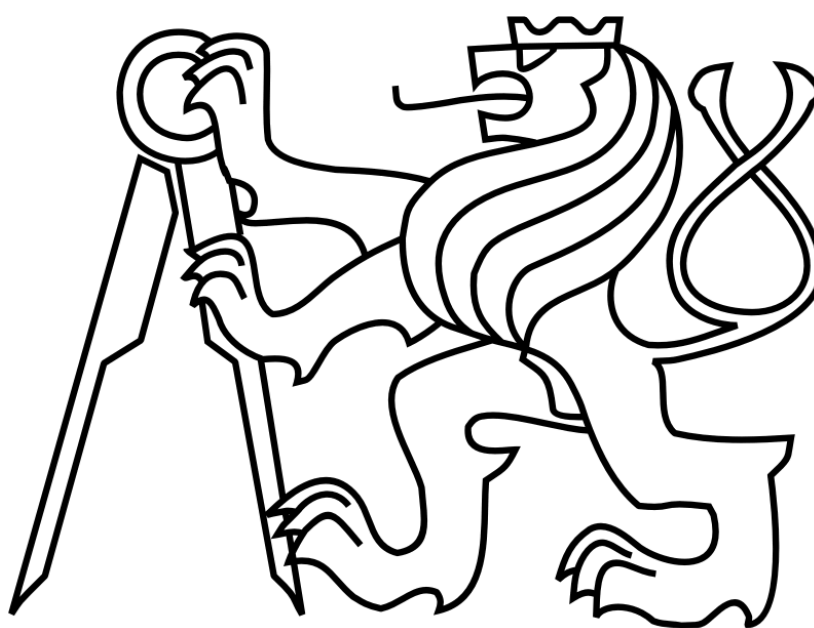


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra mechaniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.

Autor bakalářské práce:

Karolína Berková

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra mechaniky

Dynamická analýza lávky pro pěší v Dobřichovicích

Dynamic Analysis of the Footbridge in Dobřichovice

Autor bakalářské práce:

Karolína Berková

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.

Studijní program:

Stavební inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce a dopravní stavby



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Berková</u>	Jméno: <u>Karolína</u>	Osobní číslo: <u>424424</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra mechaniky</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Dynamická analýza lávky pro pěší v Dobřichovicích</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Dynamic Analysis of the Footbridge in Dobřichovice</u>	
Pokyny pro vypracování: Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitání Výpočet odezvy na zatížení chodci Návrh pohlcovačů kmitání	
Seznam doporučené literatury: Design of Footbridges, Research Fund for Coal and Steel, 2007 Serviceability Verification of Pedestrian Bridges Under Pedestrian Loading, Ivana Štimac Grandić, 2015	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Prof. Ing. Jiří Máca, CSc.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>24.2.2017</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>28.5.2017</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
<hr/> <p style="text-align: center;">Podpis vedoucího práce</p>	

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské 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“.</i>	
<u>24.2.2016</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Poděkování

Ráda bych poděkovala především svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Mácovi, CSc. za čas, který mi věnoval, trpělivost při konzultacích a velmi cenné rady. Také bych chtěla poděkovat za výběr vhodné lávky pro tuto bakalářskou práci.

Dále bych chtěla poděkovat firmě TopCon Servis s. r. o. za poskytnutí výkresové dokumentace.

Ráda bych také poděkovala zaměstnancům firmy Dlubal Software s. r. o. z pražské pobočky, především Ing. Petru Míchalovi a Ing. Jakubu Harazínovi, kteří byli vždy ochotni poradit ohledně programu Dlubal RFEM 5.08 a přídatného modulu RF – DYNAM. Jejich rady byly velmi cenné a užitečné.

Poděkování patří také mému spolužáku Adamu Čítkovi za poskytnutí výsledků z dynamické zkoušky provedené na lávce v Dobřichovicích.

