

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Netušil, Ph.D.

Autor diplomové práce:

Bc. Lukáš Kulháněk

Vysoká škola: ČVUT v Praze
Fakulta: Stavební
Katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Obor: Konstrukce a dopravní stavby
Školní rok: 2017/2018

LÁVKA PRO CHODCE PŘES OTAVU VE STRAKONICÍCH

Autor diplomové práce: Bc. Lukáš Kulhánek
Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Netušil, Ph.D.





ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: <u>Kulhánek</u>	Jméno: <u>Lukáš</u>	Osobní číslo: <u>395580</u>
Zadávající katedra: <u>K134 Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Lávka pro chodce přes Otavu ve Strakonících</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Footbridge across the river Otava in Strakonice</u>	
Pokyny pro vypracování: Návrh konstrukčního řešení lávky, statické schéma. Posouzení konstrukce statickým výpočtem pomocí numerického 3D modelu. Výkresová dokumentace hlavní nosné konstrukce a hlavních detailů. Technická zpráva.	
Seznam doporučené literatury: Skripta katedry K134 (zatížení, ocelové konstrukce, mosty) Normy pro navrhování ocelových konstrukcí a mostů	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Michal Netušil, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>9.10.2017</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>8.1.2018</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak.roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>9.10.2017</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	---

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 8. 1. 2018



Bc. Lukáš Kulhánek

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalu Netušilovi, Ph.D., za odborné vedení diplomové práce a trpělivost při konzultacích.

Dále bych rád poděkoval své rodině za morální i finanční podporu při studiu.

Anotace

Předmětem diplomové práce je návrh ocelové konstrukce lávky pro chodce přes řeku Otavu ve Strakonici. Na základě studie alternativ nosné konstrukce byla zvolena varianta s visutými lany, která byla následně podrobněji rozpracována. Tato práce se věnuje návrhu hlavních nosných prvků konstrukce a vybraných konstrukčních detailů. Výpočet je proveden podle evropských norem zavedených do systému českých norem ČSN EN.

Klíčová slova

visutý most, lávka pro pěší, ocel, zatížení chodci, 3D model konstrukce

Annotation

The subject of the thesis is the design of the steel footbridge construction over the Otava River in Strakonice. Based on the study of supporting construction alternatives, the version with suspension ropes has been chosen, which was elaborated consequently in detail. The thesis is focused on the design of main supporting elements of the construction and selected construction details. The calculation was conducted according to the European norms imposed to the system of Czech norms ČSN EN.

Keywords

Suspension bridge, footbridge, steel, pedestrians load, 3D construction model

OBSAH

1.	Úvodní údaje	8
2.	Popis konstrukce	8
3.	Výpočty	9
3. 1.	Výpočet zatížení.....	9
3. 1. 1.	Stálé zatížení	9
3. 1. 2.	Proměnné zatížení	10
3. 1. 3.	Zatížení předpětím	17
4.	Kombinace zatěžovacích stavů	18
5.	Návrh a posouzení pochozí části mostovky	19
5. 1.	Návrh a posouzení dubové mostiny.....	19
5. 2.	Posouzení podélníků.....	20
6.	Výpočetní model nosné konstrukce visuté lávky.....	22
7.	Stanovení velikosti předpětí visutých lan	23
8.	Posouzení konstrukce v MSÚ	24
8. 1.	Příčníky.....	24
8. 2.	Hlavní nosníky	28
8. 3.	Pylony.....	31
8. 4.	Podmostvková ztužidla	35
8. 5.	Visuté lano	38
8. 6.	Závěsy.....	39
9.	Posouzení konstrukce v MSP	40
9. 1.	Deformace hlavních nosníků.....	40
9. 2.	Deformace pylonů.....	42
9. 3.	Posouzení dynamické odezvy konstrukce.....	44
10.	Návrh a posouzení hlavních detailů	47
10. 1.	Uložení hlavních nosníků na příčníky pylonů.....	47
10. 2.	Návrh a posouzení zábradlí.....	49
10. 3.	Připojení příčníků na hlavní nosníky	53
10. 4.	Připojení ztužidel k hlavnímu nosníku	56
10. 5.	Uložení pylonu na základ	58
10. 6.	Uložení podélníků na příčníky	64
10. 7.	Připojení závěsů na visuté lano.....	65
11.	Závěr.....	67

12.	Seznam použitých symbolů.....	68
13.	Seznam použitých zdrojů	71

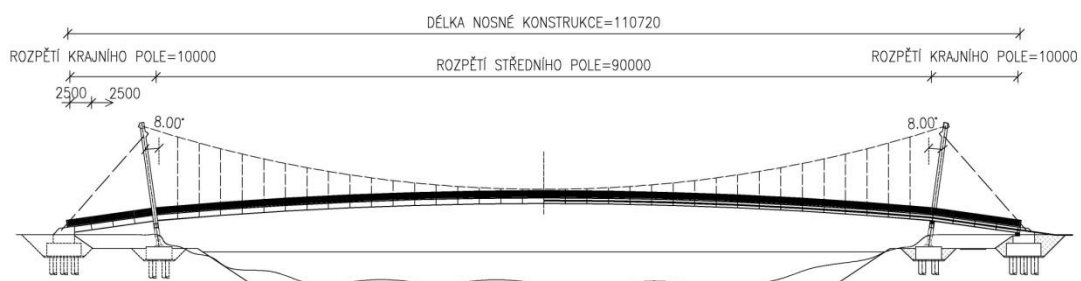
PŘÍLOHY:	Č.1 - Předběžný návrh variant řešení lávky pro pěší	
	Č.2 - Technická zpráva	
	Č.3 – Podélný řez/pohled a půdorys	
	Č.4 – Příčné řezy	
	Č.5 – Detail D1	
	Č.6 – Detail D2	
	Č.7 – Detail D3	
	Č.8 – Detail D4	
	Č.9 – Detail D5	

1. Úvodní údaje

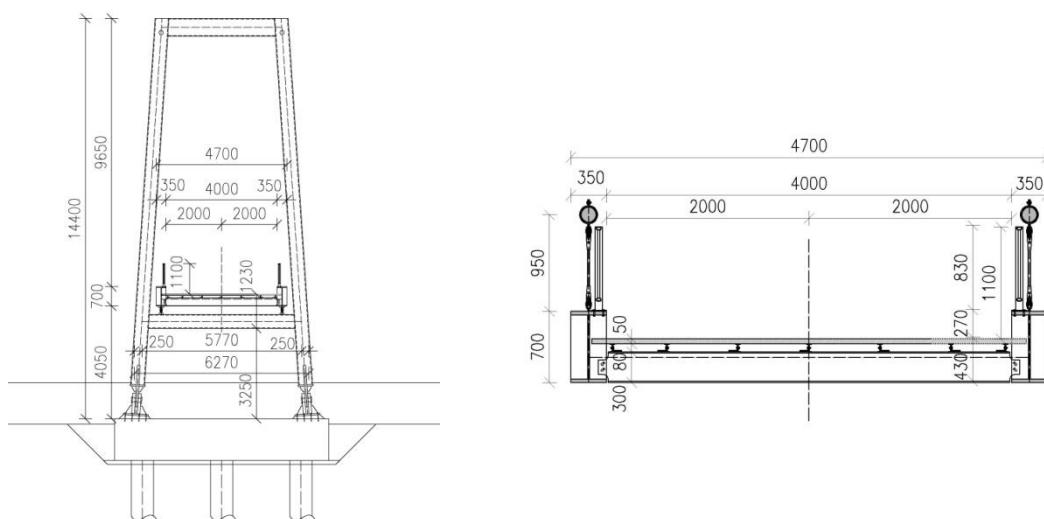
Předmětem diplomové práce je návrh a posouzení lávky pro pěší ve Strakonících přes řeku Otavu. Na základě výsledků předběžného návrhu různých variant řešení konstrukce lávky (viz příloha č.1 – Předběžný návrh variant řešení lávky pro chodce) byla vybrána konstrukce visutá, která bude podrobně navržena a posouzena v této diplomové práci.

2. Popis konstrukce

Jedná se o visutou lávku s celkovým rozpětím 110,0 m situovanou přes řeku Otavu ve Strakonících. Lávka je směrově vedena přímo a bude situována kolmo na směr toku. Krajní pole mají rozpětí 10 m, střední pole 90 m.



Obr. č.1 – Geometrie lávky v podélném směru



Obr. č.2 – Geometrie lávky v příčném směru

Konstrukce se skládá z kloubově uložených pylonů tvaru A čtvercového průřezu 500/500/25 mm. Pylony jsou příčně ztuženy dvěma příčníky, ve vrcholu průřezem 650/500/25 mm a v místě uložení hlavních nosníků průřezem 500/500/25 mm. Pylony jsou v podélném směru v osové vzdálenosti 90m. K vrcholům pylonů je uchyceno celkem šest visutých lan VSL, 22 lan, \varnothing 80 mm. Krajní visutá lana budou na druhém konci připojena k betonovým blokům.

Z visutých lan jsou spuštěny závěsy k hlavním nosníkům po vzdálenosti 2,5 m. Závěsy jsou lana Macalloy \varnothing 22 mm. Dva hlavní nosníky jsou svařovaného I průřezu s pásnicemi 350/35 mm a stojinou 630/20 mm, celková výška nosníků je tedy 700 mm a šířka 350 mm. Hlavní nosníky jsou čepově uloženy na příčníky pylonů. Mezi hlavními nosníky jsou po 2,5 m příčníky ze svařovaného I průřezu s pásnicemi 150/12 mm a stojinou 276/8 mm, celková výška příčníků činí 300 mm a šířka 150 mm. Konstrukce je ztužena podmostovkovým ztužením průřezu HTR 90/90/10. Ztužení je rozmístěno střídavě mezi příčníky. Na příčníky jsou kolmo uloženy podélníky IPE 80, ocel S235, tvořící podporu pro pochozí dubové mostiny tl. 50 mm, řezivo D30. Hlavní nosná konstrukce je navržena z oceli S355, třída provedení EXC 3. Pylony budou uloženy čepově na základové bloky založených na pilotách \varnothing 800 mm. Základové konstrukce jsou z betonu C20/25.

3. Výpočty

Výpočet vnitřních sil a deformací byl proveden v programu Dlubal RFEM 5.11. Pro posouzení visutých lan, závěsů, pylonů, hlavních nosníků, příčníků a podmostovkového ztužení byl vytvořen 3D model konstrukce, podrobněji viz kapitola 6, str. 23. Pro posouzení pochozí části mostovky byl vytvořen rovinný model, podrobněji viz kapitola 5, str. 20. Veškeré prvky nosné konstrukce byly posouzeny z hlediska mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti.

3. 1. Výpočet zatížení

3. 1. 1. Stálé zatížení

Zatížení vlastní tíhou konstrukce je započteno výpočtním softwarem Dlubal RFEM.

Ostatní stálé zatížení:

Plošné zatížení:

	kN/m ³	tl.	kN/m ²
Pochozí vrstva - Dubová prkna	6,4	0,05	0,32
7x IPE 80	-	-	0,1
Celkem			0,42

Liniové zatížení:

	kg/m	kN/m
zábradlí	100	1
Celkem		1

3. 1. 2. Proměnné zatížení

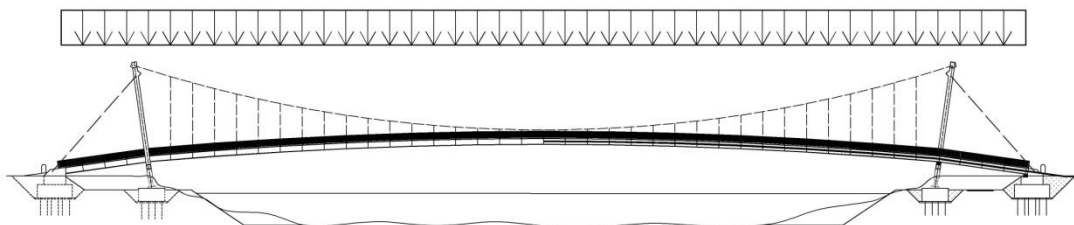
Zatížení chodci

Vzhledem k umístění lávky (nedaleko centra města Strakonice) je uvažováno s možností nahromadění lidu, z tohoto důvodu neuvažují redukci zatížení, dále je počítáno s hodnotou 5 kN/m².

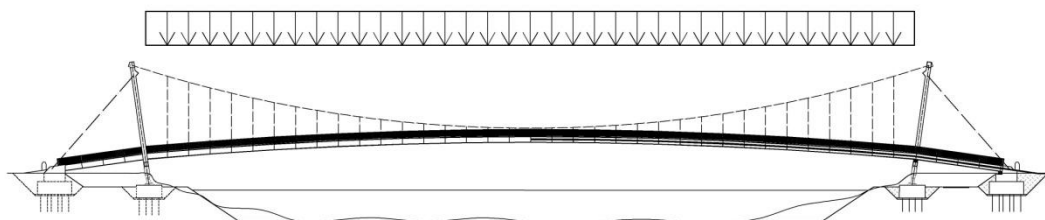
Pro stanovení maximálních účinků na konstrukci bude vyšetřeno více variant rozmístění chodců, pro návrh a posouzení je rozhodující zatížení chodci přes celé střední pole a dále zatížení přes polovinu středního pole lávky.

Vodorovná složka zatížení od chodců je stanovena na hodnotu 10% ze svislého zatížení, tzn. $0,1 \cdot 5 = 0,5 \text{ kN/m}^2$.

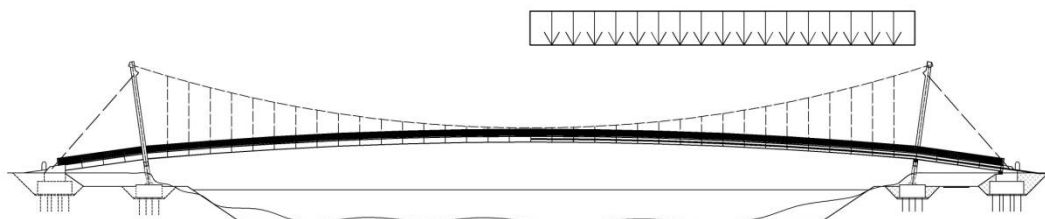
Uvažované rozmístění chodců:



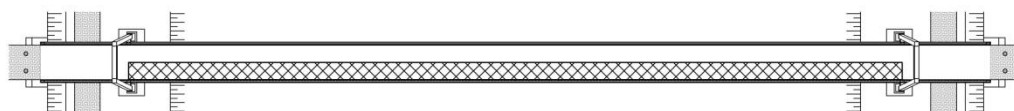
Obr. č.3 - Z.S.1 – Chodci přes celou délku a šířku konstrukce lávky



Obr. č.4 - Z.S.2 – Chodci přes celou šířku ve středním poli lávky



Obr. č.5 -Z.S.3 – Chodci přes celou šířku konstrukce umístěných na polovině rozpětí středního pole



Obr. č.6 -Z.S.4 – Chodci přes polovinu šířky mostovky ve středním poli lávky

Zatížení servisním vozidlem

Servisní vozidlo neuvažují, vjezd na lávku bude zabráněno například betonovými sloupky před lávkou.

Zatížení větrem

Střední rychlost větru

$$v_m(z) = c_{r(z)} \cdot c_{0(z)} \cdot v_b = 0,98 \cdot 1 \cdot 25 = 24,4 \text{ m/s}$$

$c_{r(z)}$... součinitel drsnosti terénu

$$c_{r(z)} = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{8,5}{0,05}\right) = 0,98$$

k_r ... součinitel terénu

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

$c_{0(z)}$... součinitel orografie

$$c_{0(z)} = 1$$

Kategorie terénu II

v_b ... základní rychlost větru

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

Intenzita turbulence

$$I_{v(z)} = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{4,75}{24,4} = 0,195$$

σ_v ... směrodatná odchylka turbulence

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I = 0,19 \cdot 25 \cdot 1,0 = 4,75$$

k_I ... součinitel turbulence

$$k_I = 1,0$$

Maximální dynamický tlak

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot I_{v(z)}\right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,195] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 24,4^2 = 880 \text{ Pa}$$

ρ ... měrná hmotnost vzduchu

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

Síly ve směru y působící na mostovku

Obr. č.7 – uvažovaný souřadný systém

f_w ... rovnoměrné zatížení od větru

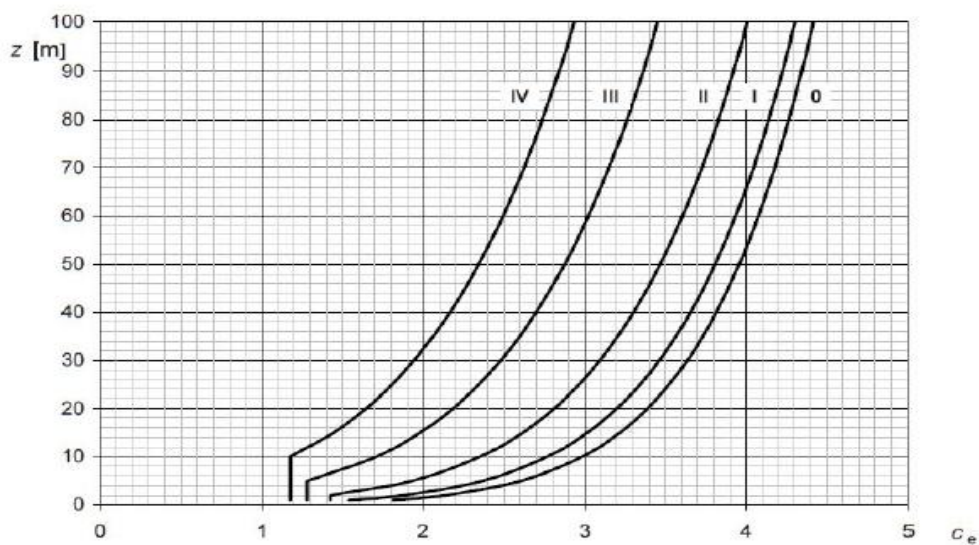
$$f_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot d_{tot} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 2,47 \cdot 0,7 = 0,68 \text{ kN/m}$$

z_{mostovka} ... výška mostovky nad terénem

$$z_{\text{mostovka}} = 5,5 \text{ m}$$

C ... součinitel zatížení větrem

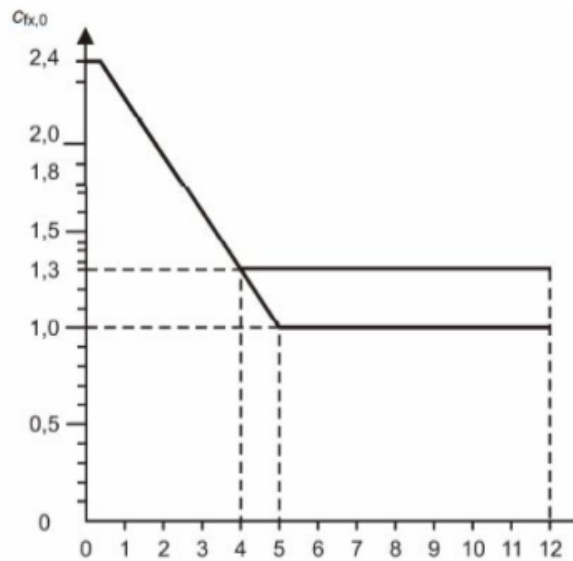
$$C = c_e \cdot c_{f,y} = 1,9 \cdot 1,3 = 2,47$$



Obr. č.8 – stanovení parametru C_e

c_e ... součinitel expozice

$$c_e = 1,9$$

Obr. č.9 – stanovení součinitele síly C_{fy0} v závislosti na b/d_{tot}

$$\frac{b}{d_{tot}} = \frac{4,55}{0,7} = 6,5$$

b ... šířka konstrukce

$$b = 4,55 \text{ m}$$

d_{tot} ... výška konstrukce

$$d_{tot} = 0,7 \text{ m}$$

$c_{f,y}$... součinitel síly bez vlivu proudění kolem volných konců

$$c_{f,y} = 1,3$$

Síly ve směru y působící na pylony

f_w ... rovnoměrné zatížení od větru

$$f_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C_f \cdot b_{pylon} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 1,89 \cdot 0,5 = 0,37 \text{ kN/m}$$

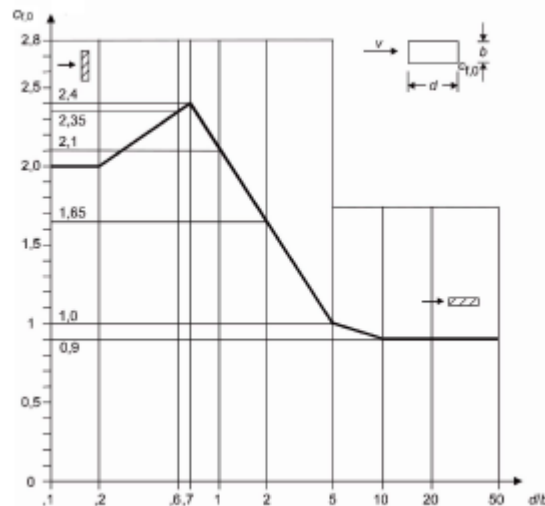
b_{pylon} , d_{pylon} ... půdorysné rozměry pylonu

$$b_{pylon} = 0,5 \text{ m}$$

$$d_{pylon} = 0,5 \text{ m}$$

C_f ... součinitel síly pro nosné prvky s obdélníkovým průřezem

$$C_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \cdot \psi_r = 2,1 \cdot 0,9 \cdot 1,0 = 1,89$$



