zatížení lana davem lidí na celé rozpětí konstrukce došlo k maximálnímu posunu ve směru osy z $u_z=20,700$ mm.



Obr. 4-13: ZS2 - zatížení lana



Obr. 4-14: ZS2 - deformace lana

Při zatížení lana davem lidí na polovině rozpětí konstrukce došlo k maximálnímu posunu ve směru osy z $u_{(z)}=550,900$ mm.

5. ZÁVĚR

Ručním výpočtem byla stanovena montážní geometrie lana se vzepětím 26,549 m. Po zatížení a následných deformacích se vzepětí lana ustálilo na požadované hodnotě 26,822 m. Změna vzepětí 0,273 m. Tatož montážní geometrie byla poté převedena do výpočetního programu RFEM a zatížena stejným zatížením, jako při ručním výpočtu. Vzepětí lana zvětšilo svou hodnotu na 26,653 m. Rozdíl mezi vzepětími, do kterých se lano přetvořilo po zatížení, tak činí 0,169 m. Tento rozdíl přikládám k přesnějšímu výpočtu pomocí výpočetního softwaru, zejména většímu počtu iterací.

Druhý návrh byl vytvořen pouze ve výpočetním softwaru. Podařilo se najít geometrii lana se vzepětím 26,821 m a s počátečním zkrácením 54,72 mm. Takto navržená geometrie vykazala deformaci 1,400 mm. Vzepětí po deformaci dosáhlo požadované hodnoty 26,822 m.

Jelikož se jednalo o návrh pouze ve 2D, ruční výpočet, kdy se hledalo takové počáteční vzepětí, abychom po deformaci dostali požadované, bylo v tomto případě snazší. Při návrhu takovéto konstrukce ve 3D pak použití výsledků deformací k opravám souřadnic a následně geometrie lana je v praxi používaným postupem.

Pokud to bude možné, v následujícím studiu chci rozšířit své znalosti v této problematice. Konkrétně v návrhu kompletní visuté či zavěšené mostní konstrukce, hlavních nosných lan a závěsů, ve 3D.

SEZNAM TABULEK

- 4-1 *Souřadnice hlavního nosného lana před instalací segmentů mostovky po prvním návrhu, $f=26,822$ m*
- 4-2 *Souřadnice hlavního nosného lana po instalaci segmentů mostovky po prvním návrhu, $f=27,093$ m*
- 4-3 *Souřadnice hlavního nosného lana před instalací segmentů mostovky – finální návrh, $f=26,549$ m*
- 4-4 *Souřadnice hlavního nosného lana po instalaci segmentů mostovky - finální návrh, $f=26,822$ m*
- 4-5 *Geometrie, zatížení a výsledné přetvoření lana*

SEZNAM OBRÁZKŮ

- 2-1 *Rovinný vláknový polygon [1]*
- 2-2 *Parabolická řetězovka [1]*
- 2-3 *Pravá – tížní řetězovka [1]*
- 2-4 *Obecná řetězovka [1]*
- 3-1 *Schéma lávky; Měřítko 1:3000*
- 3-2 *Tvar hlavního nosného lana, Měřítko 1:1000*
- 4-1 *Statické schéma lana pro ruční výpočet*
- 4-2 *Tvar hlavního nosného lana před instalací segmentů mostovky po prvním návrhu, $f=26,822$ m*
- 4-3 *3D náhledy – segment mostovky*
- 4-4 *Tvar hlavního nosného lana po instalaci segmentů mostovky po prvním návrhu, $f=27,093$ m*
- 4-5 *Tvar hlavního nosného lana před instalací segmentů mostovky - finální návrh, $f=26,549$ m*
- 4-6 *Tvar hlavního nosného lana po instalaci segmentů mostovky - finální návrh, $f=26,822$ m*
- 4-7 *Statické schéma lana ve výpočetním softwaru RFEM*
- 4-8 *Zatížené statické schéma lana ve výpočetním softwaru RFEM*
- 4-9 *Zatížené statické schéma lana ve výpočetním softwaru RFEM včetně znázornění průhybu*
- 4-10 *Zatížené statické schéma lana ve výpočetním softwaru RFEM; síly, podélné posuny*
- 4-11 *ZS1 - zatížení lana*
- 4-12 *ZS1 - deformace lana*
- 4-13 *ZS2 - zatížení lana*
- 4-14 *ZS2 - deformace lana*

SEZNAM ZKRATEK

f	vzepětí lana
p	rovnorné spojité zatížení
L	rozpětí lana
σ	normálové napětí
N	normálová síla
A	průřezová plocha
r'	poloměr kabelu
r	poloměr lana
E	modul pružnosti v tahu
z	pořadnice bodu ve směru osy Z
x	pořadnice bodu ve směru osy X
$z_{i \text{ upr}}$	pořadnice bodu ve směru osy Z opravená o daný posun
z_i'	pořadnice bodu ve směru osy Z po přetvoření
H	vodorovná síla
R	reakce
F	síla představující tíhu segmentu
F'	síla představující tíhu lana
l	délka strany polygonu
Δl	protažení strany polygonu
l'	délka strany polygonu po protažení
u_z	posun bodu ve směru osy Z

LITERATURA

- [1] KADLČÁK, Jaroslav a KYTÝR, Jiří. *Statika stavebních konstrukcí I*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, Antonínská 1, 2001. ISBN 80-214-1877-X.
- [2] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7.

STUDIJNÍ PRAMENY

- [3] Lávka pro pěší přes řeku Missouri, Omaha, Nebraska, USA (2006). *Stráský, Hustý a partneři s.r.o. (SHP)* [online]. [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://www.shp.eu/strasky-husty-a-partneri/projekty/souteze/lavka-pro-pesi-pres-reku-missouri-omaha-nebraska-usa-2006/>