Abstrakt

Tato práce se zabývá dynamickou analýzou lávky pro pěší v Dobřichovicích. Obsahuje dva rovinné modely konstrukce pro předběžné zjištění vlastních tvarů a frekvencí. Dále je vytvořen prostorový desko – prutový model, na kterém je stanovena dynamická odezva konstrukce na zatížení chodci. Následně je navrhnout pohlcovač kmitání.

Abstract

This thesis is concerned with the dynamic analysis of the footbridge in Dobřichovice. It includes two plane models of the construction, the purpose is to find out mode shapes and natural frequencies. The spatial plane – beam model is also included. This model is used to determine the dynamic response to loads of pedestrians. Subsequently a tuned mass damper is designed.

Klíčová slova

Lávka pro pěší, modální analýza, vlastní tvar, vlastní frekvence, vynucené kmitání, odezva, zatížení chodci, pohlcovač kmitání

Key words

Footbridge, modal analysis, mode shape, natural frequency, forced vibration, response, pedestrians load, tuned mass damper

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Dynamická analýza lávky pro pěší v Dobřichovicích vypracovala samostatně pod odborným vedením prof. Ing. Jiřího Máci, CSc. a všechny použité zdroje jsem uvedla v příloženém seznamu.

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíle práce	10
3	Popis konstrukce	11
4	Základní úlohy stavební dynamiky	15
4.1	Soustavy s jedním stupněm volnosti	15
4.2	Soustavy s více stupni volnosti	16
4.2.1	Vlastní netlumené kmitání	16
4.2.2	Vynucené tlumené kmitání	17
4.3	Zatížení chodci	17
4.4	Tlumení	17
4.4.1	Rayleighův útlum	17
4.4.2	Systémy pohlcování kmitání	18
5	Rovinné modely	19
5.1	Geometrie konstrukce	19
5.2	Model se zahrnutím tuhosti desky	20
5.2.1	Výpočet tuhostí jednotlivých průřezů	20
5.2.2	Hmoty	23
5.2.3	Vlastní tvary a frekvence	24
5.3	Model bez zahrnutí tuhosti desky	25
5.3.1	Výpočet tuhosti jednotlivých průřezů	25
5.3.2	Hmoty	26
5.3.3	Vlastní tvary a frekvence	28
5.4	Porovnání rovinných modelů	29
6	Prostorový model	30
6.1	Tvorba modelu	30
6.1.1	Použité materiály	30
6.1.2	Použité průřezy	31
6.1.3	Geometrie konstrukce	35
6.1.4	Hmoty	37
6.2	Vlastní tvary a frekvence	37
7	Porovnání výsledků	44

8	Odezva konstrukce na zatížení chodci	46
8.1	Tlumení konstrukce	46
8.2	Zatěžovací stavy.....	47
8.2.1	Zatěžovací stav 1	48
8.2.2	Zatěžovací stav 2	48
8.2.3	Zatěžovací stav 3	49
8.3	Výsledky.....	49
9	Pohlčovač kmitání	50
9.1	Návrh pohlčovače kmitání.....	50
9.2	Modelování pohlčovače kmitání	51
9.3	Výsledky.....	52
10	Závěr	53
11	Seznam obrázků	54
12	Seznam tabulek	56
13	Seznam použité literatury	57
14	Použitý software.....	58

1 Úvod

Vzhledem ke stále se zvyšujícímu důrazu na vzhled konstrukcí, vznikají často velmi subtilní konstrukce. Lávky nejsou výjimkou a jsou také velmi ovlivňovány vzhledem. V posledních letech je velkým trendem stavět lávky a mosty, které vypadají velmi působivě a jsou dominantou oblasti.

Ideální návrh lávky je takový, že žádná z vlastních frekvencí konstrukce není blízko krokové frekvence chodců a tím by nevznikala rezonance. To by byl opravdu ideální stav a u většiny lávek se takovým frekvencím vyhnout nejde a je tedy nutné tyto frekvence posoudit.