Obr. č.10 – stanovení součinitele $C_{f,0}$

$$\frac{d}{b} = \frac{0,5}{0,5} = 1,0$$

$c_{f,0}$... součinitel síly pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy a bez uvažování vlivu koncových vírů

$$c_{f,0} = 2,1$$

ψ_r ... redukční součinitel pro čtvercové průřezy se zaoblenými rohy

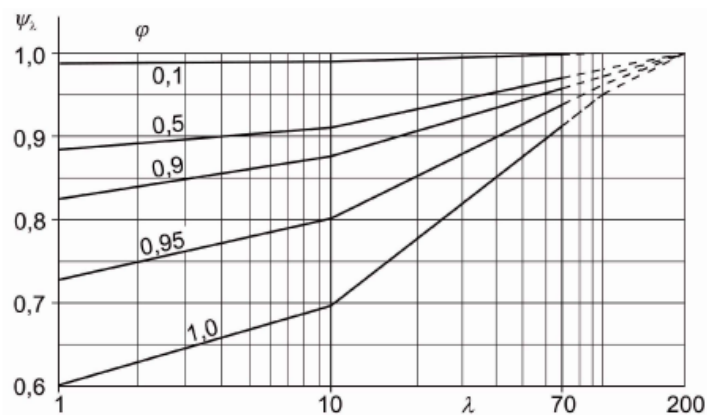
$$\psi_r = 1,0$$

λ ... štíhlost

$$\lambda = \min \left(\frac{2 \cdot l}{b} ; 70 \right) = \min \left(\frac{2 \cdot 14}{0,5} ; 70 \right) = \min (56 ; 70) = 56$$

l ... délka pylonu

$$l = 14 \text{ m}$$



Obr. č.11 – stanovení součinitele ψ_{λ}

φ ... součinitel plnosti

$$\varphi = 1,0$$

ψ_λ ... součinitel koncového efektu pro prvky s volnými konci

$$\psi_\lambda = 0,9$$

Síly ve směru y působící na visuté lano

f_w ... rovnoměrné zatížení od větru

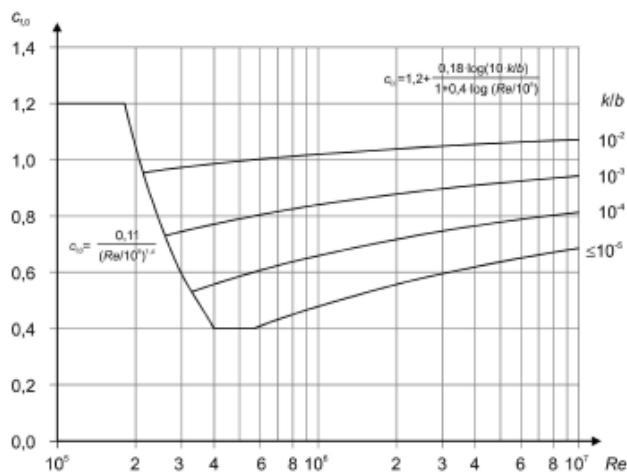
$$f_w = q_p \cdot b_{lano} \cdot C_f = 0,88^2 \cdot 0,1 \cdot 0,69 = 0,06 \text{ kN/m}$$

C_f ... součinitel síly pro nosné prvky s kruhovým průřezem

$$C_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0,77 \cdot 0,9 = 0,69$$

ψ_λ ... součinitel koncového efektu pro prvky s volnými konci

$$\psi_\lambda = 0,9$$



Obr. č.12 – stanovení součinitele $c_{f,0}$

Re ... Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{b \cdot v_{(ze)}}{\nu} = \frac{0,1 \cdot 37,52}{15 \cdot 10^{-6}} = 250\,156 = 2,5 \cdot 10^5$$

b ... průměr visutého lana

$$b = 0,1 \text{ m}$$

ν ... kinematická viskozita vzduchu ($\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

$v_{(ze)}$... maximální rychlost větru

$$v_{(ze)} = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,88}{1,25}} = 37,52 \text{ m/s}$$

k ... ekvivalentní drsnost povrchu

$$k = 0,2$$

$$\frac{k}{b} = \frac{0,2}{100} = 0,002$$

$c_{f,0}$... součinitel síly pro válce bez vlivu proudění kolem volných konců

$$c_{f,0} = 0,77$$

Síly ve směru y působící na závěsy

$$f_w = q_p \cdot b_{zavěs} \cdot C_f = 0,88^2 \cdot 0,04 \cdot 1,08 = 0,04 \text{ kN/m}$$

$$C_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 1,2 \cdot 0,9 = 1,08$$

$$\psi_\lambda = 0,9$$

$$Re = \frac{b \cdot v_{(ze)}}{\nu} = \frac{0,04 \cdot 37,52}{15 \cdot 10^{-6}} = 100\,062 = 1 \cdot 10^5$$

$$b = 0,04 \text{ m}$$

$$k = 0,2$$

$$\frac{k}{b} = \frac{0,2}{40} = 0,005$$

$$c_{f,0} = 1,2$$

Síly ve směru z působící na mostovku

Účinky větru ve směru Z jsou vzhledem k rozměrům konstrukce a sestavám zatěžovacích stavů nevýznamné a dále nebudou uváženy.

Síly ve směru x

Účinky větru ve směru X jsou vzhledem k rozměrům konstrukce nevýznamné a dále nebudou uváženy.

Zatížení námrazou

Vzhledem k zanedbatelné hmotnosti námrazy bude námraza zohledněna pouze v zatížení větrem zvětšením referenční plochy.

Zatížení teplotou

Konstrukce lávky je zatříděna jako 1.typ (ocelová nosná konstrukce). Zatížení teplotou bude stanoveno pomocí rovnoměrné a rozdílové složky teploty. Rozdílová složka bude uvažována lineární a pouze ve svislém směru.

Rovnoměrná složka

T_{\max} ... maximální teplota vzduchu ve stínu

$$T_{\max} = 40^\circ C$$

T_{min} ... minimální teplota vzduchu ve stínu

$$T_{min} = -34^{\circ}C$$

$T_{e,max}$... maximální složka

$$T_{e,max} = T_{max} + 16 = 40 + 16 = 56^{\circ}C$$

$T_{e,min}$... minimální složka

$$T_{e,min} = T_{min} - 3 = -34 - 3 = -37^{\circ}C$$

T_0 ... výchozí teplota

$$T_0 = 10^{\circ}C$$

$\Delta T_{N,exp}$... maximální rozsah pro prodloužení

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = 56 - 10 = 46^{\circ}C$$

$\Delta T_{N,con}$... maximální rozsah pro zkrácení

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = 10 + 37 = 47^{\circ}C$$

Rozdílová složka

$\Delta T_{M,heat}$... rozdíl pro horní povrch teplejší než dolní

$$\Delta T_{M,heat} = 18^{\circ}C$$

$\Delta T_{M,cool}$... rozdíl pro dolní povrch teplejší než horní

$$\Delta T_{M,cool} = 13^{\circ}C$$

$k_{sur,i}$... součinitel pro různé tloušťky svršku

$$k_{sur,1} = 0,7$$

$$k_{sur,2} = 0,9$$

$$\Delta T_{M,heat} \cdot k_{sur,1} = 18 \cdot 0,7 = 12,6^{\circ}C$$

$$\Delta T_{M,cool} \cdot k_{sur,2} = 13 \cdot 0,9 = 11,7^{\circ}C$$

Zatížení sněhem

Zatížení sněhem není uvažováno, případný sníh bude pravidelně odklizen.

3. 1. 3. Zatížení předpětím

Hlavní nosníky budou nadvýšeny a do visutých lan bude vnesena předpínací síla pro vyrušení průhybu od stálého zatížení a tím zachování tvaru nadvýšené konstrukce.

Tato síla je namodelována v programu Dlubal RFEM 5.11 pomocí funkce počáteční předpětí. Postup stanovení velikosti předpětí je podrobněji uveden v kapitole 7, str. 24.

4. Kombinace zatěžovacích stavů

Jsou sestaveny kombinace zatěžovacích stavů zahrnující současné působení chodců a zatížení větrem, dále kombinace pro zatížení chodci a zatížení teplotou. Není uvažováno současné působení zatížení větrem a zatížení teplotou.

Uvažované kombinace zatěžovacích stavů:

KZ1 – stálé + předpětí

KZ2 – stálé + předpětí + chodci po celé délce

KZ3 – stálé + předpětí + chodci ve středním poli

KZ4 – stálé + předpětí + chodci přes polovinu středního pole

KZ5 – stálé + předpětí + chodci ve středním poli umístěných přes polovinu šířky

KZ6 – stálé + předpětí + chodci ve středním poli umístěných přes polovinu šířky + vítr

KZ7 – stálé + předpětí + chodci přes polovinu středního pole + vítr

KZ8 – stálé + předpětí + chodci ve středním poli + vítr

KZ9 – stálé + předpětí + ochlazení

KZ10 – stálé + předpětí + chodci přes polovinu středního pole + ochlazení

KZ11 – stálé + předpětí + chodci přes polovinu středního pole + oteplení

KZ12 – stálé + předpětí + vítr

KZ13 – stálé + předpětí + chodci ve středním poli + oteplení

Kombinace obsahující dva zatěžovací stavy s proměnným zatížením byly vyšetřeny včetně možností dominance jednotlivých stavů zatížení.

Pro sestavení kombinací zatěžovacích stavů byl použit kombinační předpis 6.10:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Kde: $\gamma_{G,\text{nepříznivé}} = 1,35$ $\gamma_P = 1,00$ $\psi_{0,\text{chodci}} = 0,7$

$\gamma_{G,\text{příznivé}} = 1,00$ $\psi_{0,\text{vítr}} = 0,6$

$\gamma_Q = 1,50$ $\psi_{0,\text{teplota}} = 0,6$

5. Návrh a posouzení pochozí části mostovky

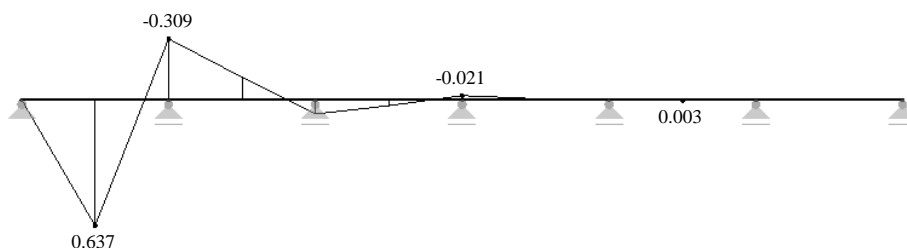
5.1. Návrh a posouzení dubové mostiny

Pochozí část mostovky je navržena z dřevěné dubové mostiny tl. 50 mm, třída řeziva D30, uložených kolmo na směr hlavních nosníků. Mostiny budou uloženy na profilech IPE 80, tyto podélníky jsou navrženy v osové vzdálenosti 0,7 m. Pro výpočet vnitřních sil a deformací je vytvořen rovinný model viz Obr. č.13.

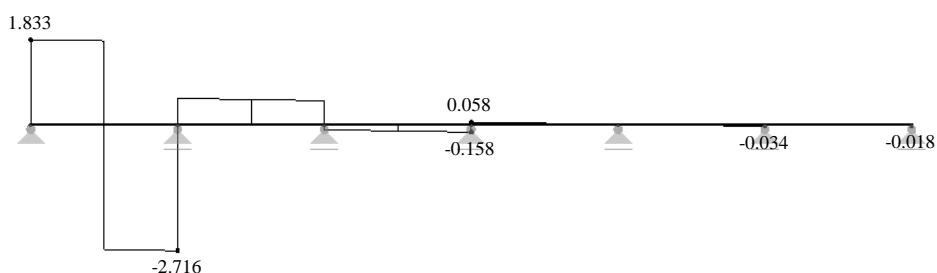


Obr. č.13 – výpočetní model

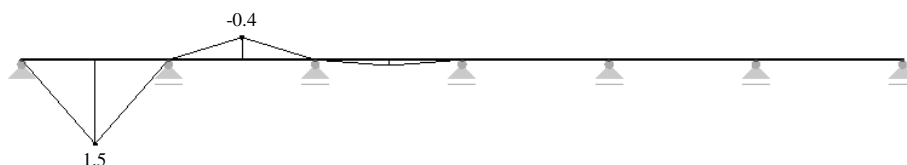
Pro posouzení je namodelováno zatížení vlastní tíhou a zatížení od chodců. Zatížení vyvolané chodci je uvažováno jako bodové zatížení o velikosti 3 kN umístěné v poloze vyvolující nejnepříznivější účinky (uprostřed krajního pole). Byl posouzen i stav, kdy zatížení je namodelováno jako rovnoměrné o velikosti 0,75 kN/m², rozhodující je ovšem bodové zatížení a z tohoto důvodu jsou níže zobrazeny výsledky pouze pro bodové zatížení.



Obr. č.14 – Ohybové momenty pro posouzení v MSÚ (kNm)



Obr. č.15 – Posouvající síly pro posouzení v MSÚ (kN)



Obr. č.16 – Průhyb pro posouzení v MSP (mm)

Posouzení

Materiály:

Třída pevnosti dřeva:	D30	=> <i>Listnaté dřevo</i>
Třída provozu:	Třída 3	=> $k_{def} = 2,0 - k_{mod} = 0,6$
char. pevnost v ohybu: $f_{m,k} = 30,00$ MPa		char. pevnost ve smyku: $f_{v,k} = 4,00$ MPa
Materiálový součinitel: dřevo:	$\gamma_M = 1,3$	
Návrhové hodnoty: dřevo:		$f_{m,d} = k_{mod} \cdot f_{m,k} / \gamma_M = 12,69$ MPa
		$f_{v,d} = k_{mod} \cdot f_{v,k} / \gamma_M = 1,69$ MPa
		$E_{0,mean} = 11$ GPa

Zatížení:

Posouvající síla: $V_{Ed} = 2,72$ kN

Ohybový moment: $M_{Ed} = 0,64$ kNm

Geometrie prkna

Výška: $h = 0,05$ m Šířka: $b = 0,30$ m Průřez. modul (mm^3): $W = 0,0001$ m³

Posouzení MSÚ:

napětí (MPa)

Ohyb $\sigma = M_{Ed} / W = 5,12$ MPa

$\sigma / f_{m,d} \leq 1,0$ **0,40** ≤ **1,0** => **Vyhovuje**

Smyk $t_{v,d} = 3 \cdot V_{Ed} / 2 \cdot b \cdot h = 0,41$ MPa

$t_{v,d} / f_{v,d} \leq 1,0$ **0,24** ≤ **1,0** => **Vyhovuje**

Posouzení MSP: účinná délka: $l = 0,700$ m

$w_{2,inst} = w_{inst,G} + w_{inst,Q} = 0,0015$ m $\leq l/300 = 0,0023$ m => **Vyhovuje**

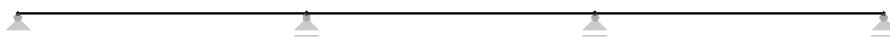
Konečný $w_{net,fin} = w_{inst,G} \cdot (1+k_{def}) + w_{inst,Q} \cdot (1+\psi_{2,Q} \cdot k_{def})$

průhyb: $w_{net,fin} = 0,0019$ m $\leq l/250 = 0,0028$ m => **Vyhovuje**

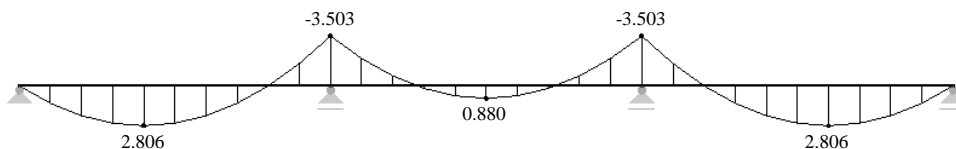
Mostina tl. 50 mm, řezivo třídy D30, vyhovuje v MSÚ i v MSP.

5. 2. Posouzení podélníků

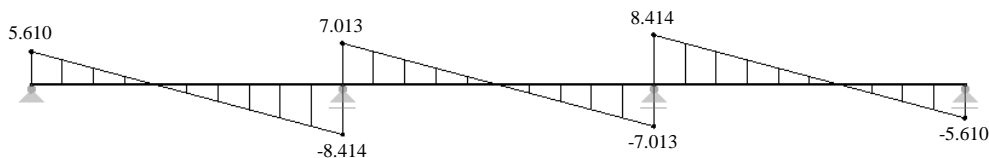
Dubová mostina je podepřena sedmi podélníky IPE 80 á 0,7 m, ocel S235. Tyto profily jsou uloženy na horní pásnice příčniců. Pro posouzení je vytvořen zjednodušený rovinný model viz Obr. č.17.



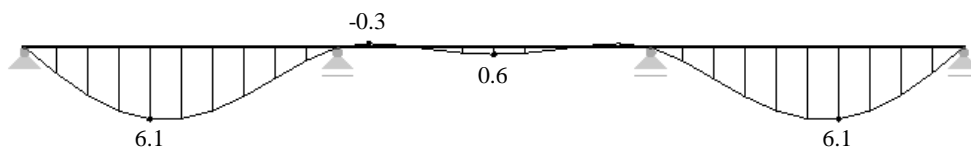
Obr. č.17 – výpočetní model



Obr. č.18 – Ohybové momenty pro posouzení v MSÚ (kNm)



Obr. č.19 – Posouvající síly pro posouzení v MSÚ (kN)



Obr. č.20 – Průhyb pro posouzení v MSP (mm)

Posouzení prvku na ohyb a smyk

Prvek: Podélník

$c_1 = 16,1$

Profil: IPE 80

$t_1 = 5,2$

Ocel: S235

$c_2 = 59,6$

$f_{yd} = 235$ MPa

$t_2 = 3,8$

Průřezové charakteristiky:

Třída průřezu: 1

$A_{vz} = 3,57E-04$ m²

$c_1/t_1 = 3,1 < 72 \cdot \epsilon = 9$

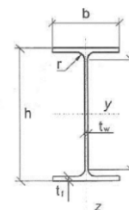
$W_{pl} = W_{pl,y} = 2,32E-05$ m³

$c_2/t_2 = 15,7 < 72 \cdot \epsilon = 72$

Namáhání:

$M_{ed} = 3,5$ kNm

$V_{ed} = 8,41$ kN



Únosnost v ohybu:

$$M_{c,Rd} = W \cdot f_y / \gamma_{m0} = 2,32E-05 \cdot 235000 / 1 = 5,46$$

Využití:

$$\frac{M_{ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{3,5}{5,46} = 0,64 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Únosnost ve smyku:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} = \frac{3,57 \cdot 10^{-4} \cdot 355000}{\sqrt{3}} = 48,49 \text{ kN}$$

Využití:

$$\frac{V_{ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{8,41}{48,49} = 0,17 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

$$w_{max} = 6,1 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{250} = \frac{2500}{250} = 10 \text{ mm}$$

Profil IPE 80, ocel S235 vyhovuje v MSÚ i v MSP.

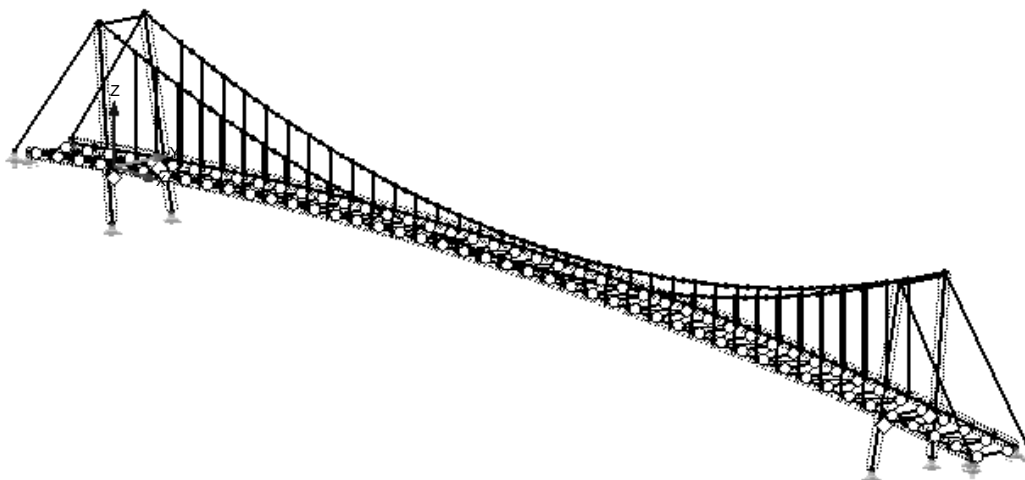
6. Výpočetní model nosné konstrukce visuté lávky

Pro posouzení nosné konstrukce lávky byl vytvořen 3D model konstrukce v programu Dlubal RFEM 5.11 (viz Obr. č.21).

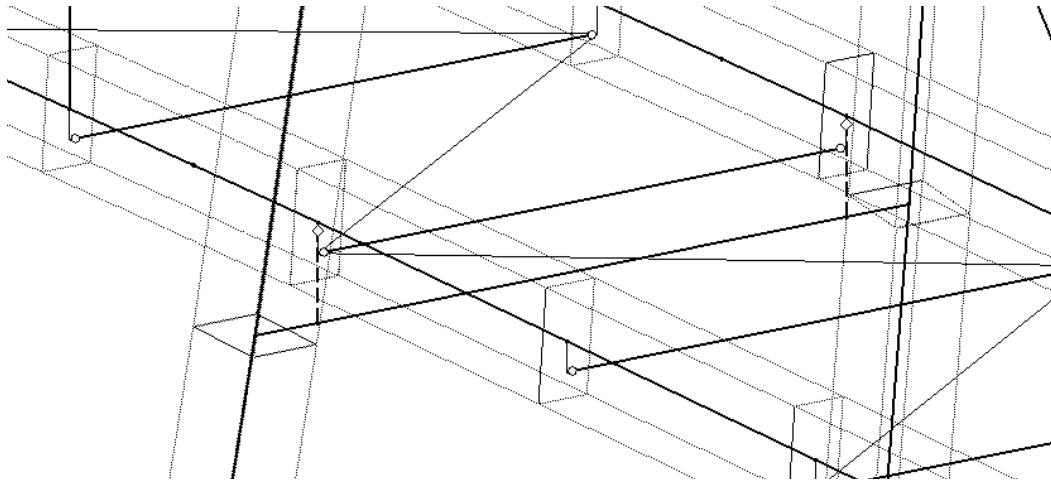
Velikosti průřezů byly nejprve převzaty z předběžného návrhu visuté lávky, který proběhl v rámci diplomového semináře (viz příloha č.1) na rovinném modelu konstrukce. Postupně došlo k úpravám průřezů tak, aby konstrukce byla vyhovující z hlediska mezního stavu použitelnosti i mezního stavu únosnosti i po zahrnutí předpětí a nadvýšení hlavních nosníků.

Uložení pylonů a kotvení visutých lan je modelováno pevným kloubem. Uložení hlavních nosníků je uskutečněno pomocí pevného ložiska, příčně posuvného ložiska a podélně posuvných ložisek uložených na příčnících pylonů. V místě pylonů je ložisko modelováno pomocí tuhého prutu s kloubem na konci (viz Obr. č.22).

Propojení pylonů je ve vrcholu i pod úrovní mostovky řešeno jako rámové. Mezi pylony a od pylonů ke kotevním blokům jsou napnuta visutá lana, která jsou namodelována jako lanové prvky s předpínací silou 950 kN (podrobněji viz kapitola 7 – Stanovení velikosti předpětí visutých lan, str. 24). Z visutých lan jsou spuštěny závěsy k hlavním nosníkům, ke kterým jsou kloubově uložena. Závěsy jsou rovněž modelovány jako lanové prvky. K hlavním nosníkům jsou kloubově připojeny příčninky, které mají definovanou excentricitu o velikosti 0,2 m, tzn. spodní hrana příčninků je zarovnána se spodní hranou hlavních nosníků. Hlavní nosníky jsou navrženy s nadvýšením, kde výškový rozdíl mezi hlavním nosníkem v místě pylonů a uprostřed rozpětí činí 2 m. Mostovka je opatřena ztužením, které bylo nadefinováno jako pruty přenášející pouze tah a tlak. Osa ztužení má excentricitu vůči ose hlavních nosníků velikost 0,105 m.



Obr. č.21 – Výpočetní model



Obr. č.22 – Detail uložení hlavních nosníků v místě pylonů

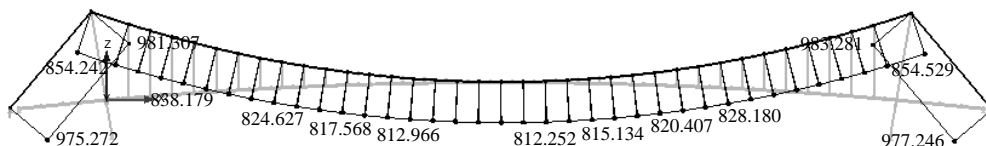
7. Stanovení velikosti předpětí visutých lan

V první řadě byl sestaven model bez nadvýšení hlavních nosníků a cílem bylo pomocí předpětí lan dosáhnout výškového rozdílu 2 m mezi středem rozpětí a místem uložení hlavních nosníků na pylony. Na tomto modelu byla stanovena potřebná předpínací síla příliš velká (až nereálné velikosti). Z tohoto důvodu byl model upraven a hlavní nosníky budou zhotoveny s nadvýšením a předpětí visutých lan proběhne z důvodu eliminace průhybů od veškerého stálého zatížení a tím zachování navrženého tvaru mostovky.

Velikost předpínací síly byla stanovena iterační metodou v několika krocích, přičemž jsem sledoval eliminaci deformací od stálého zatížení a zároveň splnění limitních průhybů od různých kombinací proměnného zatížení. Při změně průřezů některých prvků konstrukce byla opětovně stanovena velikost předpětí visutých lan a kontrola plnění požadavků na konstrukci proběhla znovu. Tento postup byl prováděn opětovně až do stanovení konečného modelu konstrukce.

Stanovení velikosti předpětí:

Skutečná velikost předpětí je určena z kombinace zatížení obsahující veškeré stálé zatížení a zatížení počátečním předpětím 930 kN.



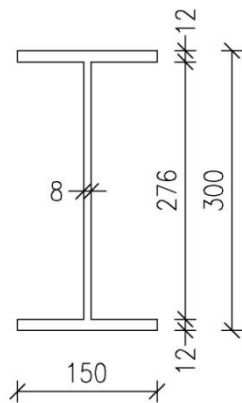
Obr. č.23 – Normálová síla ve visutém laně od stálého zatížení a počátečního předpětí (kN)

Do visutého lana bude vneseno předpětí o velikosti 950 kN.

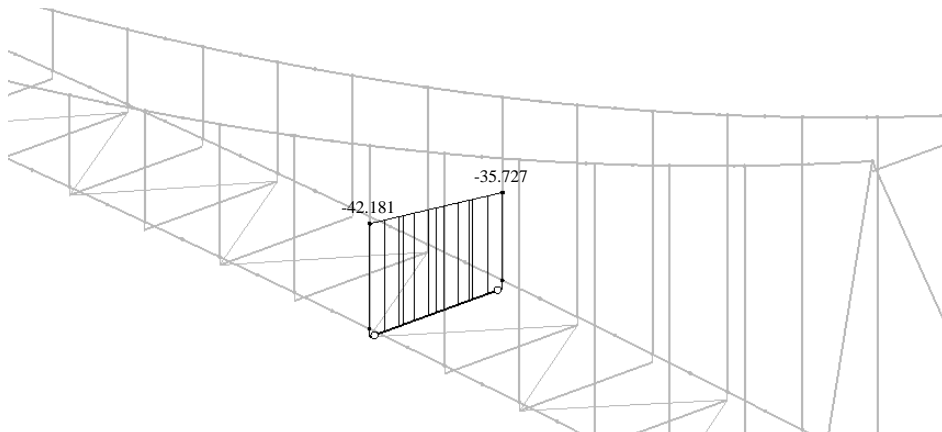
8. Posouzení konstrukce v MSÚ

8.1. Příčnický

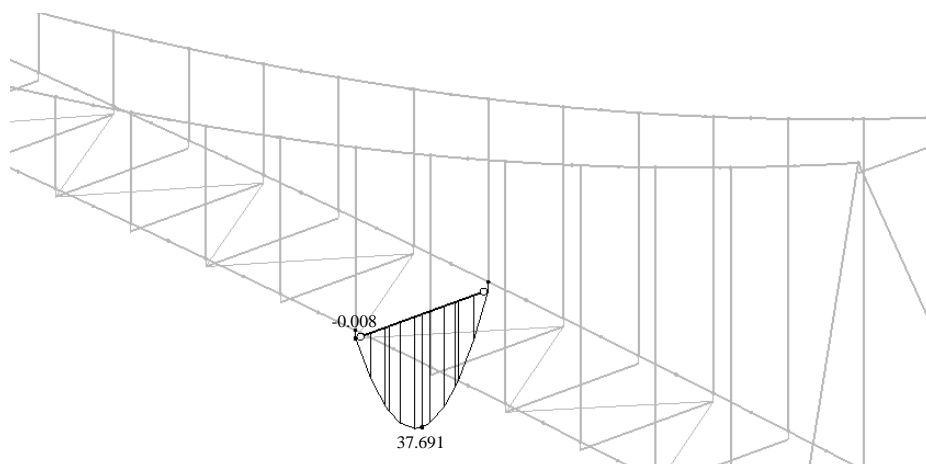
Příčnický jsou navrženy ze svařovaného I profilu z oceli S 355, rozměry viz Obr. č.24. Osová vzdálenost příčnicků je 2,5 m. Spodní hrana příčnicků je srovnaná se spodní hranou hlavních nosníků. Pro posouzení na vzpěrný tlak s ohybem je rozhodující kombinace zatížení zahrnující současné působení oteplení a zatížení od chodců umístěných přes celé střední pole lávky. Pro posouzení na smyk je rozhodující kombinace obsahující vítr a zatížení od chodců přes celé střední pole.



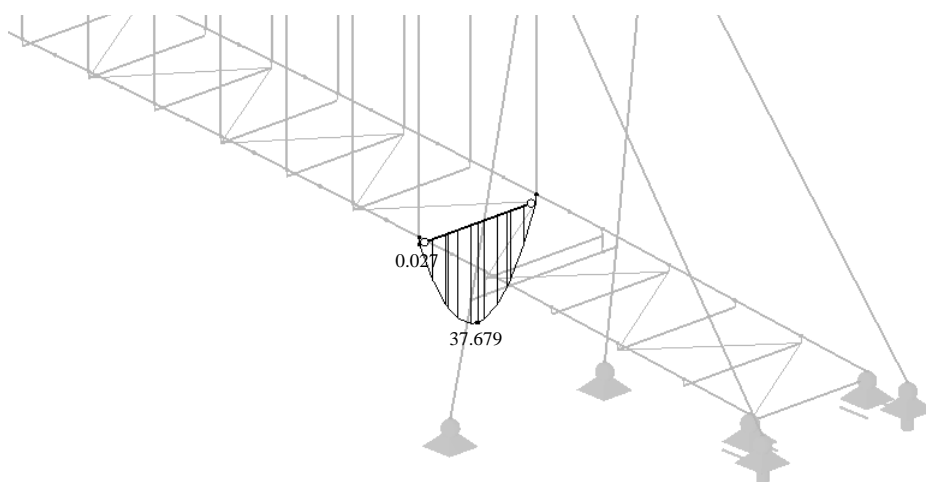
Obr. č.24 – Rozměry průřezu příčnický



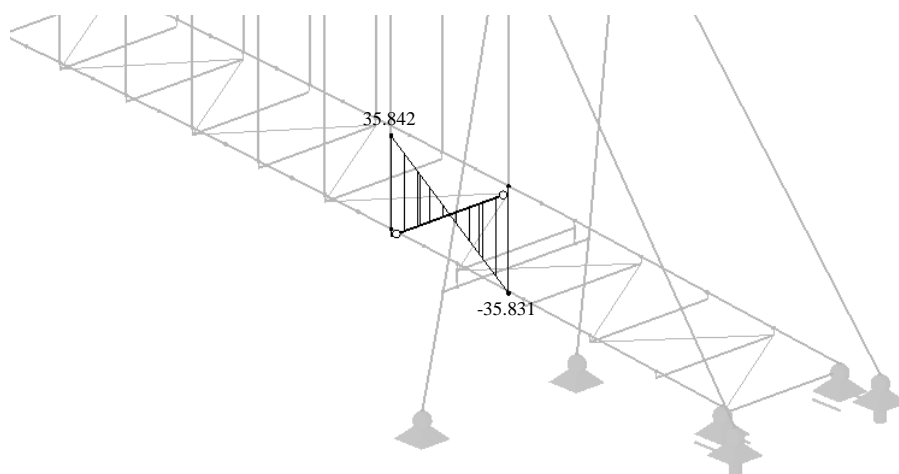
Obr. č.25 – Rozhodující vnitřní síly N_{ed} (kN)



Obr. č.26 – Ohybový moment M_{ed} (kNm) příslušející k rozhodující normálové síle.



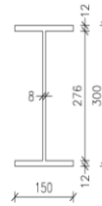
Obr. č.27 – Maximální ohybový moment $M_{ed,y}$ (kNm)



Obr. č.28 – Maximální posouvající síly $V_{ed,z}$ (kN)

Posouzení prvku na ohyb a smyk

Prvek: Příčnick
 Profil: I 300/150/6/12
 Ocel: S355
 $f_{yd} = 355$ MPa



$c_1 = 66,3$
 $t_1 = 12$
 $c_2 = 264,7$
 $t_2 = 8$

Průřezové charakteristiky:
 $A_{vz} = 1,66E-03$ m²
 $W_y = W_{pl,y} = 6,33E-04$ m³

Třída průřezu pásnice: 1
 $c_1/t_1 = 5,5 < 9 \cdot \epsilon = 7,29$

Namáhání:
 $M_{ed,y} = 37,7$ kNm
 $V_{ed} = 35,84$ kN

Třída průřezu stojina: 3
 $c_2/t_2 = 33,1 < 34,2$

Únosnost v ohybu:

$$M_{c,Rd,y} = W_y \cdot f_{yd} / \gamma_{m0} = 6,33E-04 \cdot 355000 / 1 = 224,60$$

Využití:

$$y: \frac{M_{ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{37,7}{224,60} = 0,17 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Únosnost ve smyku:

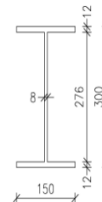
$$V_{c,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} = \frac{1,66 \cdot 10^{-3} \cdot 355000}{\sqrt{3}} = 339,41 \text{ kN}$$

Využití:

$$\frac{V_{ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{35,84}{339,41} = 0,11 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Posouzení prutu namáhaného kombinací ohybových momentů a osové tlakové síly

Prvek: Příčnick
 Profil: 300/150/8/12
 Ocel: S355
 $f_{yd} = 355$ MPa



$c_1 = 66,3$
 $t_1 = 12$
 $c_2 = 264,7$
 $t_2 = 8$

Průřezové charakteristiky:
 $W_y = W_{pl,y} = 6,71E-04$ m³
 $W_z = W_{el,z} = 9,01E-05$ m³
 $A = 5,81E-03$ m²
 $I_y = 8,87E-05$ m⁴
 $I_z = 6,76E-06$ m⁴
 $i_y = 1,24E-01$ m
 $i_z = 3,41E-02$ m

Třída průřezu pásnice: 1
 $c_1/t_1 = 5,5 < 9 \cdot \epsilon = 7,29$

Třída průřezu stojina: 3
 $c_2/t_2 = 33,1 < 34,2$

Vpěrné délky:

$L_{cr,y} = 4,2$ m
 $L_{cr,z} = 4,2$ m

Namáhání:

$M_{ed,y} = 37,7$ kNm
 $M_{ed,z} = 0,7$ kNm
 $N_{ed} = 42,2$ kN

Vybočení v rovině:

součinitel imperfekce:

$$\alpha = 0,34 \quad \text{křivka: } b$$

poměrná štíhlost:

$$\lambda_y = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{4,20}{1,24E-01} = 33,98$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{33,98}{76,40} = 0,445$$

součinitel vzpěrnosti:

$$\chi_y = \frac{1}{\phi \cdot \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0,908$$

kde:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \lambda^2] = 0,641$$

Vybočení z roviny:

součinitel imperfekce:

$$\alpha = 0,49 \quad \text{křivka: } c$$

poměrná štíhlost:

$$\lambda_z = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{4,20}{3,41E-02} = 123,17$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{123,17}{76,40} = 1,612$$

součinitel vzpěrnosti:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi \cdot \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0,281$$

kde:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \lambda^2] = 2,146$$

Součinitel klopení: Klopení je zabráněno

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = 1,0$$

Interakční součinitele:

$$k_{yy} = \min \left[C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right); C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \right] = 0,906$$

$$k_{zz} = \min \left[C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right); C_{my} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \right] = 1,006$$

$$k_{yz} = 0,603$$

$$k_{zy} = 0,543$$

$$M_{y,Rk} = W_y \cdot f_y = 238 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_z \cdot f_y = 32 \text{ kNm}$$

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 2062 \text{ kN}$$

Únosnost:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0 \quad 0,21 < 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

$\gamma_{M1} \quad \gamma_{M1} \quad \gamma_{M1}$

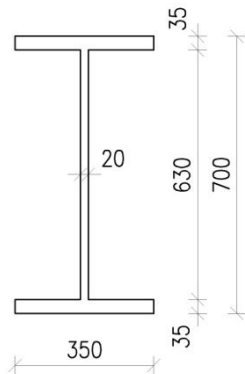
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0 \quad 0,21 < 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

$\gamma_{M1} \quad \gamma_{M1} \quad \gamma_{M1}$

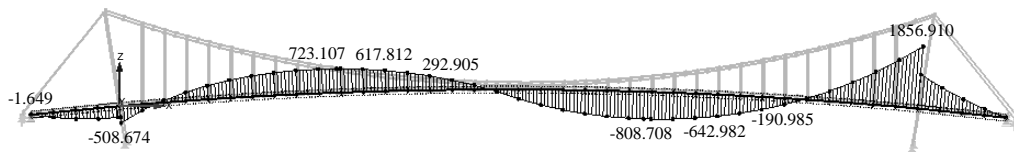
Profil I 300/150/6/12, ocel S355 vyhovuje v MSÚ.

8.2. Hlavní nosníky

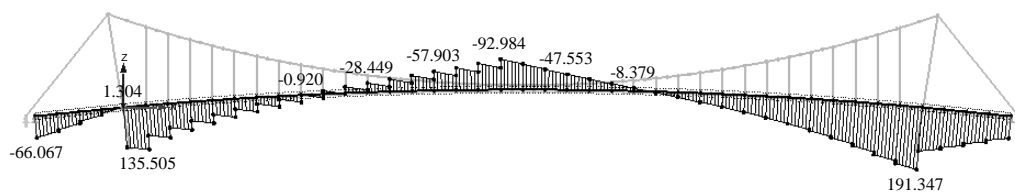
Hlavní nosníky jsou navrženy ze svařovaného I profilu z oceli S 355, rozměry viz Obr. č.29. Osová vzdálenost hlavních nosníků je 4,2 m. Pro posouzení na ohyb, smyk a normálové napětí s kroucením je rozhodující kombinace zatížení zahrnující současné působení oteplenění a zatížení od chodců umístěných přes polovinu rozpětí středního pole lávky. Pro posouzení na vzpěrný tlak je rozhodující kombinace obsahující zatížení od chodců přes polovinu šířky středního pole lávky a zatížení větrem.



Obr. č.29 – Rozměry průřezu hlavního nosníku



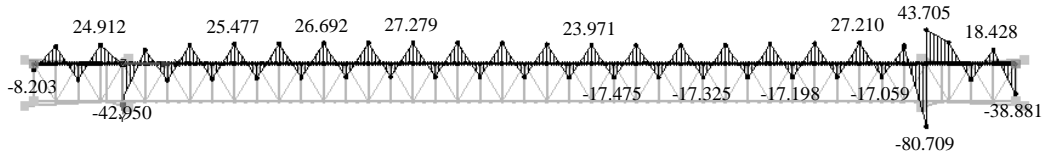
Obr. č.30 – Rozhodující vnitřní síly $M_{ed,y}$ (kNm)



Obr. č.31 – Rozhodující vnitřní síly V_{ed} (kN)



Obr. č.32 – Rozhodující vnitřní síly N_{ed} (kN)



Obr. č.33 – Rozhodující vnitřní síly $M_{ed,z}$ (kNm)

Posouzení prvku na ohyb a smyk

Prvek:	Hlavní nosník	$c_1 = 159$
Profil:	I 700/350/20/35	$t_1 = 35$
Ocel:	S355	$c_2 = 615,9$
	$f_{yd} = 355$ MPa	$t_2 = 20$
Průřezové charakteristiky:		Třída průřezu : 1
	$A_{vz} = 1,51E-02$ m ²	$c_1/t_1 = 4,5 < 9 \cdot \epsilon = 7,29$
	$W_y = W_{pl,y} = 1,01E-02$ m ³	$c_2/t_2 = 30,8 < 72 \cdot \epsilon = 58,32$
	$W_z = W_{pl,z} = 2,21E-03$ m ³	
Namáhání:	$M_{ed,y} = 1856,9$ kNm	
	$M_{ed,z} = 133,2$ kNm	
	$V_{ed} = 191,4$ kN	

Únosnost v ohybu:

$$M_{c,Rd,y} = W_y \cdot f_y / \gamma_{m0} = 1,01E-02 \cdot 355000 / 1 = 3596,43$$

$$M_{c,Rd,z} = W_z \cdot f_y / \gamma_{m0} = 2,21E-03 \cdot 355000 / 1 = 783,40$$

Využití:

$$y: \frac{M_{ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{1856,9}{3596,43} = 0,52 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

$$z: \frac{M_{ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{133,2}{783,40} = 0,17 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Únosnost ve smyku:

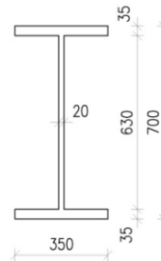
$$V_{c,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} = \frac{1,51 \cdot 10^{-2} \cdot 355000}{\sqrt{3}} = 3098,99 \text{ kN}$$

Využití:

$$\frac{V_{ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{191,4}{3098,99} = 0,06 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Posouzení vpěrné únosnosti tlačенého prvku

Prvek: Hlavní nosník
Profil: 700/350/20/35
Ocel: S355
 $f_{yd} = 355$ MPa



$c_1 = 159$
 $t_1 = 35$
 $c_2 = 615,9$
 $t_2 = 20$

Průřezové charakteristiky:

$A = 3,71E-02$ m²
 $I_y = 3,13E-03$ m⁴
 $I_z = 2,51E-04$ m⁴
 $i_y = 2,90E-01$ m
 $i_z = 8,22E-02$ m

Třída průřezu: 1
 $c_1/t_1 = 4,54 < 9 \cdot \epsilon = 7,29$
 $c_2/t_2 = 30,80 < 72 \cdot \epsilon = 58,32$

Vzpěrné délky:

$L_{cr,y} = 25,46$ m převzato z RF-STABILITY - Stabilitiní analýza
 $L_{cr,z} = 10,13$ m převzato z RF-STABILITY - Stabilitiní analýza

Namáhání:

$N_{ed} = 955,8$ kN

Vybočení v rovině:

součinitel imperfekce:

$\alpha = 0,34$ křivka: c

poměrná štíhlost:

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{25,46}{2,90E-01} = 87,67$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{87,67}{76,40} = 1,148$$

součinitel vzpěrnosti:

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0,507$$

kde:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \lambda^2] = 1,32$$

Vybočení z roviny:

součinitel imperfekce:

$\alpha = 0,49$ křivka: c

poměrná štíhlost:

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{10,13}{8,22E-02} = 123,24$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{123,24}{76,40} = 1,613$$

součinitel vzpěrnosti:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0,281$$

kde:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \lambda^2] = 2,147$$

$$\chi = \min(\chi_y; \chi_z) = 0,281$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{m1}} = \frac{0,281 \cdot 3,71E-2 \cdot 355\,000}{1,15} = 3213 \text{ kN}$$

Využití:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{955,8}{3213} = 0,30 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Posouzení prvku na normálová napětí od kombinace ohybových momentů a normálové síly

Prvek: Hlavní nosník
 Profil: I 700/350/20/35
 Ocel: S355

$$f_{yd} = 355 \text{ MPa}$$

Průřezové charakteristiky:

$$A = 3,71E-02 \text{ m}^2$$

$$I_y = 3,13E-03 \text{ m}^3$$

$$I_z = 2,51E-04 \text{ m}^3$$

$$z = 0,35 \text{ m}$$

$$y = 0,175 \text{ m}$$

Namáhání:

$$M_{ed,y} = 1856,9 \text{ kNm}$$

$$M_{ed,z} = -80,8 \text{ kNm}$$

$$N_{ed} = 30,7 \text{ kN}$$

Normálové napětí od N:

$$\sigma_{x,Ned} = N_{ed}/A = 827 \text{ kPa}$$

Normálové napětí od $M_{ed,y}$:

$$\sigma_{x,Med,y} = (M_{ed,y} \cdot z)/I_y = 207782 \text{ kPa}$$

Normálové napětí od $M_{ed,z}$:

$$\sigma_{x,Med,z} = (-M_{ed,z} \cdot y)/I_z = 56442 \text{ kPa}$$

Celkové normálové napětí:

$$\sigma_x = \sigma_{x,Ned} + \sigma_{x,Med,y} + \sigma_{x,Med,z} = 265,05 \text{ MPa}$$

Posouzení:

$$\sigma_x = 265,05 \text{ MPa} \leq f_{yd} = 355 \text{ MPa}$$

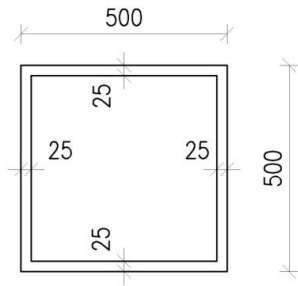
Využití:

$$\sigma_x/f_{yd} = 0,75 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

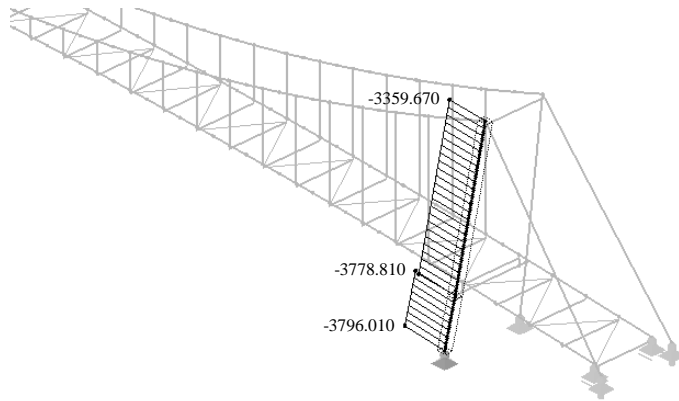
Profil I 700/350/20/35, ocel S355 vyhovuje v MSÚ.