Moderní lávky pro pěší jsou často lehké a subtilní konstrukce, u kterých mohou první vlastní frekvence kmitání odpovídat převažujícímu dynamickému zatížení vlivem chůze nebo běhu [2]. Dynamické vlastnosti lávek mají velký vliv na životnost a spolehlivost konstrukce, ale také na komfort uživatelů lávky. Právě pohoda chodců je u lávek pro pěší důležitou součástí posouzení konstrukce. Už velmi dávno bylo zjištěno, že vliv chodců může způsobit nadměrné vibrace. Až v roce 2000 po nechvalně proslulém slavnostním otevření mostu Millenium Bridge v Londýně se začala pozornost věnovat i vodorovnému kmitání mostních konstrukci [11]. Tímto se ukázalo, že vodorovné kmitání má také velký vliv na použitelnost a spolehlivost konstrukce. V posledních letech se proto vlivu chodců věnovala velká pozornost. Po zkušenosti s Millenium Bridge byly do norem zapracovány i omezení vodorovného kmitání lávek.

2 Cíle práce

Úkolem této bakalářské práce bude vytvoření jednoduchého rovinného výpočetního modelu zavěšené lávky pro pěší v Dobřichovicích pro určení vlastních tvarů a frekvencí ve svislém směru pomocí softwaru Dlubal RFEM 5.08.

Dále bude vytvořen prostorový model lávky pro určení vlastních tvarů a frekvencí ve svislém, vodorovném i torzním směru. Tento model bude sloužit jako podklad pro provedení dynamické zkoušky na lávce.

Následně budou porovnány výsledky ze softwaru Dlubal RFEM 5.08 s výsledky vycházející z experimentální modální analýzy provedené na lávce v Dobřichovicích.

Bude stanovena odezva konstrukce na zatížení chodce pro kritické hodnoty vlastních frekvencí. Toto zatížení bude simulováno na prostorovém modelu harmonickými silami a následně bude vyhodnoceno. Při nevhodném kmitání konstrukce bude navržen pohlcovač kmitání.

3 Popis konstrukce

Nová lávka přes řeku Berounku v Dobřichovicích byla slavnostně otevřena 8. listopadu 2003. Tato nová zavěšená lávka nahradila původní příhradovou, která byla při povodni v srpnu 2002 zničena.

Lávka vede až ke křižovatce ulic 5. května a Anglická, na rozdíl od původní zničené lávky, která končila na začátku inundačního území. Z požadavku obce, aby lávka vedla až ke křižovatce, vyplynulo, že přemostění bylo zvoleno šikmo k toku řeky. Vybrán byl projekt firmy TopCon servis s.r.o. Hlavními projektanty byl Ing. Petr Dobrovský a Ing. Ondřej Lojík.

Jedná se o ocelovou trámovou konstrukci s dolní spřaženou železobetonovou mostovkou, nesymetricky zavěšenou na čtyřech dvojicích ocelových lan ukotvených na jednom vnitřním pylonu ve tvaru písmene „A“. Celková délka lávky je 183,60 m a rozpětí polí je 88 a 92 m. Podélný sklon je po délce proměnný – + 2,55 % ve staničení 0 – 63 m, 63 – 118 m výškový oblouk o poloměru 1097,7 m a 118 – 180 m sklon -2,40 %. Šířka nosné konstrukce je 3,80 m a šířka průchozího prostoru je 3,00 m. Na hlavních nosnících je umístěno ocelové zábradlí sahající do výšky 1300 mm od pochozí plochy. Lávka nenes žádnou inženýrskou síť.

Nosnou konstrukci tvoří dva hlavní ocelové (S 355 J2G3) podélné nosníky profilu I o výšce 1200 mm. V oblasti ukotvení lanových závěsů dochází ke zvětšení výšky nosníku na 1400 mm a zároveň ke změně průřezu na uzavřený průřez obdélníkového tvaru. Horní pásnice nosníků jsou zarovnané, navýšení probíhá u spodní pásnice průřezů. Osová vzdálenost hlavních nosníků je 3400 mm. Po dvou metrech v podélném směru jsou umístěny příčné nosníky s proměnnými průřezy po délce konstrukce. Příčné nosníky mají spodní pásnici zarovnanou se spodní pásní hlavního nosníku. V ose konstrukce je umístěn podélný nosník průřezu IPE 160, který probíhá mezi jednotlivými příčnými nosníky. S podélnými i příčnými nosníky je spřažena železobetonová deska (C 30/37 – XF1) s dostředným příčným sklonem – 1,50 % o proměnné tloušťce 120 – 142,5 mm. Vzdálenost mezi spřahovacími trny je proměnná. Odvodnění je