8.3. Pylony

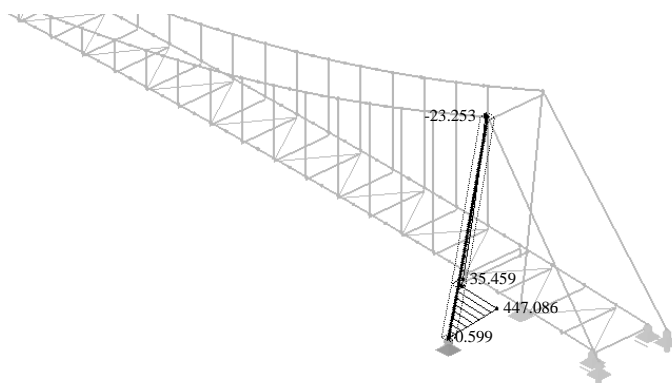
Pylony jsou navrženy ze svařovaného dutého čtvercového průřezu 500/500/25, viz Obr. č.34. Pylony jsou vzájemně propojeny ve vrcholu a v místě uložení hlavních nosníků. Pro posouzení je rozhodující kombinace zatížení zahrnující současné působení větru a zatížení od chodců ve středním poli lávky.



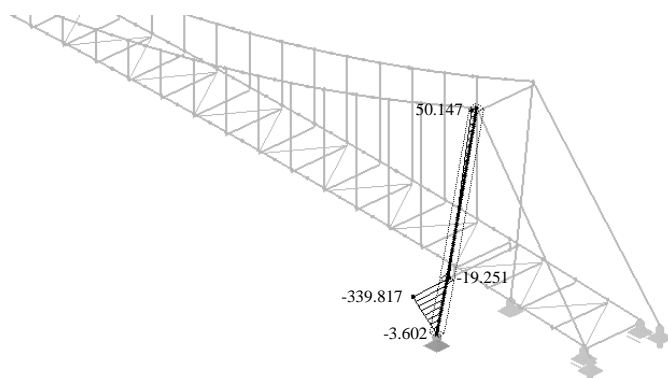
Obr. č.34 – Rozměry průřezu pylonu



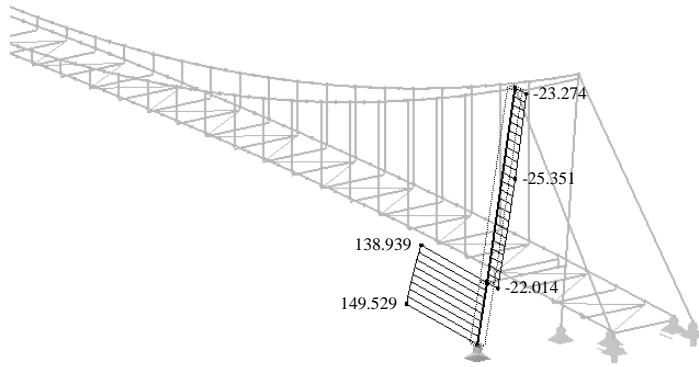
Obr. č.35 – Rozhodující vnitřní síly N_{ed} (kN)



Obr. č.36 – Ohybové momenty $M_{ed,y}$ (kNm) příslušející k rozhodujícím normálovým silám N_{ed}

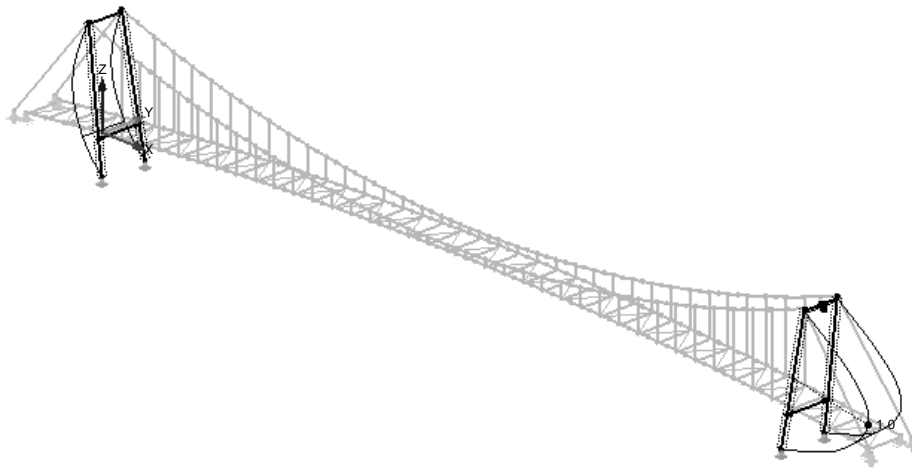


Obr. č.37 – Ohybové momenty $M_{ed,z}$ (kNm) příslušející k rozhodujícím normálovým silám N_{ed}

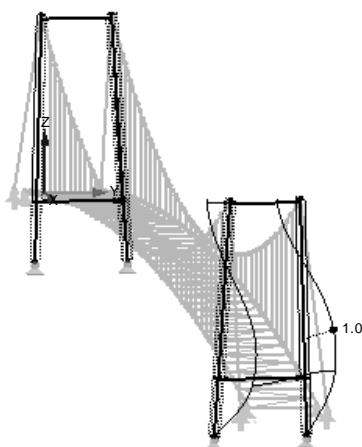


Obr. č.38 – Maximální posouvající síly $V_{ed,z}$ (kN)

Pro výpočet vzpěrných délek pylonu byla použita stabilitní analýza v programu Dlubal RFEM, RF-STABILITY. Rozhodující tvary vybočení pro výpočet vzpěrných délek jsou uvedeny na Obr. č.39 a Obr. č.40.



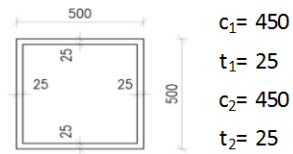
Obr. č.39 – Rozhodující tvar vybočení pro $\alpha_{crit,y} = 7,89$



Obr. č.40 – Rozhodující tvar vybočení pro $\alpha_{crit,z} = 15,81$

Posouzení prutu namáhaného kombinací ohybových momentů a osové tlakové síly

Prvek: Pylon
 Profil: 500/500/25
 Ocel: S355
 $f_{yd} = 355$ MPa



Průřezové charakteristiky:

$W_y = W_{pl,y} =$	8,47E-03	m ³			
$W_z = W_{pl,z} =$	8,47E-03	m ³			
A =	4,75E-02	m ²	třída průřezu: 1		
$I_y =$	1,79E-03	m ⁴	$c_1/t_1 =$	18,00	< 28,2
$I_z =$	1,79E-03	m ⁴	$c_2/t_2 =$	18,00	< 28,2
$i_y =$	1,94E-01	m			
$i_z =$	1,94E-01	m			

Vpěrné délky:

$\alpha_{crit,y} =$	7,89	převzato z RF-STABILITY - Stabilitní analýza
$\alpha_{crit,z} =$	15,81	převzato z RF-STABILITY - Stabilitní analýza
$L_{cr,y} = \pi \sqrt{\frac{EI}{N_{cr}}}$	kde $N_{cr} = \alpha_{cr} \cdot N_{Ec}$	$L_{cr,y} = 11,159$ m
$L_{cr,z} = \pi \sqrt{\frac{EI}{N_{cr}}}$	kde $N_{cr} = \alpha_{cr} \cdot N_{Ec}$	$L_{cr,z} = 7,88$ m

Namáhání:

$M_{ed,y} =$	447,1	kNm
$M_{ed,z} =$	339,8	kNm
$N_{ed} =$	3778,8	kN

Vybočení v rovině pylonu:

součinitel imperfekce:

$\alpha = 0,49$ křivka: c

poměrná štíhlost:

$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i} = \frac{11,16}{1,94E-01} = 57,46$

$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$

$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{57,46}{76,40} = 0,752$

součinitel vzpěrnosti:

$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0,692$

kde:

$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \lambda^2] = 0,918$

Vybočení z roviny pylonu:

součinitel imperfekce:

$\alpha = 0,49$ křivka: c

poměrná štíhlost:

$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i} = \frac{7,88}{1,94E-01} = 40,59$

$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$

$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{40,59}{76,40} = 0,531$

součinitel vzpěrnosti:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0,825$$

kde:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,722$$

Součinitel klopení: Tento průřez neklopí

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = 1,0$$

Interakční součinitele:

$$k_{yy} = \min \left[C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right); C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \right] = 1,070$$

$$k_{zz} = \min \left[C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right); C_{my} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \right] = 1,030$$

$$k_{yz} = 0,618$$

$$k_{zy} = 0,642$$

$$M_{y,Rk} = W_y \cdot f_y = 3006 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_z \cdot f_y = 3006 \text{ kNm}$$

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 16863 \text{ kN}$$

Únosnost:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad 0,61 < 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

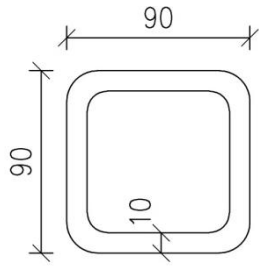
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad 0,56 < 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Z důvodu zanedbatelné velikosti posouvajících sil již není potřeba provést posouzení na smykovou únosnost.

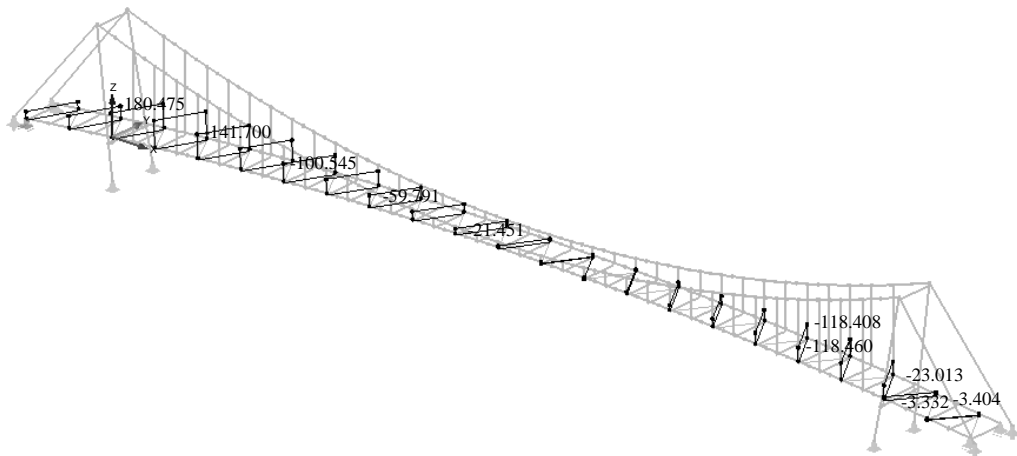
Profil 500/500/25, ocel S355 vyhovuje v MSÚ.

8.4. Podmostková ztužidla

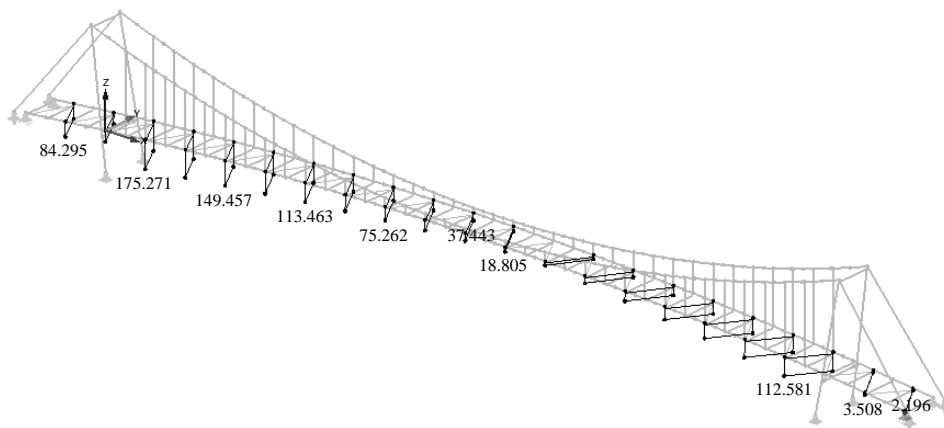
Podmostková ztužidla jsou navržena z profilu HTR 90/90/10, ocel S355, viz Obr. č.41. Těžiště ztužení je modelováno s excentricitou 0,105 m a jsou určena pouze pro přenos tahových a tlakových sil. Pro posouzení je rozhodující kombinace zatížení zahrnující současné působení větru a zatížení od chodců ve středním poli lávky.



Obr. č.41 – Rozměry průřezu ztužidel



Obr. č.42 – Rozhodující tlakové normálové síly N_{ed} (kN)



Obr. č.43 – Rozhodující tahové normálové síly N_{ed} (kN)

Posouzení prvku na tah

Prvek: Ztužení
 Profil: HTR 90/90/10
 Ocel: S355
 $f_{yd} = 355 \text{ MPa}$

Průřezové charakteristiky:

$A = 2,72E-03 \text{ m}^2$

Namáhání:

$N_{ed} = 175,3 \text{ kN}$

Únosnost v tahu:

$N_{t,Rd} = A \cdot f_{yd}$

$N_{t,Rd} = 2,72E-03 \cdot 355000 = 965,60 \text{ kN}$

Využití:

$\frac{N_{ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{175,3}{965,60} = 0,18 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$

Posouzení vpěrné únosnosti tlačенého prvku

Prvek: Ztužení
 Profil: HTR 90/90/10
 Ocel: S355
 $f_{yd} = 355 \text{ MPa}$
 $c = 60$
 $t = 10$

Průřezové charakteristiky:

$A = 3,11E-03 \text{ m}^3$
 $I_y = 3,31E-06 \text{ m}^4$
 $I_z = 3,31E-06 \text{ m}^4$
 $i_y = 3,26E-02 \text{ m}$
 $i_z = 3,26E-02 \text{ m}$

Třída průřezu: 1

$c/t = 6,00 < 33\epsilon = 26,86$

Vzpěrné délky:

$L_{cr,y} = 4,89 \text{ m}$

$L_{cr,z} = 4,89 \text{ m}$

Namáhání:

$N_{ed} = 180,5 \text{ kN}$

Vybočení v rovině:

součinitel imperfekce:

$\alpha = 0,49$ křivka: c

poměrná štíhlost:

$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{4,89}{3,26E-02} = 150,03$

$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$

$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{150,03}{76,40} = 1,964$

součinitel vzpěrnosti:

$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0,202$

kde:

$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 2,8604$

Vybočení z roviny:

součinitel imperfekce:

$$\alpha = 0,49 \quad \text{křivka: } c$$

poměrná štíhlost:

$$\lambda_z = \frac{l_{eff}}{i} = \frac{4,89}{3,26E-02} = 150,03$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{150,03}{76,40} = 1,964$$

součinitel vzpěrnosti:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0,202$$

kde:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 2,860$$

$$\chi = \min(\chi_y; \chi_z) = 0,202$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{m1}} = \frac{0,202 \cdot 3,11E-3 \cdot 355 \cdot 000}{1,15} = 194 \quad \text{kN}$$

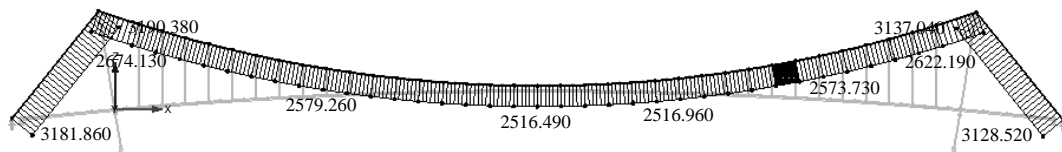
Využití:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{180,5}{194} = 0,93 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Profil HTR 90/90/10, ocel S355 vyhovuje v MSÚ.

8.5. Visuté lano

Visutá lana jsou navržena z lan systému VSL Ø80 mm (1 kabel z 22 lan, d=12,5 mm). Do těchto lan bude vneseno předpětí o velikosti 950 kN. Pro posouzení je rozhodující kombinace zatížení zahrnující současné působení oteplení a zatížení od chodců ve středním poli lávky.



Obr. č.44 – Rozhodující vnitřní síly N_{ed} (kN)

Unit	Strands numbers	Steel area		Breaking load			Corrugated steel duct ¹⁾ (recommended)		Corrugated plastic duct VSL PT-PLUS [®]		Steel pipes	
		A _p acc. to prEN		ASTM	Y1860S7 (prEN)		Grade 270 (ASTM)	β _i / β _e	e	β _i / β _e	e	Ø ext x t
		d=12.5 mm A _p =93 mm ²	d=12.9 mm A _p =100 mm ²	d=12.7 mm A _p =100 mm ²	d=12.5 mm A _p =93 mm ²	d=12.9 mm A _p =100 mm ²	d=12.7 mm A _p =98.7 mm ²					
		[mm ²]	[mm ²]	[mm ²]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
5-1	1	93	100	98.7	173	186	183.7	20/25	3	22/25	6	25.0 x 2.0
5-2	2	186	200	197	346	372	367	25/40	8	76/25 ²⁾	-	31.8 x 2.0/2.5/3.0
5-3	3	279	300	296	519	558	551	25/40	6	76/25 ²⁾	-	33.7 x 2.0/2.5/3.0
5-4	4	372	400	395	692	744	735	40/45 ¹⁾	7	76/25 ²⁾	-	42.4 x 2.0/2.5/3.0
5-7	5	465	500	494	865	930	919	45/50	8	58/63	14	60.3 x 2.0/2.5/3.0
5-7	6	558	600	592	1038	1116	1102	45/50	6	58/63	12	60.3 x 2.0/2.5/3.0
5-7	7	651	700	691	1211	1302	1286	50/57	7	58/63	11	60.3 x 2.0/2.5/3.0
5-12	8	744	800	790	1384	1488	1470	55/62	9	58/63	10	70.0 x 2.0/2.5/3.0
5-12	9	837	900	888	1557	1674	1653	55/62	8	58/63	9	70.0 x 2.0/2.5/3.0
5-12	10	930	1000	987	1730	1860	1837	60/67	10	58/63	9	70.0 x 2.0/2.5/3.0
5-12	11	1023	1100	1086	1903	2046	2021	60/67	9	58/63	8	70.0 x 2.0/2.5/3.0
5-12	12	1116	1200	1184	2076	2232	2204	60/67	8	58/63	7	70.0 x 2.0/2.5/3.0
5-15	13	1209	1300	1283	2249	2418	2388	65/72	9	76/81	14	82.5 x 2.0/2.5/3.0
5-15	14	1302	1400	1382	2422	2604	2572	65/72	8	76/81	13	82.5 x 2.0/2.5/3.0
5-15	15	1395	1500	1481	2595	2790	2756	70/77	9	76/81	12	82.5 x 2.0/2.5/3.0
5-19	16	1488	1600	1579	2768	2976	2939	70/77	9	76/81	12	88.9 x 2.5/3.0/3.5
5-19	17	1581	1700	1678	2941	3162	3123	75/82	11	76/81	11	88.9 x 2.5/3.0/3.5
5-19	18	1674	1800	1777	3114	3348	3307	75/82	10	76/81	10	88.9 x 2.5/3.0/3.5
5-19	19	1767	1900	1875	3287	3534	3490	75/82	9	76/81	9	88.9 x 2.5/3.0/3.5
5-22	20	1860	2000	1974	3460	3720	3674	80/87	10	100/106	20	88.9 x 2.5/3.0/3.5
5-22	21	1953	2100	2073	3633	3906	3858	80/87	9	100/106	19	88.9 x 2.5/3.0/3.5
5-22	22	2046	2200	2171	3806	4092	4041	80/87	8	100/106	18	88.9 x 2.5/3.0/3.5
5-27	23	2139	2300	2270	3979	4278	4225	85/92	12	100/106	19	101.6 x 3.0/4.0/5.0
5-27	24	2232	2400	2369	4152	4464	4409	85/92	11	100/106	18	101.6 x 3.0/4.0/5.0
5-27	25	2325	2500	2468	4325	4650	4593	90/97	14	100/106	19	101.6 x 3.0/4.0/5.0
5-27	26	2418	2600	2566	4498	4836	4776	90/97	13	100/106	18	101.6 x 3.0/4.0/5.0
5-27	27	2511	2700	2665	4671	5022	4960	95/102	15	100/106	17	101.6 x 3.0/4.0/5.0
5-31	28	2604	2800	2764	4844	5208	5144	95/102	14	100/106	16	108.0 x 3.0/4.0/5.0
5-31	29	2697	2900	2862	5017	5394	5327	95/102	13	100/106	15	108.0 x 3.0/4.0/5.0
5-31	30	2790	3000	2961	5190	5580	5511	95/102	12	100/106	14	108.0 x 3.0/4.0/5.0
5-31	31	2883	3100	3060	5363	5766	5695	95/102	11	100/106	13	108.0 x 3.0/4.0/5.0
5-37	32	2976	3200	3158	5536	5952	5878	100/107	13	115/121	20	114.3 x 3.0/4.0/5.0
5-37	33	3069	3300	3257	5709	6138	6062	100/107	12	115/121	19	114.3 x 3.0/4.0/5.0
5-37	34	3162	3400	3356	5882	6324	6246	100/107	12	115/121	19	114.3 x 3.0/4.0/5.0
5-37	35	3255	3500	3455	6055	6510	6430	110/117	17	115/121	19	114.3 x 3.0/4.0/5.0
5-37	36	3348	3600	3553	6228	6696	6613	110/117	17	115/121	19	114.3 x 3.0/4.0/5.0
5-37	37	3441	3700	3652	6401	6882	6797	110/117	16	115/121	18	114.3 x 3.0/4.0/5.0
5-43	43	3939	4300	4244	7439	7998	7899	120/127	18	130/136	23	127.0 x 3.0/4.0/5.0
5-55	55	5115	5500	5429	9515	10230	10104	130/137	17	130/136	17	139.7 x 3.0/4.0/5.0

Obr. č.45 – Únosnosti lan dle výrobce

Posouzení

$N_{Rd} = 3\,806\text{ kN} > N_{Ed} = 3\,181,9\text{ kN}$

Visuté lano VSL Ø 80 mm (22 lan, d=12,5 mm) vyhovuje v MSÚ.

8. 6. Závěsy

Závěsy jsou navrženy z lan systému Macalloy Ø 22 mm. Závěsy budou kloubově připojeny k hlavnímu nosníku. Pro posouzení je rozhodující kombinace zatížení zahrnující současné působení ochlazení a zatížení od chodců přes polovinu středního pole.