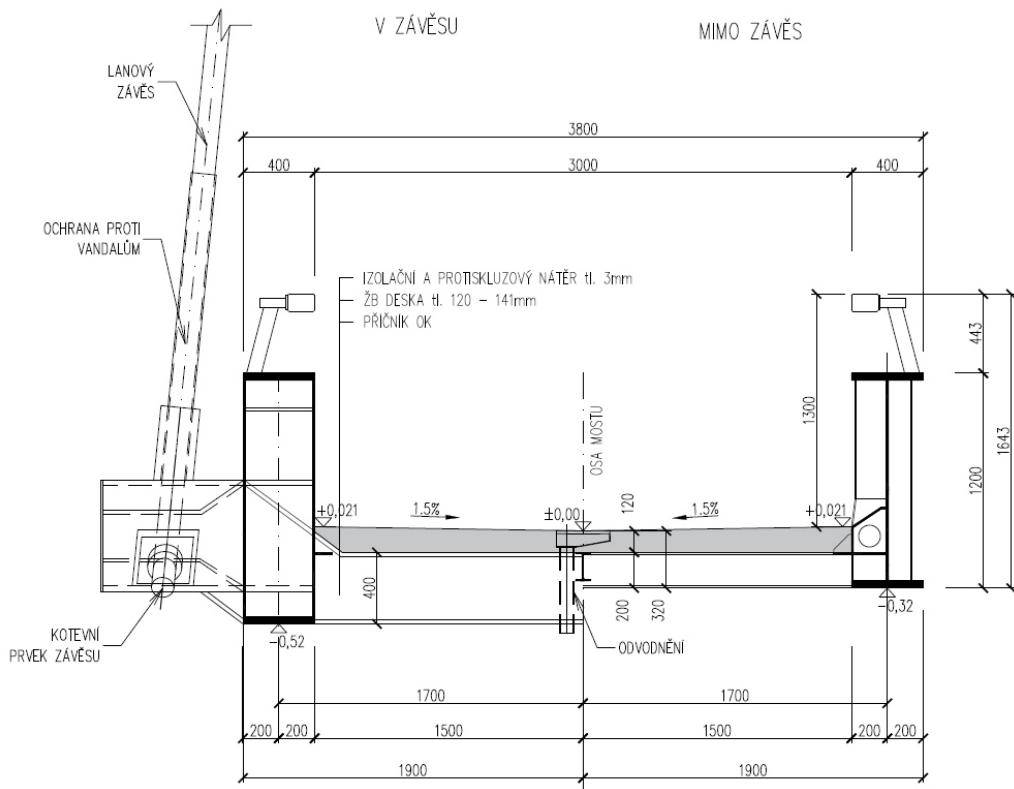
umožněno kombinací příčného a podélného sklonu. Odvodňovače jsou umístěny po 10 m v ose lávky.

Průřez pylonu ve tvaru písmene „A“ je po výšce proměnný. Obecně se jedná o uzavřený průřez obdélníkového (po spojení čtvercového) tvaru. Výška pylonu je 34,60 m. Ocelové lanové závěsy jsou opláštěny a chráněny před vandaly. Dvě delší dvojice závěsů jsou tvořeny z 16 lan a dvě kratší dvojice ze 14 lan 15,7 – 1570/1770.

Lávka je uložena na šesti ložiskách – dvou dvojicích podélně posuvných hrncových ložiskách na obou opěrách a na dvojici všesměrně pevných ložisek na pylonu. Každá z opěr je uložena na šesti mikropilotách. Do vzdálenosti 4 m od uložení na opěře je spodní strana konstrukce mezi příčníky vybetonována. Pylon je uchycen k železobetonovému základu kotevními šrouby.