Obr. č.46 – Rozhodující vnitřní síly N_{ed} (kN)

Tabulka 5: Maximální zatížení lanového systému Macalloy

Průměr lana	mm	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	19	22	26
Jednoprámené vlnuté lano 1 x 19	kN	7,1	12,6	19,6	28,2	34,8	45,5	71,1	102,0	139,0	182,0	212,0	285,0	398,0
Kompaktní pramen	kN		17,4	23,9	34,8	48,1	60,3	95,0	141,2	189,2	251,0	313,7		
Šestipramenné lano s drátěnou duší	kN	5,0	8,9	13,9	20,0	27,3	35,6	55,6	80,0	109,0	143,1			

Obr. č.47 – Únosnosti lan dle výrobce

Posouzení

$$N_{Rd} = 285 \text{ kN} > N_{ed} = 51,3 \text{ kN}$$

Závěsy Macalloy $\varnothing 22$ mm vyhovuje v MSÚ. Rozhodující pro návrh závěsu je příspěvek k tuhosti konstrukce a tím omezení deformací.

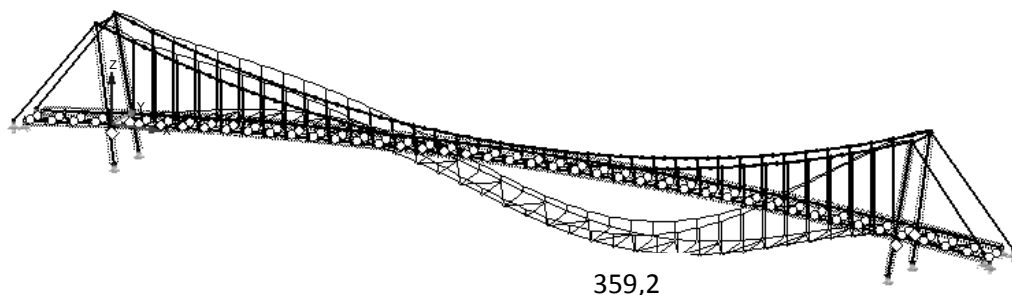
9. Posouzení konstrukce v MSP

V mezním stavu použitelnosti bude konstrukce posouzena z hlediska maximálních dovolených deformací, konkrétně se jedná o deformace hlavních nosníků a pylonů. Maximální deformace jsou sledovány na charakteristických kombinacích zatěžovacích stavů, tzn. $\gamma_G = 1,00$ a $\gamma_Q = 1,00$. Dále bude provedena dynamická analýza konstrukce a případně budou navržena protipatření proti nežádoucím vibracím.

9.1. Deformace hlavních nosníků

Posouzení svislých deformací:

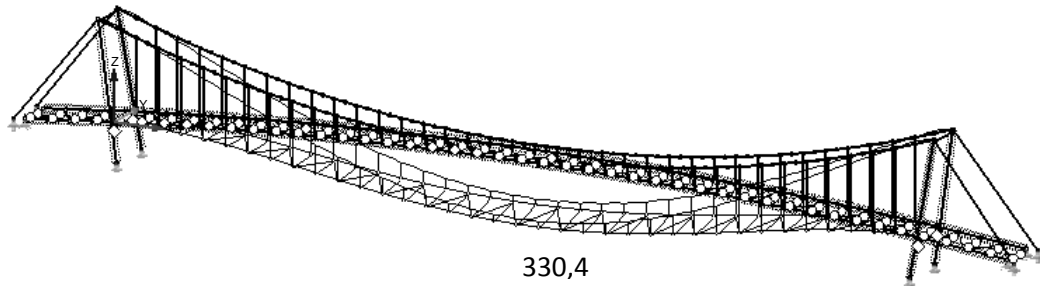
Rozhodující pro posouzení svislé deformace hlavních nosníků je kombinace zatěžovacích stavů obsahující zatížení chodce přes polovinu středního pole lávky a zatížení oteplením konstrukce. Průhyby od zmíněné kombinace zatížení lze vyčíst z Obr. č.48.



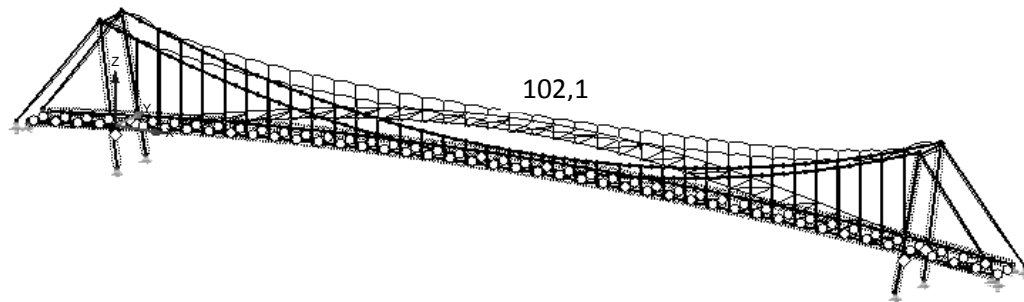
Obr. č.48 –Maximální svislý průhyb w (mm), KZS – oteplení + chodci přes polovinu středního pole (charakteristická kombinace).

$$w_{\max} = 359,2 \text{ mm} \leq w_{\text{lim}} = \frac{L}{250} = \frac{90\,000}{250} = 360 \text{ mm}$$

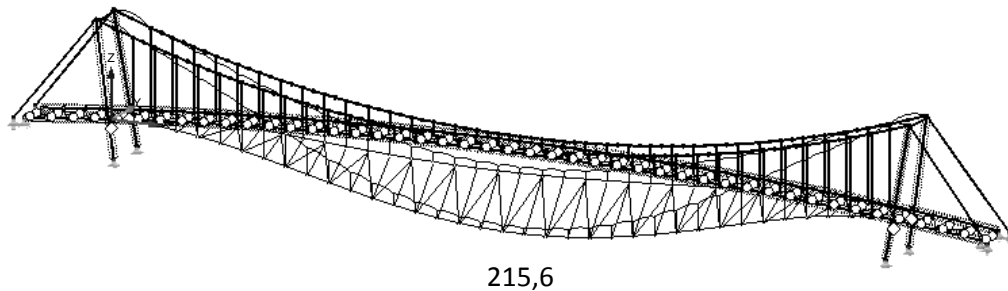
Svislý průhyb od jiných kombinací zatěžovacích stavů vyvolávající významnější deformace:



Obr. č.49 –Svislý průhyb w (mm), KZS – vítr + chodci ve středním poli lávky (charakteristická kombinace).



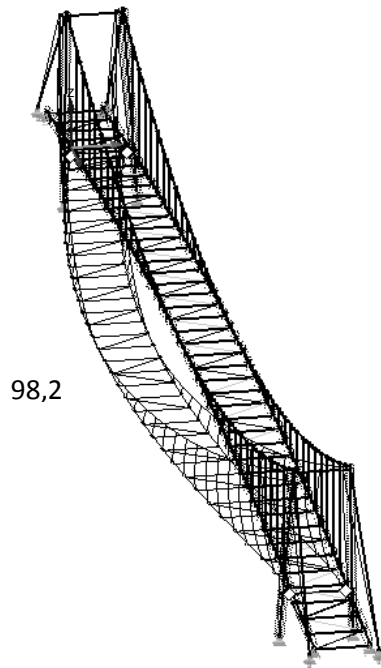
Obr. č.50 –Svislý průhyb w (mm), KZS – ochlazení (charakteristická kombinace).



Obr. č.51 –Svislý průhyb w (mm), KZS – vítr + chodci přes polovinu šířky mostovky ve středním poli lávky (charakteristická kombinace).

Posouzení vodorovných deformací:

Rozhodující pro posouzení vodorovné deformace hlavních nosníků je kombinace zatěžovacích stavů obsahující zatížení chodci přes polovinu středního pole lávky a zatížení větrem. Průhyby od zmíněné kombinace zatížení lze vyčíst z Obr. č.52.



Obr. č.52. – Vodorovný průhyb u (mm), KZS - vítr + chodci přes polovinu středního pole (charakteristická kombinace).

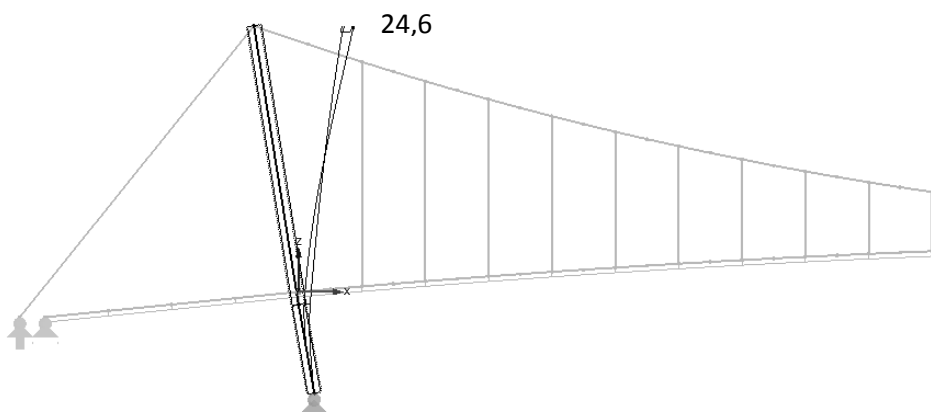
$$u_{\max} = 98,2 \text{ mm} \leq u_{\text{lim}} = \frac{L}{250} = \frac{90\,000}{250} = 360 \text{ mm}$$

Hlavní nosník I 700/350/20/35, ocel S355 vyhovuje v MSP.

9. 2. Deformace pylonů

Posouzení deformací v podélném směru lávky:

Rozhodující pro posouzení deformací pylonu v tomto směru je kombinace zatěžovacích stavů obsahující zatížení chodci přes celé střední pole lávky a zatížení větrem. Průhyby od zmíněné kombinace zatížení lze vyčíst z Obr. č.53.

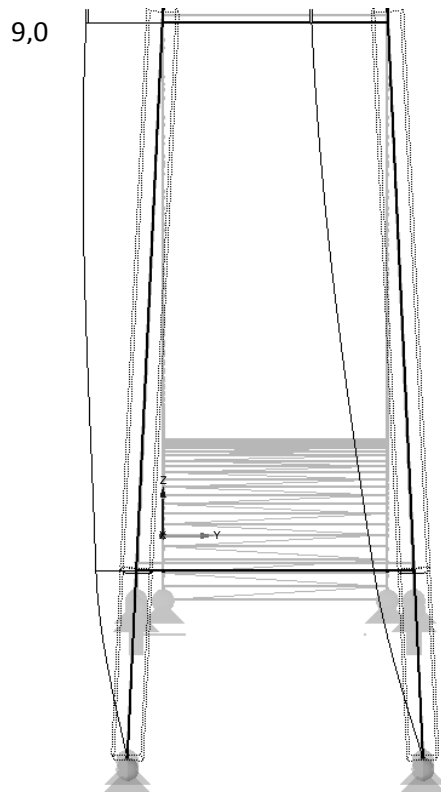


Obr. č.53. – Deformace v podélném směru (mm), KZS - vítr + chodci ve středním poli lávky (charakteristická kombinace).

$$y_{\max} = 24,6 \text{ mm} \leq y_{\text{lim}} = \frac{h}{500} = \frac{13\,250}{500} = 26,5 \text{ mm}$$

Posouzení deformací v příčném směru lávky:

Rozhodující pro posouzení deformací pylonu v tomto směru je kombinace zatěžovacích stavů obsahující zatížení chodci přes celé střední pole lávky a zatížení větrem. Průhyby od zmíněné kombinace zatížení lze vyčíst z Obr. č.54.



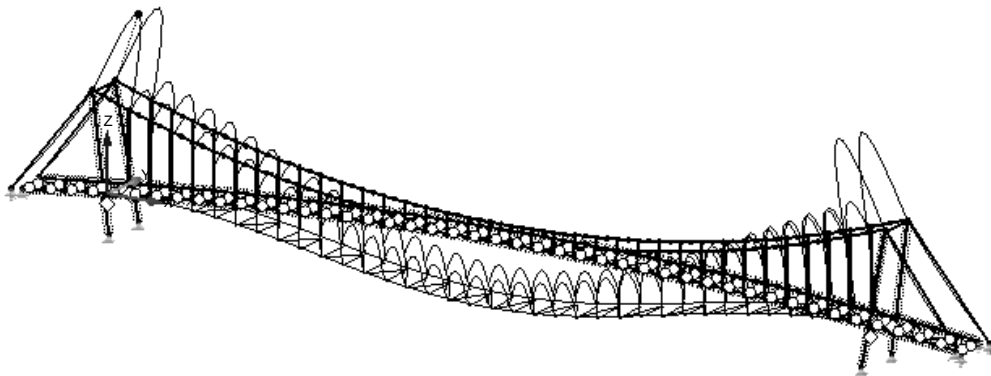
Obr. č.54 – Deformace v příčném směru (mm), KZS - vítr + chodci ve středním poli lávky (charakteristická kombinace).

$$u_{\max} = 9,0 \text{ mm} \leq u_{\text{lim}} = \frac{h}{500} = \frac{13\,250}{500} = 26,5 \text{ mm}$$

Pylon 500/500/25, ocel S355 vyhovuje v MSP.

9.3. Posouzení dynamické odezvy konstrukce

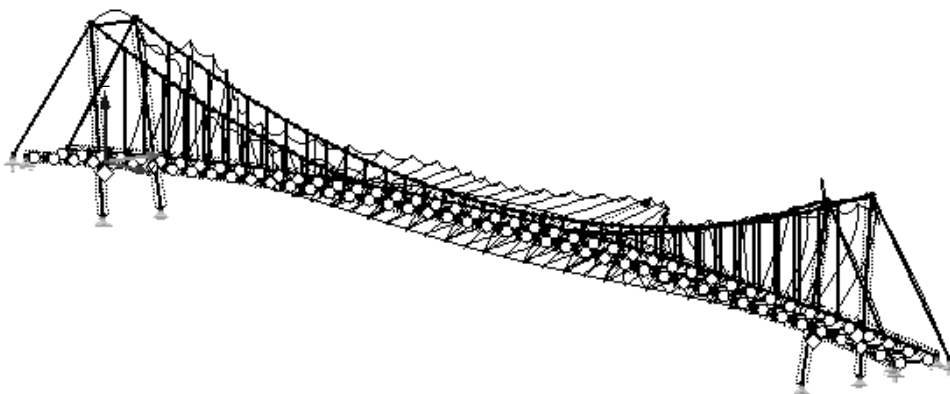
Při návrhu lávky pro chodce je důležitý požadavek na komfort. Člověk může cítit i velice malé vibrace, zejména reaguje na zryhlení, proto kritéria hodnocení vibrací mostů pro pěší vycházející z hodnocení komfortu pohybujících se osob se při posuzování mezních stavů použitelnosti ukazují jako velice přísná. Lidská chůze (běh) má frekvenci mezi 1,7 – 3,5 Hz a ve většině případů je tato frekvence blízká vlastní frekvenci konstrukce lávky podobného konstrukčního typu, z tohoto důvodu je nutné sledovat dynamickou odezvu. Opatření proti nadměrným vibracím lávky bude provedeno, pokud vlastní frekvence lávky pro svislé kmitání bude menší než 5 Hz nebo menší než 2,5 Hz pro vodorovné či torzní kmitání. Níže jsou zobrazeny všechny důležité vlastní tvary.



Obr. č.55 – 1. Vlastní tvar, svislý, $f = 0,485$ Hz

$f_1 = 0,485$ Hz < 5 Hz → Bude nutné provést protiopatření v podobě TMD tlumičů vibrací.

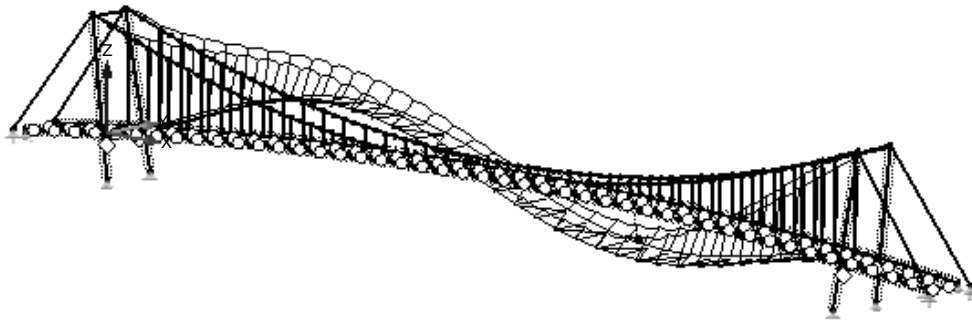
Obr. 11.3b – 2. Vlastní tvar, vodorovný/torzní, $f = 0,576$ Hz



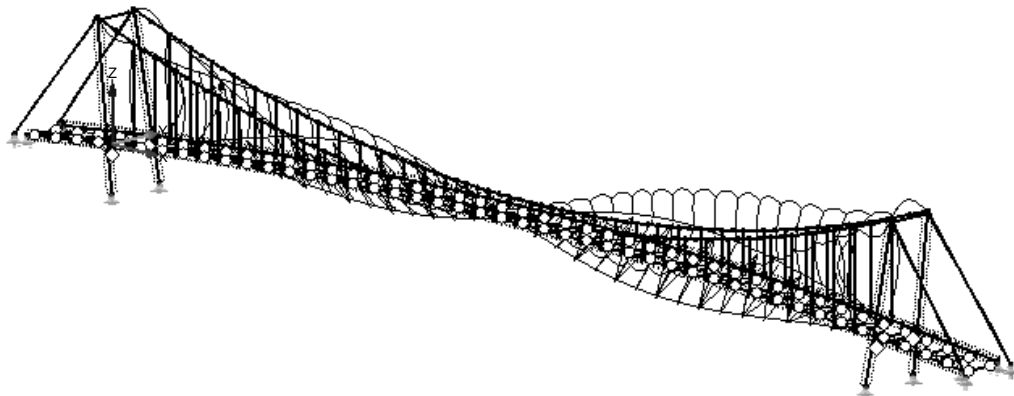
Obr. č.56 – 2. Vlastní tvar, vodorovný/torzní, $f = 0,590$ Hz

$f_2 = 0,590$ Hz < 2,5 Hz → Bude nutné provést protiopatření v podobě TMD tlumičů vibrací.

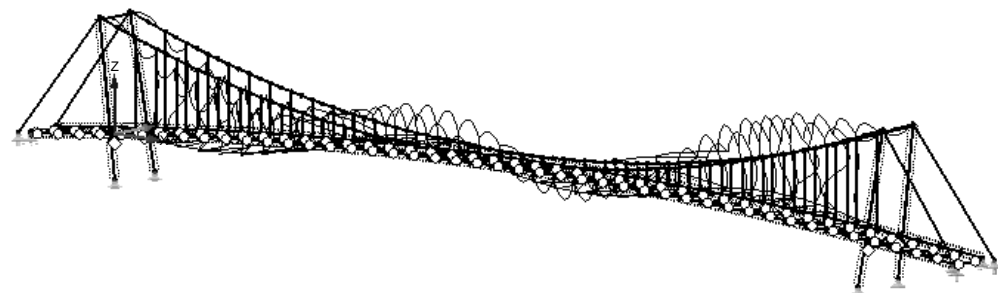
Další významné vlastní tvary:



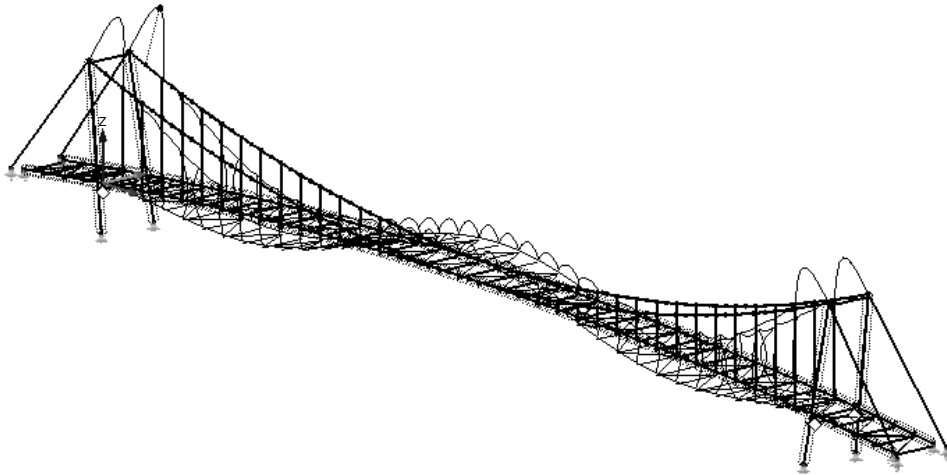
Obr. č.57 – 3. Vlastní tvar, svislý, $f = 0,743$ Hz



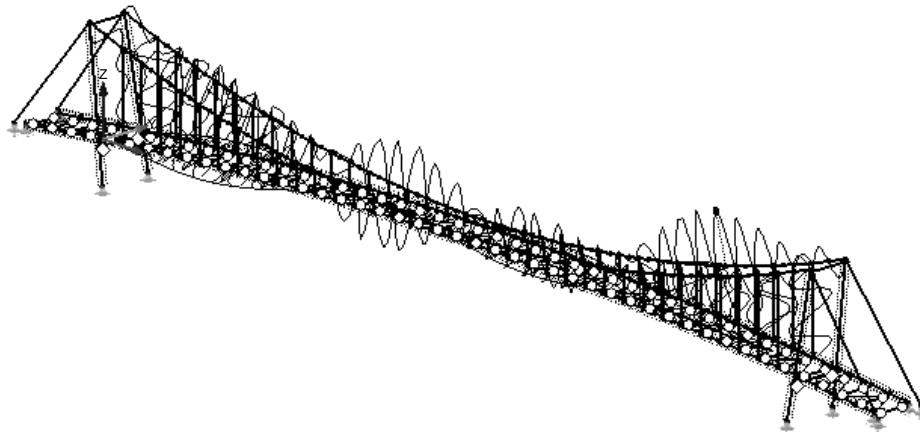
Obr. č.58 – 4. Vlastní tvar, torzní, $f = 0,972$ Hz



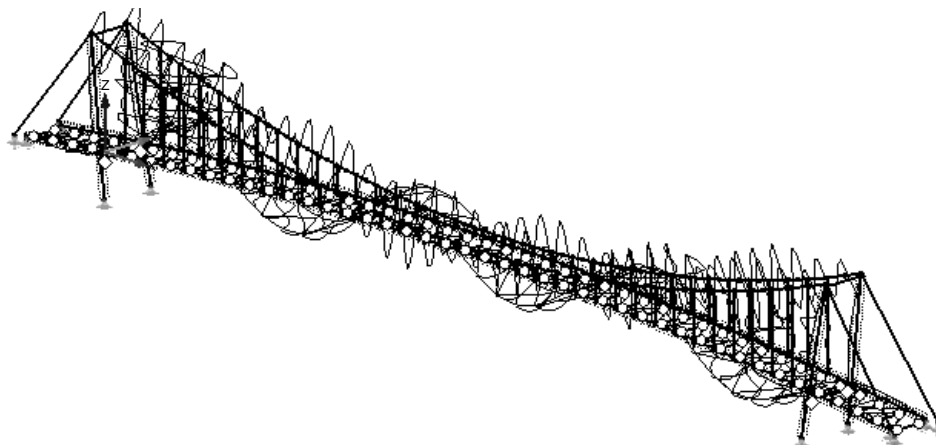
Obr. č.59 – 5. Vlastní tvar, torzní, $f = 0,972$ Hz



Obr. č.60 – 6. Vlastní tvar, svislý, $f= 2,345$ Hz



Obr. č.61 – 7. Vlastní tvar, torzní, $f= 3,515$ Hz



Obr. č.62 – 8. Vlastní tvar, svislý, $f= 4,819$ Hz

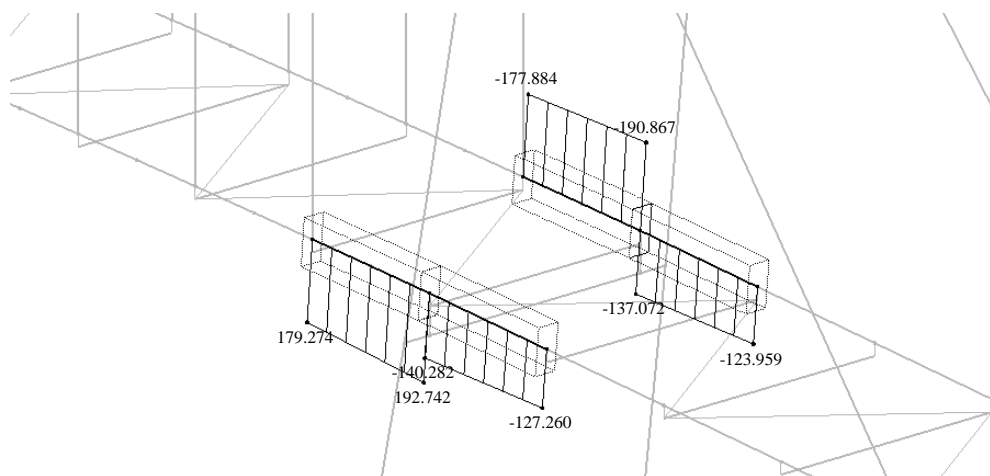
Z výsledků dynamické analýzy je zřejmá nutnost provedení TMD tlumičů vibrací. Tlumiče budou provedeny na třech místech. První dvě místa jsou ve vzdálenosti 21 m od pylonu, třetí pozice je přesně v polovině rozpětí.

Volba umístění tlumičů je provedena na základě porovnání výše zobrazených vlastních tvarů. V rámci této diplomové práce již nejsou řešeny konkrétní parametry tlumičů.

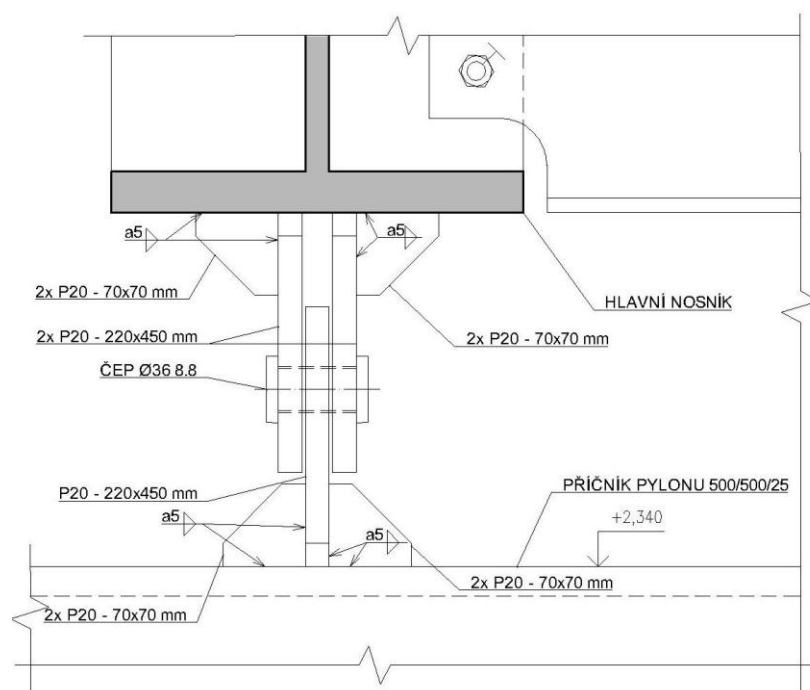
10. Návrh a posouzení hlavních detailů

10.1. Uložení hlavních nosníků na příčníky pylonů

Uložení hlavních nosníků na příčníky pylonů bude řešeno jako čepový přípoj tvořený plechy tl. 20 mm a čepy $\varnothing 36$ mm, materiál 8.8. Pro čepy bude vytvořen oválný otvor umožňující pohyb konstrukce lávky v podélném směru. V příčném směru jsou mezi jednotlivými plechy mezery o velikosti 3 mm umožňující pohyb konstrukce v důsledku oteplení.



Obr. č.63 – Posouvající síly V_z (kN) působící v místě uložení, KZS – vítr + chodci přes polovinu středního pole lávky.



Obr. č.64 – Navržené řešení

Únosnost čepu ve stříhu:

$$F_{V,Rd} = 0,6 \cdot A \cdot \frac{f_{up}}{\gamma_{M2}} = 0,6 \cdot 1018 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{800 \cdot 10^3}{1,25} = 390,9 \text{ kN}$$

A ... plocha průřezu čepu

f_{up} ... mez pevnosti čepu

$$F_{V,Rd} = 390,9 \text{ kN} \geq F_{V,Ed} = 192,7 \text{ kN}$$

Únosnost plechu a čepu v otláčení:

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot t \cdot d \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot 0,02 \cdot 0,036 \cdot \frac{355 \cdot 10^3}{1,25} = 444,7 \text{ kN}$$

t ... tloušťka spojované části

d ... průměr čepu

f_y ... nižší z meze kluzu spojovaného materiálu a čepu

$$F_{b,Rd} = 444,7 \text{ kN} \geq F_{V,Ed} = 192,7 \text{ kN}$$

Únosnost čepu v ohybu:

$$M_{Rd} = 1,5 \cdot W_{el} \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot \frac{\pi \cdot 0,036^3}{32} \cdot \frac{640 \cdot 10^3}{1,25} = 3,5 \text{ kNm}$$

W_{el} ... elastický průřezový modul čepu

f_{yp} ... mez kluzu čepu

Únosnost čepu při kombinaci ohybu a stříhu:

$$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} \right]^2 \leq 1$$

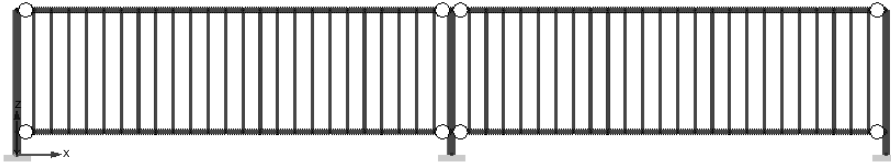
$$M_{Ed} = \frac{F_{ed}}{8} \cdot (b + 4c + 2a) = \frac{192,7}{8} \cdot (0,02 + 4 \cdot 0,003 + 2 \cdot 0,02) = 1,73 \text{ kNm}$$

$$\left[\frac{1,73}{3,5} \right]^2 + \left[\frac{193,5}{390,9} \right]^2 \leq 1$$

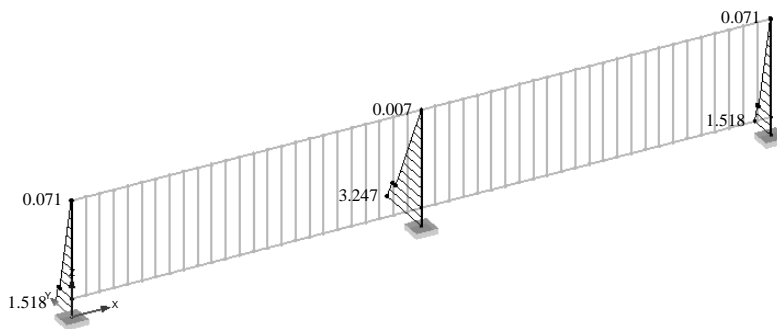
$$0,49 \leq 1$$

10. 2. Návrh a posouzení zábradlí

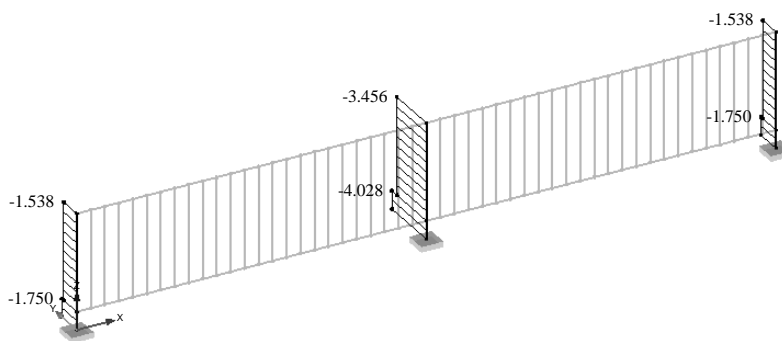
Z důvodu vyřešení vzájemného uspořádání detailů kotvení sloupků zábradlí k hlavnímu nosníku a připojení závěsů k hlavnímu nosníku je nutné navrhnout konstrukci zábradlí. Pro návrh byl vytvořen samostatný prostorový model zábradlí viz Obr. č.65. Na horní příčel je nadefinováno vodorovné a svislé zatížení o velikosti 1 kN/m. Jednotlivé prvky zábradlí jsou z profilů HTR, konkrétně sloupky HTR 70/50/3, horní a spodní příčel HTR 50/30/2 a svislá výplň HTR 20/20/2.



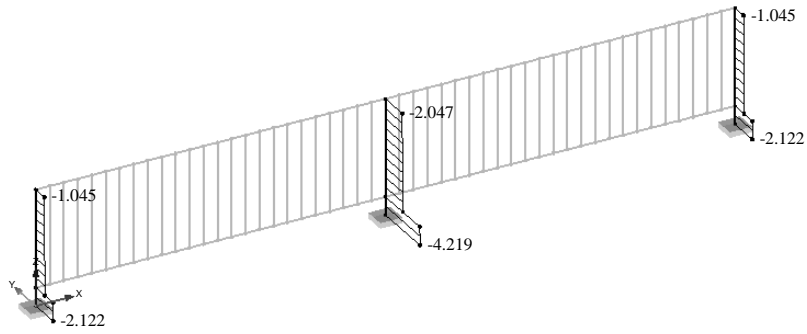
Obr. č.65 – výpočetní model



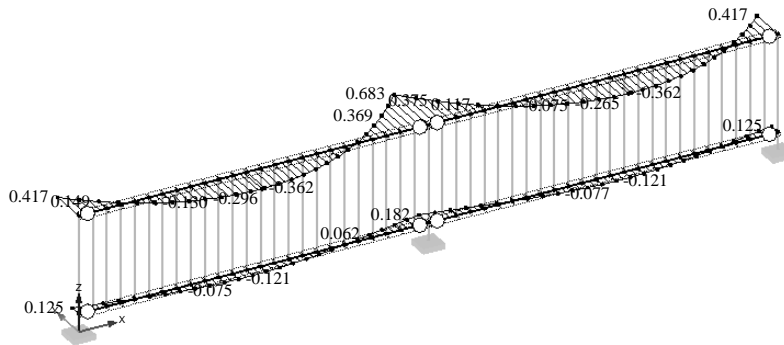
Obr. č.66 – Rozhodující vnitřní síly $M_{ed,y}$ (kNm) pro návrh sloupku



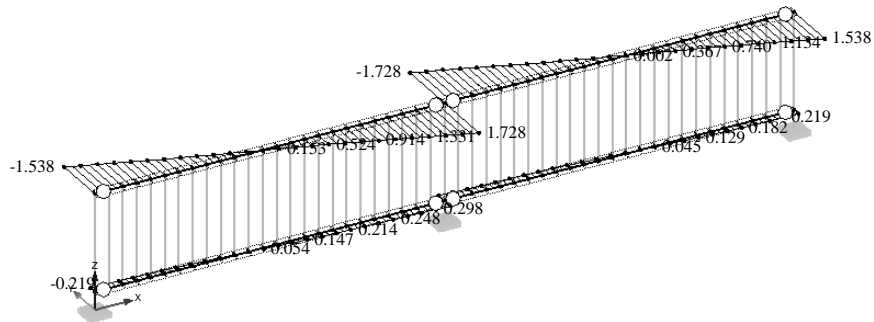
Obr. č.67 – Rozhodující vnitřní síly $V_{ed,z}$ (kN) pro návrh sloupku



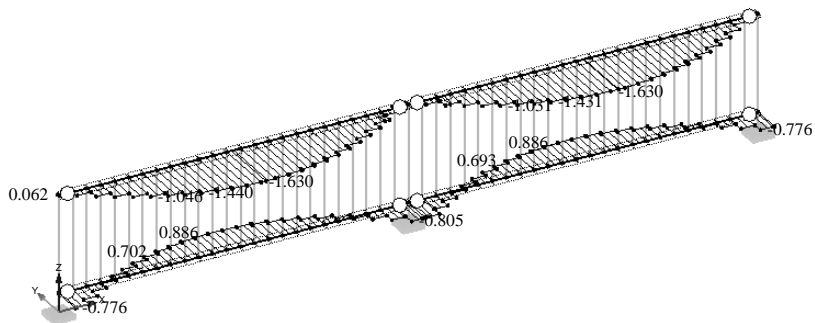
Obr. č.68 – Rozhodující normálové síly N_{ed} (kN) pro návrh sloupku



Obr. č.69 – Rozhodující vnitřní síly $M_{ed,y}$ (kNm) pro návrh příče



Obr. č.70 – Rozhodující vnitřní síly $V_{ed,z}$ (kN) pro návrh příče



Obr. č.71 – Působící normálové síly N_{ed} (kN) na příčli

Posouzení sloupku:**Posouzení prvku na ohyb a smyk**

Prvek:	sloupek		$c_1=58$
Profil:	HTR 70/50/3		$t_1=3$
Ocel:	S355		$c_2=38$
	$f_{yd}=355$	MPa	$t_2=3$
Průřezové charakteristiky:			Třída průřezu: 1
	$A_{vz}=3,86E-04$	m^2	$c_1/t_1=19,3 < 33 \cdot \epsilon=26,73$
	$W_y=W_{pl,y}=1,54E-05$	m^3	$c_2/t_2=12,7 < 72 \cdot \epsilon=58,32$

Namáhání:

$$M_{ed,y}=3,25 \text{ kNm}$$

$$V_{ed}=4 \text{ kN}$$

Únosnost v ohybu:

$$M_{c,Rd,y} = W \cdot f_y / \gamma_{m0} = 1,54E-05 \cdot 355000 / 1 = 5,47$$

Využití:

$$\frac{M_{ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{3,25}{5,47} = 0,59 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Únosnost ve smyku:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} = \frac{3,86 \cdot 10^{-4} \cdot 355000}{\sqrt{3}} = 79,03 \text{ kN}$$

Využití:

$$\frac{V_{ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{4}{79,03} = 0,05 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Posouzení příčle:**Posouzení prvku na ohyb a smyk**

Prvek:	Příčel		$c_1=22$
Profil:	HTR 50/30/2		$t_1=2$
Ocel:	S355		$c_2=42$
	$f_{yd}=355$	MPa	$t_2=2$
Průřezové charakteristiky:			Třída průřezu: 1
	$A_{vz}=1,84E-04$	m^2	$c_1/t_1=11,0 < 33 \cdot \epsilon=26,73$
	$W_{pl}=W_{pl,y}=4,74E-06$	m^3	$c_2/t_2=21,0 < 33 \cdot \epsilon=26,73$

Namáhání:

$$M_{ed}=0,68 \text{ kNm}$$

$$V_{ed}=1,73 \text{ kN}$$

Únosnost v ohybu:

$$M_{c,Rd} = W \cdot f_y / \gamma_{m0} = 4,74E-06 \cdot 355000 / 1 = 1,68$$

Využití:

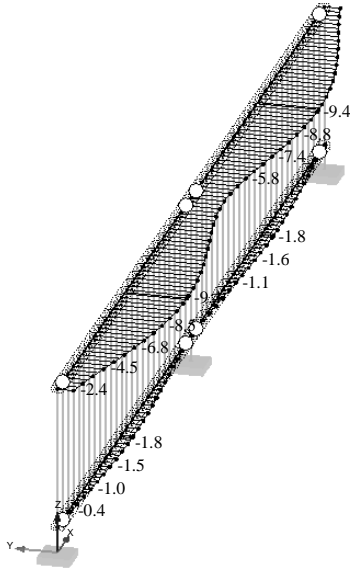
$$\frac{M_{ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0,68}{1,68} = 0,40 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Únosnost ve smyku:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} = \frac{1,84 \cdot 10^{-4} \cdot 355000}{\sqrt{3}} = 37,67 \text{ kN}$$

Využití:

$$\frac{V_{ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{1,73}{37,67} = 0,05 < 1 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

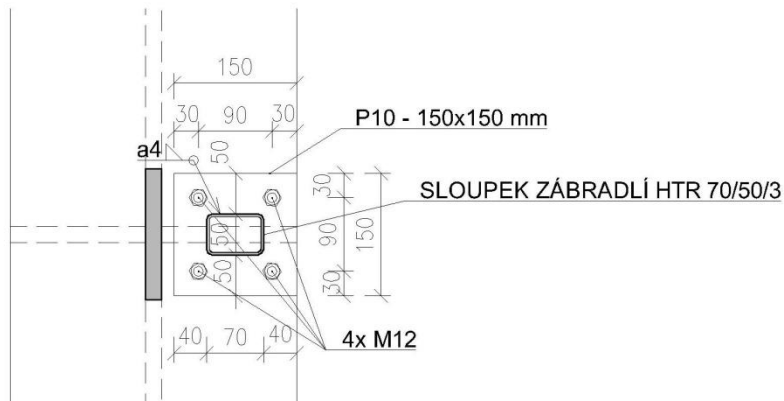
Obr. č.72 – Maximální deformace u (mm)

$$u_{\max} = 9,4 \text{ mm} \leq u_{\text{lim}} = \frac{L}{250} = \frac{2\,500}{250} = 10 \text{ mm}$$

Konstrukce zábradlí z oceli S355 vyhovuje v MSÚ i v MSP.

Návrh a posouzení kotvení sloupku k hlavnímu nosníku:

Sloupky zábradlí budou kotveny k hlavnímu nosníku přes patní plech tl. 10 mm pomocí šroubů 4x M12 8.8.



Obr. č.73 – Navržené řešení

Posouzení šroubového přípoje ve stříhu:

$$F_{V,Ed} = 4 \text{ kN}$$

$$F_{V,Rd} = 0,6 \cdot A \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 0,6 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{800 \cdot 10^3}{1,25} = 43,4 \text{ kN}$$

$$F_{V,Rd} = 43,4 \text{ kN} \geq F_{1,Ved} = \frac{F_{V,Ed}}{4} = \frac{4}{4} = 1,0 \text{ kN}$$

Posouzení šroubového přípoje v otačení:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot d \cdot t \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M0}} = 2,5 \cdot 0,769 \cdot 0,012 \cdot 0,01 \cdot \frac{510 \cdot 10^3}{1,25} = 94,2 \text{ kN}$$

$$k_1 = 2,5$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{bu}}{f_u}; 1,0\right) = \min\left(\frac{30}{3 \cdot 13}; \frac{90}{3 \cdot 13} - \frac{1}{4}; \frac{800}{510}; 1,0\right) = \min(0,769; 2,06; 1,57; 1,0)$$

$$\alpha_b = 0,769$$

$$F_{b,Rd} = 94,2 \text{ kN} \geq F_{1,Ved} = \frac{F_{V,Ed}}{4} = \frac{4}{4} = 1,0 \text{ kN}$$

Posouzení šroubového přípoje v tahu:

Tahová síla od momentu $M_{ed} = 3,2 \text{ kNm}$:

$$M_{ed} = 2 \cdot (F_{1,Ed} \cdot r_1)$$

$$F_{1,Ed} = \frac{M_{ed}}{2 \cdot r_1} = \frac{3,2}{2 \cdot 0,045} = 35,6 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd} = k_2 \cdot A_s \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 0,9 \cdot 84,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{800 \cdot 10^3}{1,25} = 48,6 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd} = 48,6 \text{ kN} \geq F_{1,Ed} = 35,6 \text{ kN}$$

Posouzení šroubového přípoje na kombinaci smyku a tahu:

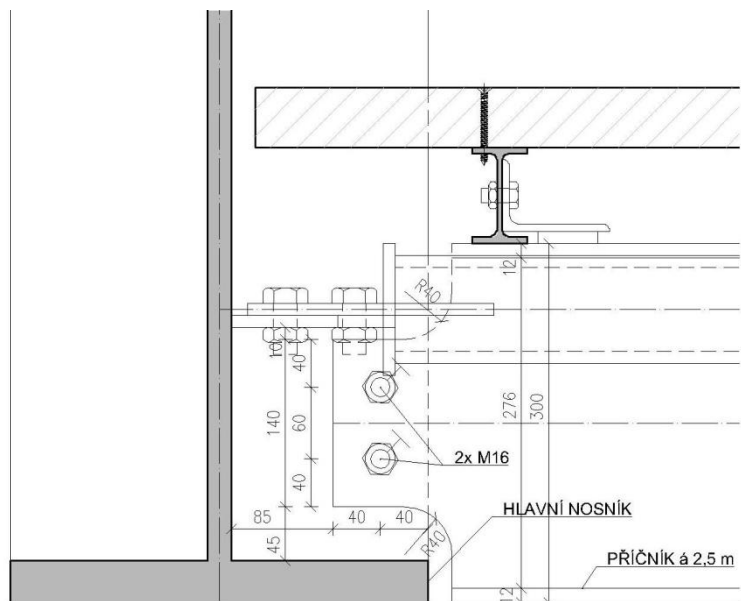
$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{4}{4 \cdot 43,4} + \frac{35,6}{1,4 \cdot 48,6} = 0,55 \leq 1$$

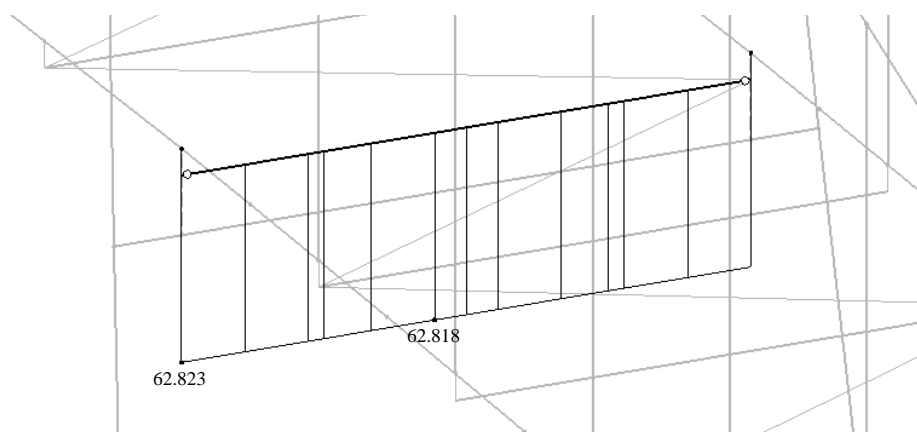
10. 3. Připojení příčníků na hlavní nosníky

Příčníky jsou kloubově připojeny k hlavním nosníkům pomocí předepjatých šroubů 2x M16 8.8. Přípoj je uskutečněn mezi stojinou příčnicku a výtuhou hlavního nosníku (viz Obr. č.74).