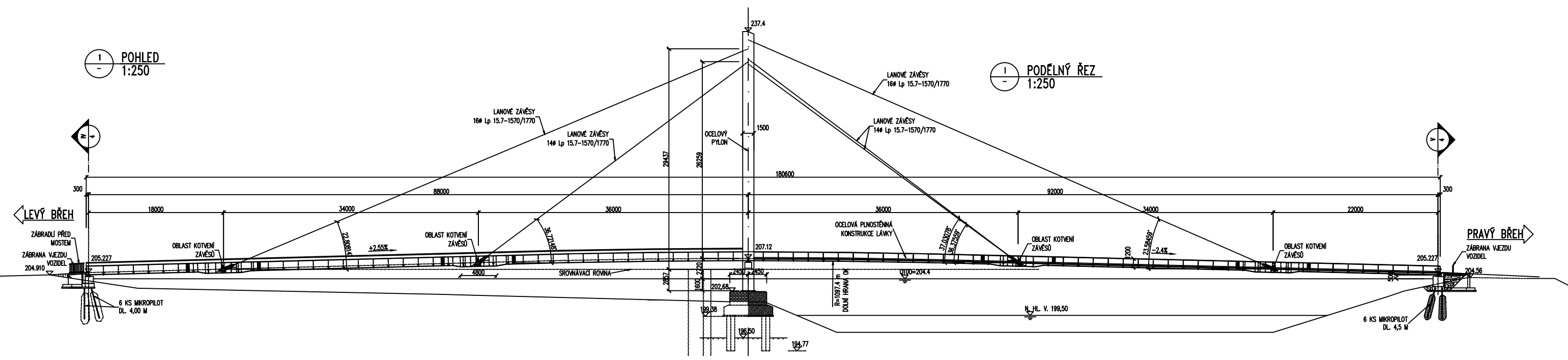
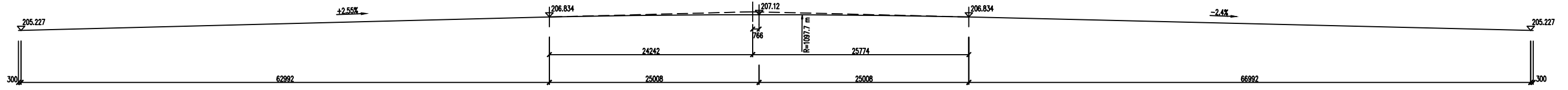


Obr. 3.1 Pohled na lávku z levého břehu řeky



Obr. 3.2 Příčný řez konstrukcí v místě závěsu a mimo závěs [8]

VÝŠKOVÝ PRŮBĚH NIVELETY



Obr. 3.3 Podélný řez a pohled a schéma průběhu nivelety [8]

4 Základní úlohy stavební dynamiky

Níže uvedeno v této kapitole je čerpáno ze zdrojů [6], [7], [10].

Dynamika je velmi důležitá část mechaniky. Na rozdíl od kinematiky, která popisuje pohyb, se dynamika zabývá příčinami vzniku pohybu. Základ dynamiky tvoří d'Alembertův princip a tři Newtonovy pohybové zákony – zákon setrvačnosti, zákon síly a zákon akce a reakce. D'Alembertův princip ekvivalentně vyjadřuje druhý Newtonův zákon – součet všech sil (včetně sil setrvačných) ve směru kmitání je roven nule.

Složitost dynamického výpočtu je určena počtem stupňů volnosti řešené soustavy. Při tvorbě výpočetního modelu je možné vytvořit soustavu s libovolným počtem stupňů volnosti (1 až nekonečno). Soustředěním hmot do konkrétních bodů vznikají diskrétní soustavy – soustavy s konečným počtem stupňů volnosti.

Veličinami určujícími dynamické vlastnosti konstrukce jsou tuhost k , hmotnost m a při tlumeném kmitání i útlum c .