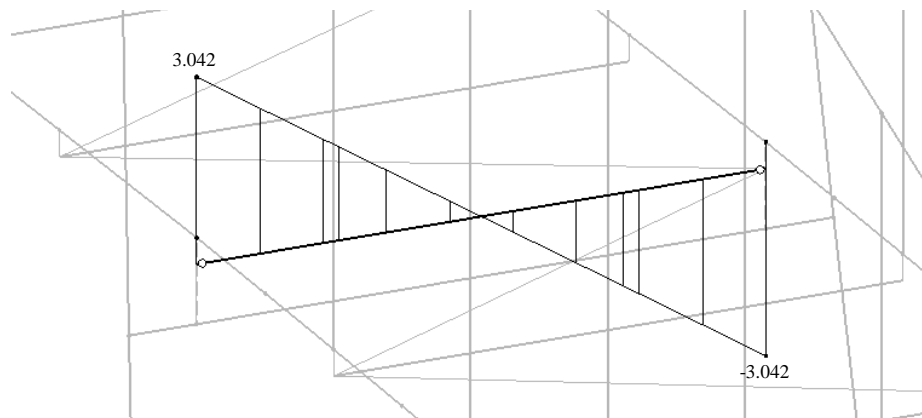
Tento přípoj je nejvíce namáhaný v případě ochlazování konstrukce v zimním období. Maximální působící síly lze vyčíst z Obr. č.75 a č.76.



Obr. č.74 – Navržené řešení



Obr. č.75 – Maximální normálové síly (kN), KZS – ochlazení



Obr. č.76 – Posouvající síly působící zároveň s největší normálovou silou (kN)

Síla působící na šroub:

$$F_h = 62,8 \text{ kN}$$

$$F_v = 3,1 \text{ kN}$$

$$F_{V,Ed} = \sqrt{62,8^2 + 3,1^2} = 62,9 \text{ kN}$$

$$F_{V1,Ed} = \frac{62,9}{2} = 31,5 \text{ kN}$$

Posouzení šroubového přípoje v třecím spoji:

$$F_{S,Rd} = k_s \cdot \eta \cdot \mu \cdot 0,7 \cdot A \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{Ms}} = 1,0 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 157 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{800 \cdot 10^3}{1,25} = 50,2 \text{ kN}$$

$$F_{S,Rd} = 50,2 \text{ kN} \geq F_{V1,Ed} = 31,5 \text{ kN}$$

Posouzení šroubového přípoje v otláčení:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot d \cdot t \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M0}} = 2,5 \cdot 0,741 \cdot 0,016 \cdot 0,008 \cdot \frac{510 \cdot 10^3}{1,25} = 96,9 \text{ kN}$$

$$k_1 = 2,5$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{bu}}{f_u}; 1,0\right) = \min\left(\frac{40}{3 \cdot 18}; \frac{60}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4}; \frac{800}{510}; 1,0\right) =$$

$$\alpha_b = \min(0,741; 0,861; 1,57; 1,0)$$

$$\alpha_b = 0,741$$

$$F_{b,Rd} = 96,9 \text{ kN} \geq F_{V1,Ed} = 31,5 \text{ kN}$$

Posouzení koutového svaru:

$$F_{ed} = 62,9 \text{ kN}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{ed}}{2 \cdot a \cdot L_w} = \frac{62,9 \cdot 10^3}{2 \cdot 4 \cdot 150} = 52,4 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{F_{ed} \cdot e}{\frac{2}{6} \cdot a \cdot L_w^2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{62,9 \cdot 10^3 \cdot 115}{\frac{2}{6} \cdot 4 \cdot 150^2 \cdot \sqrt{2}} = 170,5 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 352,9 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{Mw}} = \frac{510}{0,9 \cdot 1,5} = 377,8 \text{ MPa}$$

Vytržení skupiny šroubů z příčníku při namáhání ve smyku:

$$F_{ed} = 62,9 \text{ kN}$$

$$V_{\text{eff},Rd} = \frac{0,5 \cdot f_{u,b} \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_{y,b} \cdot A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

$f_{u,b}$... mez pevnosti materiálu příčníku

$f_{y,b}$... mez kluzu materiálu příčnicku

A_{nt} ... Oslabená plocha přenášejí tahovou sílu

$$A_{nt} = t_{w,b} \cdot \left(a_1 - \frac{d_0}{2} \right) = 8 \cdot \left(40 - \frac{18}{2} \right) = 248 \text{ mm}^2$$

A_{nw} ... Oslabená plocha přenášejí smykovou sílu

$$A_{nw} = t_{w,b} \cdot \left(a_2 - \frac{d_0}{2} \right) = 8 \cdot \left(40 - \frac{18}{2} \right) = 248 \text{ mm}^2$$

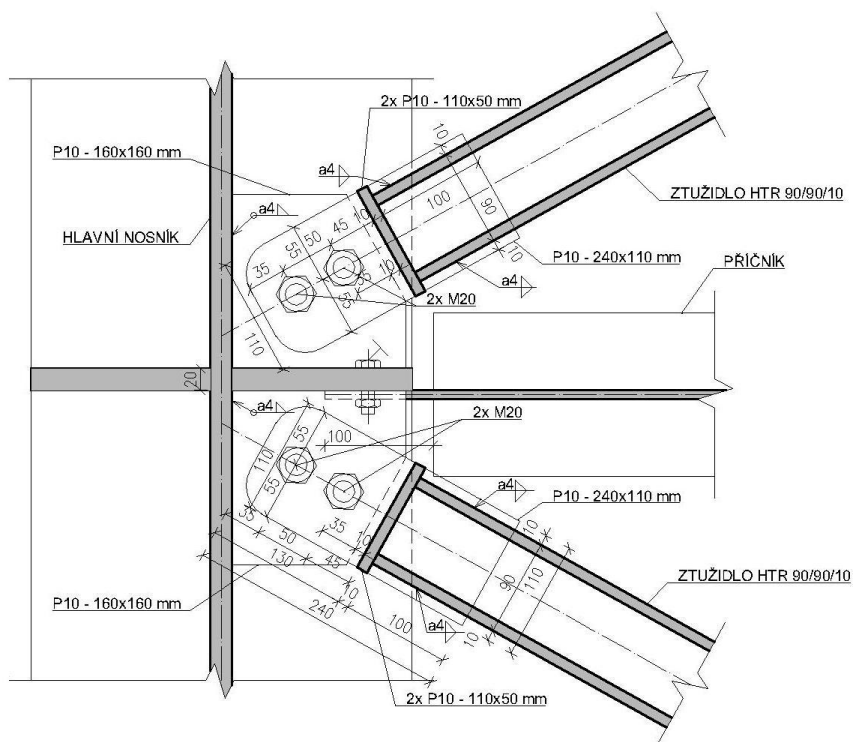
$$V_{\text{eff,Rd}} = \frac{0,5 \cdot 510 \cdot 10^3 \cdot 248 \cdot 10^{-6}}{1,25} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{355 \cdot 10^3 \cdot 248 \cdot 10^{-6}}{1,45} = 85,6 \text{ kN}$$

$$V_{\text{eff,Rd}} = 85,6 \text{ kN} \geq \frac{62,9}{2} = 31,5 \text{ kN}$$

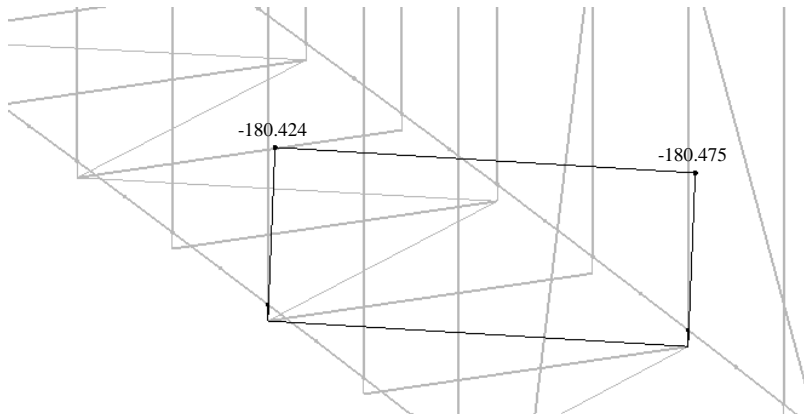
10. 4. Připojení ztužidel k hlavnímu nosníku

Ztužidla HTR 90/90/10 jsou připojena kloubově k hlavním nosníkům. Přípoj je uskutečněn pomocí šroubů 2x M20 8.8 přes plech přivařený mezi stojinu a výztuhu hlavního nosníku (viz Obr. č.77).

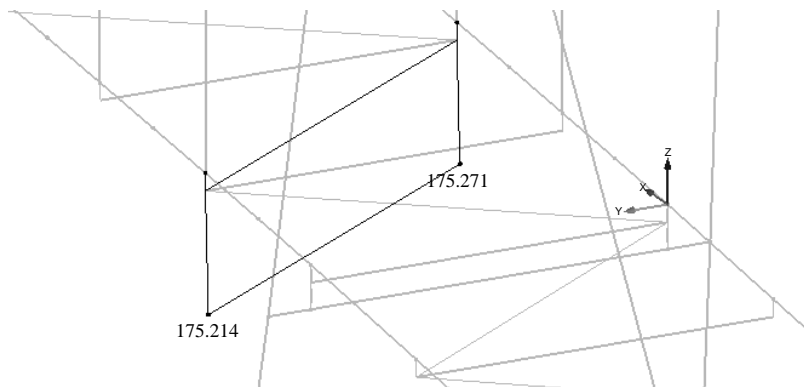
Navržený přípoj je nejvíce namáhaný od kombinace zatížení obsahující zatížení od chodců přes celé středí pole lávky a zatížení větrem. Maximální působící síly lze vyčíst z Obr. č.78 a Obr. č.79.



Obr. č.77 – Navržené řešení



Obr. č.78 – Maximální tlaková normálová síla (kN), KZS – vítr + chodci ve středním poli.



Obr. č.79 – Maximální tahová normálová síla (kN), KZS – vítr + chodci ve středním poli

Posouzení šroubového přípoje ve stříhu:

$$F_{V,Rd} = 0,6 \cdot A \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 0,6 \cdot 314 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{800 \cdot 10^3}{1,25} = 120,6 \text{ kN}$$

$$F_{V,Rd} = 120,6 \text{ kN} \geq F_{V1,Ed} = \frac{180,5}{2} = 90,25 \text{ kN}$$

Posouzení šroubového přípoje v otláčení:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot d \cdot t \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M0}} = 2,5 \cdot 0,508 \cdot 0,02 \cdot 0,01 \cdot \frac{510 \cdot 10^3}{1,25} = 103,6 \text{ kN}$$

$$k_1 = 2,5$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{bu}}{f_u}; 1,0\right) = \min\left(\frac{35}{3 \cdot 22}; \frac{50}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4}; \frac{800}{510}; 1,0\right) = \min(0,530; 0,508; 1,57; 1,0)$$

$$\alpha_b = 0,491$$

$$F_{b,Rd} = 103,6 \text{ kN} \geq F_{V1,Ed} = 90,25 \text{ kN}$$

Vytržení skupiny šroubů z plechu při namáhání ve smyku:

$$F_{ed} = 175,3 \text{ kN}$$

$$V_{eff,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_{u,b} \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_{y,b} \cdot A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

$f_{u,b}$... mez pevnosti materiálu příčnicku

$f_{y,b}$... mez kluzu materiálu příčnicku

A_{nt} ... Oslabená plocha přenášející tahovou sílu

$$A_{nt} = t_{w,b} \cdot \left(a_1 - \frac{d_0}{2} \right) = 10 \cdot \left(50 - \frac{22}{2} \right) = 390 \text{ mm}^2$$

A_{nw} ... Oslabená plocha přenášející smykovou sílu

$$A_{nw} = t_{w,b} \cdot (a_2 + a_3 - 1,5 \cdot d_0) = 10 \cdot (35 + 50 - 1,5 \cdot 22) = 520 \text{ mm}^2$$

$$V_{eff,Rd} = \frac{0,5 \cdot 510 \cdot 10^3 \cdot 390 \cdot 10^{-6}}{1,25} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{355 \cdot 10^3 \cdot 520 \cdot 10^{-6}}{1,00} = 186,1 \text{ kN}$$

$$V_{eff,Rd} = 186,1 \text{ kN} \geq F_{V,Ed} = 175,3 \text{ kN}$$

Posouzení koutového svaru:

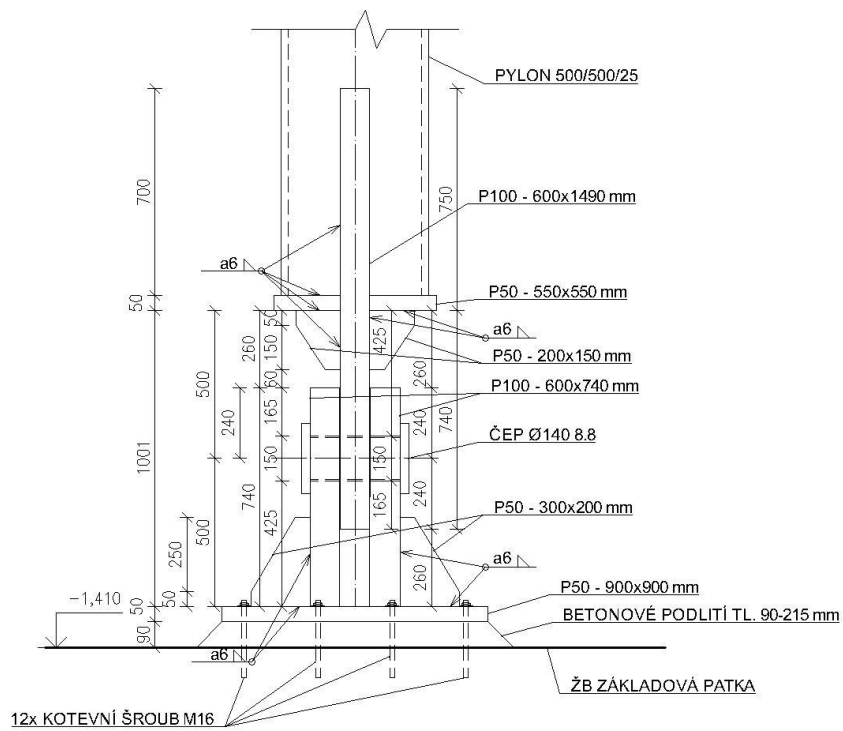
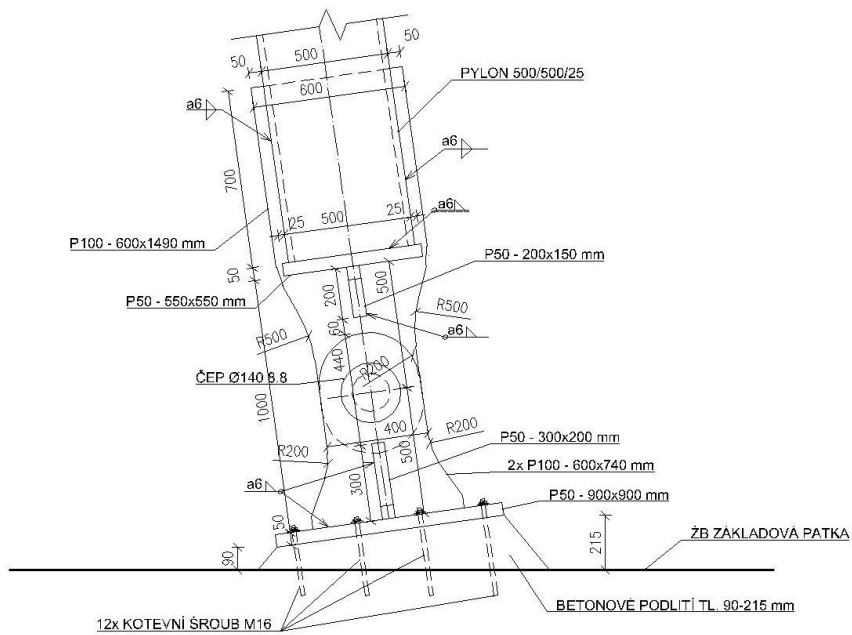
$$F_{w,Rd} = 4 \cdot a \cdot L_w \cdot f_{vw,d} = 4 \cdot 0,004 \cdot 0,1 \cdot 261,7 \cdot 10^3 = 418,7 \text{ kN}$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510 / \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 261,7 \text{ Mpa}$$

$$F_{w,Rd} = 418,7 \text{ kN} \geq F_{ed} = 180,4 \text{ kN}$$

10. 5. Uložení pylonu na základ

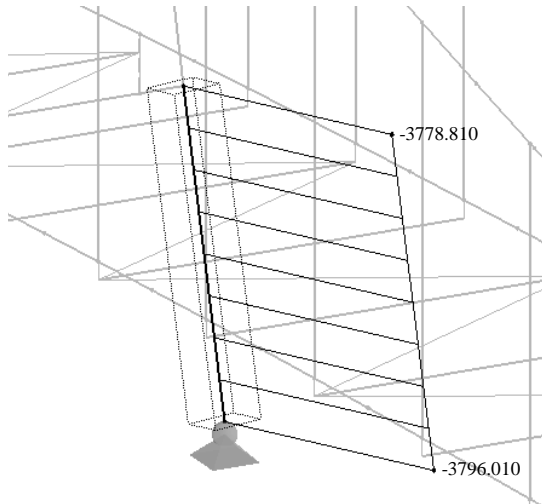
Pylon 500/500/25 je k základovému bloku připojen čepově. Tloušťka plechů pro čepový přípoj je 100 mm a jsou vyztuženy dalšími plechy tl. 50 mm. Byl použit čep \varnothing 140 mm, materiál 8.8. Patní plech má tl. 50 mm a je kotven do základů přes betonové podlití minimální tl. 90 mm pomocí kotevních šroubů (viz. Obr. č.80).



Obr. č.80 – Navržené řešení

Návrh a posouzení patního plechu:

Patní plech bude namáhaný nejvíce v případě kombinace zatížení od chodců umístěných po celé ploše lávky a zatížení větrem.

Obr. č.81 – Maximální působící tlaková síla N_{ed} (kN):

$$A_{eff} \geq \frac{N_{ed}}{f_{jd}}$$

A_{eff} ... Nutná účinná plocha

f_{jd} ... návrhová pevnost betonu pod patkou

$$f_{jd} = \beta_j \cdot f_{Rdu}$$

$$\beta_j = \frac{2}{3}$$

β_j ... součinitel vlivu podlití

$$f_{Rdu} = f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}}$$

Pro základovou patku bude použit beton C20/25

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20}{1,5} = 13,33 \text{ MPa}$$

Navrhuji patní plech o rozměrech 0,9x0,9 m.

A_{c0} ... Zatížená plocha

$$A_{c0} = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81 \text{ m}^2$$

A_{c1} ... Největší návrhová roznášecí plocha podobného tvaru jako A_{c0} v hloubce h

$$A_{c1} = b_2 \cdot d_2 = 2,4 \cdot 2,4 = 5,76 \text{ m}^2$$

$$b_2 = \min(3b_1; b_1 + h_c; b_c) = \min(3 \cdot 0,9; 0,9 + 1,5; 3) = \min(2,7; 2,4; 3) = 2,4$$

$$d_2 = \min(3d_1; d_1 + h_c; d_c) = \min(3 \cdot 0,9; 0,9 + 1,5; 3,85) = \min(2,7; 2,4; 3,85) = 2,4$$

$$f_{Rdu} = f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = 13,33 \cdot \sqrt{\frac{5,76}{0,81}} = 35,56 \text{ MPa}$$

$$f_{Rdu} = 35,56 \text{ MPa} \leq 3,0 \cdot f_{cd} = 3,0 \cdot 13,33 = 40 \text{ MPa}$$

$$f_{jd} = \beta_j \cdot f_{Rdu} = \frac{2}{3} \cdot 35,56 = 23,7 \text{ MPa}$$

$$A_{eff} \geq \frac{N_{ed}}{f_{jd}} = \frac{3,796}{23,7} = 0,16 \text{ m}^2$$

Volím tloušťku patního plechu $t = 50 \text{ mm}$

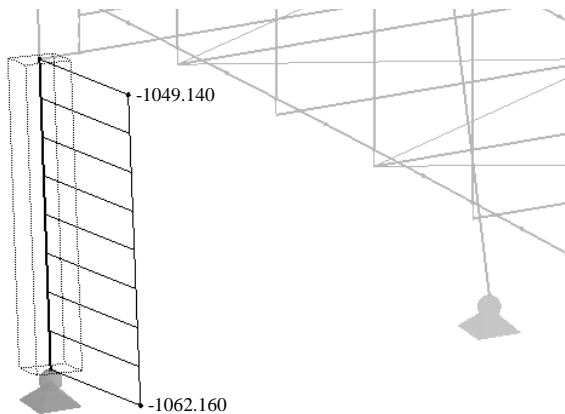
$$c = t \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{3 \cdot f_{jd}}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{355/1,15}{3 \cdot 23,7}} = 104,2 \text{ mm}$$

$A_{eff} = 0,25183 \text{ m}^2$ (odměřeno z programu AutoCad)

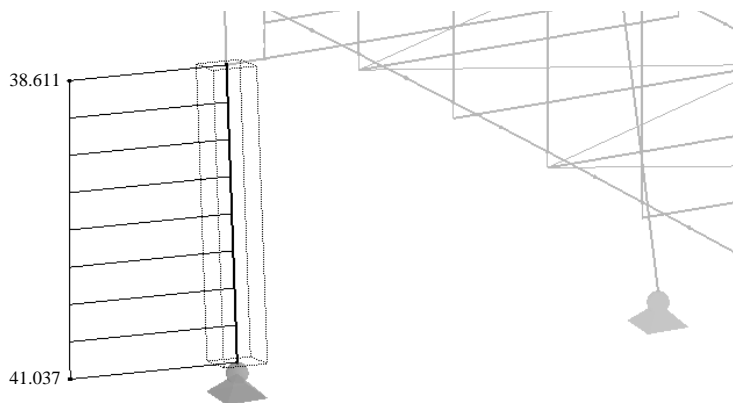
$$A_{eff} = 0,25183 \text{ m}^2 \geq \frac{N_{ed}}{f_{jd}} = \frac{3,796}{23,7} = 0,16 \text{ m}^2 \quad \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Přenos vodorovných sil v patce:

Pro posouzení bude rozhodující stav vyvolávající nejmenší tlakovou sílu v patce, tomuto stavu odpovídá situace, kdy na konstrukci působí pouze zatížení větrem.



Obr. č.82 – Minimální působící tlaková síla N_{ed} (kN)



Obr. č.83 – Odpovídající působící posouvající síla V_{ed} (kN)

$$V \leq C_{f,d} \cdot N_{c,Ed}$$

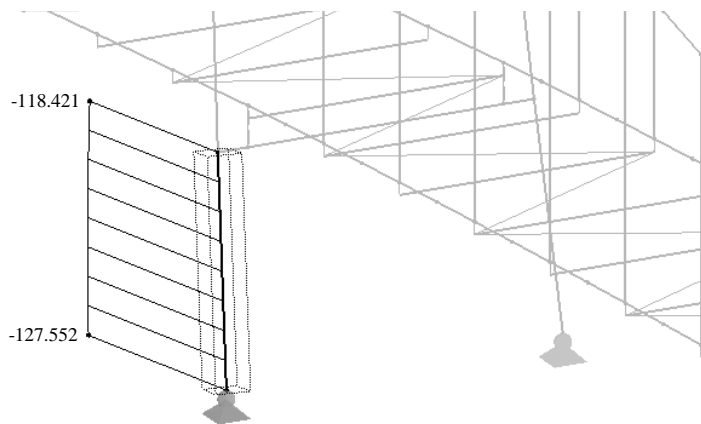
$C_{f,d}$... Součinitel tření

$$C_{f,d} = 0,2$$

$$V = 41 \text{ kN} \leq C_{f,d} \cdot N_{c,Ed} = 0,2 \cdot 1062,2 = 212,4 \text{ kN}$$

Přenos vodorovných sil v patce je zajištěn třením a není nutný návrh smykové zarážky.

Pro účely tohoto posouzení byla zohledněna i maximální možná velikost posouvající síly od jiné kombinace zatěžovacích stavů (viz. Obr. č.84) a byla porovnána s již zmíněnou minimální tlakovou silou a i v tomto případě je zde velká rezerva a smyková zarážka není nutná.



Obr. č.84 – Maximální posouvající síla V_{ed} (kN):

Únosnost čepu ve stříhu:

$$F_{V,Rd} = 0,6 \cdot A \cdot \frac{f_{up}}{\gamma_{M2}} = 0,6 \cdot 15\,393,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{800 \cdot 10^3}{1,25} = 5\,911 \text{ kN}$$

A ... plocha průřezu čepu

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 70^2 = 15\,393,8 \text{ mm}^2$$

f_{up} ... mez pevnosti čepu

$$F_{V,Rd} = 5\,911 \text{ kN} \geq F_{V,Ed} = 3\,796 \text{ kN}$$

Únosnost plechu a čepu v otláčení:

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot t \cdot d \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,140 \cdot \frac{355 \cdot 10^3}{1,25} = 5\,964 \text{ kN}$$

t ... tloušťka spojované části

d ... průměr čepu

f_y ... nižší z meze kluzu spojovaného materiálu a čepu

$$F_{b,Rd} = 5\,964 \text{ kN} \geq F_{V,Ed} = 3\,796 \text{ kN}$$

Únosnost čepu v ohybu:

$$M_{Rd} = 1,5 \cdot W_{el} \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot \frac{\pi \cdot 0,140^3}{32} \cdot \frac{640 \cdot 10^3}{1,25} = 206,9 \text{ kNm}$$

W_{el} ... elastický průřezový modul čepu

f_{yp} ... mez kluzu čepu

Únosnost čepu při kombinaci ohybu a stříhu:

$$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} \right]^2 \leq 1$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{8} \cdot (b + 4c + 2a) = \frac{3\,796}{8} \cdot (0,1 + 4 \cdot 0,002 + 2 \cdot 0,1) = 146,2 \text{ kNm}$$

$$\left[\frac{146,2}{206,9} \right]^2 + \left[\frac{3\,796}{5\,911} \right]^2 \leq 1$$

$$0,91 \leq 1$$

Posouzení koutového svaru mezi plechem tl. 100 mm a pylonem:

$$N_{ed} = 3\,796 \text{ kN}$$

$$F_{w,Rd} = 4 \cdot L \cdot a \cdot f_{vw,d} = 4 \cdot 0,7 \cdot 0,006 \cdot 261,7 \cdot 10^3 = 4\,397 \text{ kN}$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510 / \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 261,7 \text{ Mpa}$$

$$F_{w,Rd} = 4\,397 \geq N_{ed} = 3\,796 \text{ kN}$$

Posouzení koutového svaru mezi plechem tl. 100 mm a patním plechem tl. 50 mm:

$$N_{ed} = 3\,796 \text{ kN}$$

$$V_z = 129,6 \text{ kN}$$

$$V_y = 96,5 \text{ kN}$$

Složky napětí od N_{ed} :

$$\tau_{\perp} = 0$$

$$\tau_{\parallel} = \sigma_{\perp} = \frac{F_{ed}}{2 \cdot a \cdot L_w} = \frac{3\,796}{2 \cdot 0,006 \cdot 0,9} = 175,74 \text{ MPa}$$

Složky napětí od V_z :

boční svary

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = 0$$

$$\tau_{\perp} = \frac{V_z/2}{2 \cdot a \cdot L_w} = \frac{0,1296/2}{2 \cdot 0,006 \cdot 0,6} = 9 \text{ MPa}$$

čelní svary

$$\tau_{\perp} = 0$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{V_z \cdot \sqrt{2}/2}{2 \cdot a \cdot L_w \sqrt{3}} = \frac{0,1296 \cdot \sqrt{2}/2}{2 \cdot 0,006 \cdot 0,6 \cdot \sqrt{3}} = 7,35 \text{ MPa}$$

Složky napětí od V_y :

boční svary

$$\tau_{\perp} = 0$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{V_y \cdot \sqrt{2}/2}{2 \cdot a \cdot L_w \sqrt{3}} = \frac{0,0965 \cdot \sqrt{2}/2}{2 \cdot 0,006 \cdot 0,6 \cdot \sqrt{3}} = 5,48 \text{ MPa}$$

čelní svary

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = 0$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_y/2}{2 \cdot a \cdot L_w} = \frac{0,0965/2}{2 \cdot 0,006 \cdot 0,6} = 6,7 \text{ MPa}$$

Celkové napětí:

$$\sigma_{\perp} = 175,74 + 7,35 + 5,48 = 188,57 \text{ MPa}$$

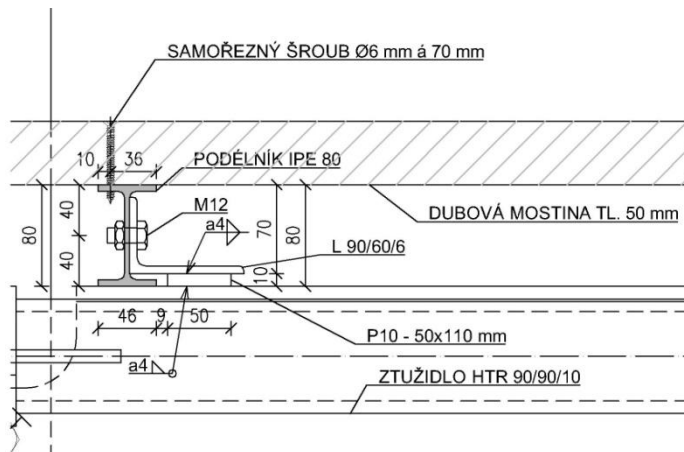
$$\tau_{\perp} = 175,74 + 0 + 5,48 = 181,22 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = 0 + 9 + 6,7 = 15,7 \text{ MPa}$$

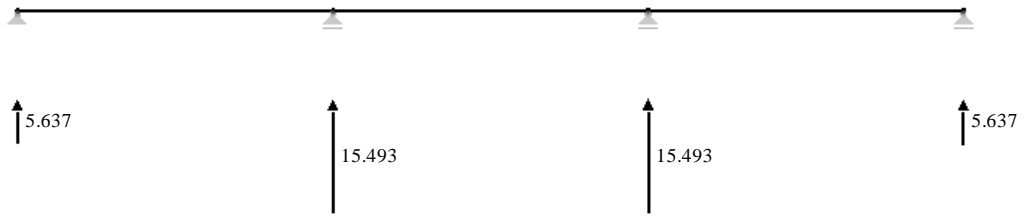
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 367,2 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{Mw}} = \frac{510}{0,9 \cdot 1,5} = 377,8 \text{ MPa}$$

10. 6. Uložení podélníků na příčníky

Podélníky IPE 80 budou uloženy na horní pásnice příčníků přes úhelník L 90/60/6 pomocí šroubu M12 8.8 (viz Obr. č. 76).



Obr. č.85 – Navržené řešení



Obr. č.86 – Reakce působící na šroubový přípoj

Posouzení šroubového přípoje ve stříhu:

$$F_{ed} = 15,5 \text{ kN}$$

$$F_{V,Rd} = 0,6 \cdot A \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 0,6 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{800 \cdot 10^3}{1,25} = 43,4 \text{ kN}$$

$$F_{V,Rd} = 43,4 \text{ kN} \geq F_{V,Ed} = 15,5 \text{ kN}$$

Posouzení šroubového přípoje v otláčení:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot d \cdot t \cdot \frac{f_u}{\gamma_{Mo}} = 2,5 \cdot 0,519 \cdot 0,012 \cdot 0,004 \cdot \frac{510 \cdot 10^3}{1,25} = 25,4 \text{ kN}$$

$$k_1 = 2,5$$

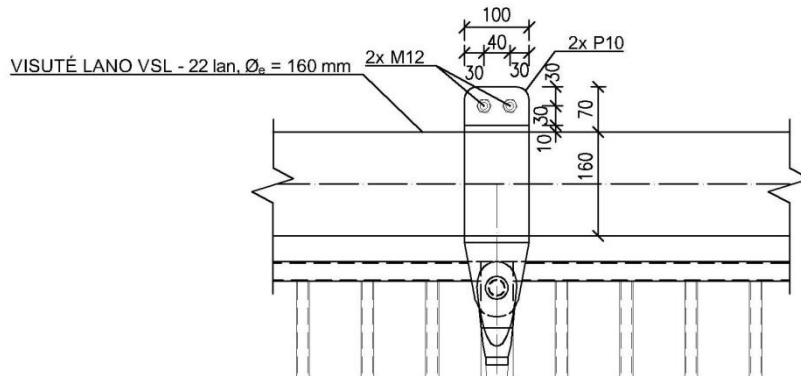
$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{bu}}{f_u}; 1,0\right) = \min\left(\frac{30}{3 \cdot 13}; \frac{30}{3 \cdot 13} - \frac{1}{4}; \frac{800}{510}; 1,0\right) = \min(0,769; 0,519; 1,57; 1,0)$$

$$\alpha_b = 0,519$$

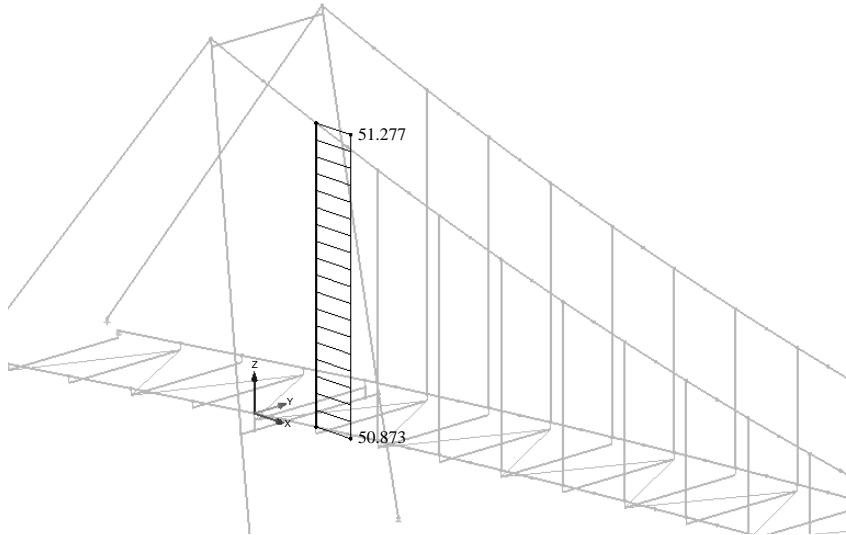
$$F_{b,Rd} = 25,4 \text{ kN} \geq F_{V,Ed} = 15,5 \text{ kN}$$

10. 7. Připojení závěsů na visuté lano

Lanové závěsy Macalloy $\varnothing 22$ mm budou připojeny k visutému lanu VSL $\varnothing_e 160$ mm pomocí plechů tl. 10 mm a šroubů 2x M12 8.8 (viz Obr. č. 87).



Obr. č.87 – Navržené řešení



Obr. č.88 – Maximální působící síly N_{ed} (kN), KZS – ochlazení + chodci přes polovinu rozpětí středního pole.

Posouzení šroubového přípoje ve stříhu:

$$F_{V,Ed} = 51,3 \text{ kN}$$

$$F_{V,Rd} = 0,6 \cdot A \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 0,6 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{800 \cdot 10^3}{1,25} = 43,4 \text{ kN}$$

$$F_{V,Rd} = 43,4 \text{ kN} \geq F_{1V,Ed} = \frac{F_{V,Ed}}{2} = \frac{51,3}{2} = 25,7 \text{ kN}$$

Posouzení šroubového přípoje v otláčení:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot d \cdot t \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M0}} = 2,5 \cdot 0,519 \cdot 0,012 \cdot 0,01 \cdot \frac{510 \cdot 10^3}{1,25} = 63,5 \text{ kN}$$

$$k_1 = 2,5$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{bu}}{f_u}; 1,0\right) = \min\left(\frac{30}{3 \cdot 13}; \frac{30}{3 \cdot 13} - \frac{1}{4}; \frac{800}{510}; 1,0\right) = \min(0,769; 0,519; 1,57; 1,0)$$

$$\alpha_b = 0,519$$

$$F_{b,Rd} = 63,5 \text{ kN} \geq F_{1V,Ed} = 25,7 \text{ kN}$$

11. Závěr

Na základě sestaveného numerického 3D modelu konstrukce v programu Dlubal RFEM 5.11 a následného posouzení lze prohlásit, že konstrukce je vyhovující z hlediska mezního stavu únosnosti i mezního stavu použitelnosti. Na návrh hlavní nosné konstrukce měla vliv jakákoliv změna průřezu nosného prvku, zásadní byl zejména vliv na svislé deformace, z tohoto důvodu byl model a následně i posudek průběžně upravován až do finální podoby. Konstrukce nebyla posouzena z hlediska únavy, protože chodci nezpůsobují únavové namáhání.

Z dynamické analýzy vyplývá, že je nutné provést opatření proti nadměrným vibracím. V této diplomové práci jsem po uvážení významných vlastních tvarů zvolil pouze pozice pro umístění tlumičů, stanovení dalších parametrů již nebylo předmětem diplomové práce.

Přípoje nosných prvků konstrukce jsou navrženy převážně jako kloubové pomocí šroubů různých průměrů a z materiálu 8.8. U čepových přípojů je vždy navržena mezera mezi jednotlivými plechy pro umožnění posunů v důsledku oteplování konstrukce. Připojení visutých lan na pylony je provedeno dle podkladů výrobce lan VSL. Uchycení závěsů na hlavní nosníky bylo navrženo dle podkladů výrobce Macalloy.

12. Seznam použitých symbolů

v_m	střední rychlost větru
c_r	součinitel drsnosti terénu
k_r	součinitel terénu
c_0	součinitel orografie
v_b	základní rychlost větru
z_0	parametr drsnosti terénu
I_v	intenzita turbulence
σ_v	směrodatná odchylka turbulence
k_t	součinitel turbulence
q_p	maximální dynamický tlak
ρ	měrná hmotnost vzduchu
C	součinitel zatížení větrem
c_e	součinitel expozice
$c_{f,y}$	součinitel síly bez vlivu proudění kolem volných konců
C_f	součinitel síly pro nosné prvky s obdélníkovým průřezem
$c_{f,0}$	součinitel síly pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy a bez uvažování vlivu koncových vírů
ψ_r	redukční součinitel pro čtvercové průřezy se zaoblenými rohy
λ	štíhlost
φ	součinitel plnosti
ψ_λ	součinitel koncového efektu pro prvky s volnými konci
Re	Reynoldsovo číslo
ν	kinematická viskozita vzduchu
$V_{(ze)}$	maximální rychlost větru
k	ekvivalentní drsnost povrchu
T_{max}	maximální teplota vzduchu ve stínu
T_{min}	minimální teplota vzduchu ve stínu
$T_{e,max}$	maximální složka teploty
$T_{e,min}$	minimální složka teploty

T_0	výchozí teplota
$\Delta T_{N,exp}$	maximální rozsah pro prodloužení
$\Delta T_{N,noc}$	maximální rozsah teplot pro zkrácení
$\Delta T_{M,heat}$	rozdíl teplot pro horní povrch teplejší než dolní
$\Delta T_{M,cool}$	rozdíl teplot pro dolní povrch teplejší než horní
$k_{sur,i}$	součinitel pro různé tloušťky svršku
γ_G	dílčí součinitel stálého zatížení
γ_Q	dílčí součinitel proměnného zatížení
γ_P	dílčí součinitel zatížení od předpětí
ψ_0	součinitel pro kombinační hodnotu proměnného zatížení
$f_{m,k}$	charakteristická pevnost dřeva v ohybu
$f_{v,k}$	charakteristická pevnost dřeva ve smyku
k_{def}	součinitel dotvarování
k_{mod}	modifikační součinitel zohledňující vliv trvání zatížení a vlhkosti
γ_M	dílčí součinitel vlastností materiálu
σ	normálové napětí
$\tau_{v,d}$	smykové napětí
w_{inst}	okamžitý průhyb
$w_{net,fin}$	čistý konečný průhyb
ψ_2	součinitel pro kvazistálou hodnotu proměnného zatížení
f_y	mez kluzu oceli
A	průřezová plocha
A_{vz}	účinná smyková plocha
W_{pl}	plastický průřezový modul
W_{el}	elastický průřezový modul
I_y, I_z	moment setrvačnosti průřezu k příslušné ose
i_y, i_z	poloměr setrvačnosti průřezu k příslušné ose
M_{ed}	působící návrhový ohybový moment
V_{ed}	působící návrhová posouvající síla
N_{ed}	působící návrhová normálová síla
$M_{c,Rd}$	návrhová únosnost v ohybu

$V_{c,Rd}$	návrhová únosnost ve smyku
N_{Rdk}	únosnost v prostém tlaku
w_{max}	maximální svislá deformace
w_{lim}	maximální povolená svislá deformace
L_{cr}	Vzpěrná délka prutu
α	součinitel imperfekce
λ	štíhlost
λ_1	hodnota štíhlosti pro výpočet poměrné štíhlosti
$\bar{\lambda}$	poměrná štíhlost
χ	součinitel vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení
φ	hodnota pro výpočet součinitele vzpěrnosti χ
k_{yy}	součinitel interakce
k_{yz}	součinitel interakce
k_{zz}	součinitel interakce
k_{zy}	součinitel interakce
α_{crit}	součinitel kritického zatížení
y_{max}, u_{max}	maximální vodorovná deformace
y_{lim}, u_{lim}	maximální povolená vodorovná deformace
f	vlastní frekvence
$F_{V,Rd}$	únosnost ve stříhu
f_{up}	mez pevnosti čepu
f_{yp}	mez kluzu čepu
$F_{b,Rd}$	únosnost v otláčení
d_0	průměr otvoru
f_u	mez pevnosti spojovaného materiálu
d	průměr šroubu
e_1, p_1	rozteč šroubů ve směru působící síly
$F_{t,Rd}$	únosnost v tahu
β_w	kolerační součinitel
$\sigma_{\perp}, \tau_{\perp}, \tau_{\parallel}$	napětí působící na svar

13. Seznam použitých zdrojů

Normy:

- [1] ČSN EN 1990_Eurokód -ed.2_ Zásady navrhování konstrukcí
- [2] ČSN EN 1991-1-1_Eurokód 1-Zatížení konstrukcí_část 1_1_vlastní tíha, užité zatížení
- [3] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem.
- [4] ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou.
- [5] ČSN EN 1991-1-3_Eurokód 1-Zatížení konstrukcí_část 1_3_zatížení sněhem
- [6] ČSN EN 1991-1-5_Eurokód 1-Zatížení konstrukcí_část 1_5_zatížení teplotou
- [7] ČSN EN 1991-2_Eurokód 1-Zatížení konstrukcí_část 2_Zatížení mostů dopravou
- [8] ČSN EN 1993-1-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [9] ČSN EN 1993-1-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ČNI, červenec 2006.
- [10] ČSN EN 1993-1-8_ed.2_Eurokód 3-Navrhování ocelových konstrukcí-část_1_8_Navrhování styčnicků
- [11] ČSN EN 1993-1-11_Eurokód 3-Navrhování ocelových konstrukcí_část 1_11_Navrhování ocelových tažených prvků
- [12] ČSN EN 1995-1-1_Eurokód 5_Navrhování dřevěných konstrukcí_část 1-1_Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby

Knižní publikace a skripta:

- [13] T. ROTTER , J. STUDNIČKA: *Ocelové konstrukce 30 – Ocelové mosty*. Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [14] F. WALD: *Ocelové konstrukce 10 – Tabulky*. Vydavatelství ČVUT, 2006.
- [15] Sétra: *Technical guide. Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*. 2006.

Webové stránky:

- [16] <http://ocel-drevo.cz/>
- [17] <http://www.vsl.cz/>
- [18] <http://www.tension.cz>