4.1 Soustavy s jedním stupněm volnosti

Soustavy s jedním stupněm volnosti vznikají při soustředění hmoty do tzv. geometrického bodu, kdy je okamžitá poloha bodu určena jedinou nezávislou souřadnicí. Pohybová rovnice pro takovou soustavu lze vyjádřit:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (4.1)$$

Kde m je hmotnost, c součinitel tlumení, k tuhost, u výchylka a F je harmonická budící síla. Při volném kmitání je budící síla rovna nule. Nejjednodušší pohybovou rovnicí pro soustavu s jedním stupněm volnosti je rovnice volného netlumeného kmitání, kdy se útlum zanedbává a $c = 0$:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (4.2)$$

Pohybová rovnice volného kmitání se zanedbáním útlumu lze také zapsat pomocí amplitudy u_0 , vlastní kruhové frekvence ω_0 a fázového posunu φ_0 :

$$u(t) = u_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (4.3)$$

Tento pohyb se nazývá vlastní kmitání, soustava při něm kmitá vlastní frekvencí f_0 . Vlastní frekvence kmitání vyjadřuje počet kmitů za sekundu. Vlastní perioda kmitání T_0 vyjadřuje dobu kmitu. Vztah mezi těmito veličinami a vlastní kruhovou frekvencí ω_0 lze vyjádřit:

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (4.4)$$

Pro soustavu s jedním stupněm volnosti lze vyjádřit vlastní kruhovou frekvenci pomocí tuhosti a hmotnosti:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.5)$$

4.2 Soustavy s více stupni volnosti

4.2.1 Vlastní netlumené kmitání

Při vlastním netlumeném kmitání nepůsobí na soustavu žádné budící síly a útlum se zanedbává. Cílem je zjištění dynamických charakteristik soustavy – vlastní frekvence a příslušné tvary kmitání. Pohybovou rovnici lze vyjádřit:

$$\mathbf{K}u(t) + \mathbf{M}\ddot{u}(t) = 0 \quad (4.6)$$

kde \mathbf{K} je matice tuhosti, \mathbf{M} matice hmotnosti a u je vektor posunů a \ddot{u} je vektor zrychlení. Vektory posunů a zrychlení lze také zapsat pomocí vlastního tvaru Φ :

$$u(t) = \Phi(A \cos \omega t + B \sin \omega t) \quad (4.7)$$

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 u(t) \quad (4.8)$$

Dosazením do (4.6) a úpravou získáme rovnici:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\Phi = 0 \quad (4.9)$$

Pro kterou musí platit:

$$\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0 \quad (4.10)$$

Z tohoto vztahu lze určit všechny vlastní kruhové frekvence ω_n , kde n je počet stupňů volnosti dané soustavy. Následně lze po dosazení vlastní kruhové frekvence ω_n do (4.9) určit odpovídající vlastní tvar kmitání Φ_n .

4.2.2 Vynucené tlumené kmitání

Vynucené tlumené kmitání slouží ke stanovení dynamické odezvy systému. Při vynuceném kmitání působí na soustavu budící síly. Pohybová rovnice má tvar:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (4.11)$$

Kde $\mathbf{f}(t)$ je vektor budících sil a \mathbf{C} je matice útlumu. Rovnice se dá řešit přímou integrací nebo rozkladem do vlastních tvarů kmitání (modální analýzou).

4.3 Zatížení chodci

Pokud chodci budí konstrukci frekvencí blízké vlastní frekvenci konstrukce, je nutno tento stav posoudit. Zatížení chodci se obvykle zjednodušeně simuluje zatížením harmonickými silami v daném vlastním tvaru umístěnými v bodě s největší deformací v daném směru.

Při buzení konstrukce frekvencí s hodnotou odpovídající vlastní frekvenci může docházet ke snížení komfortu chodců nebo k překročení stavu použitelnosti konstrukce. Posuzované frekvence a způsob modelování zatížení chodců je uveden v kapitole 8.

4.4 Tlumení

Tlumení je schopnosti materiálu nebo konstrukce přeměnit kinematickou energii v jinou. Tato schopnost se projevuje zmenšováním výchylek kmitající konstrukce. Zdrojem tlumení je materiálový útlum (tření ve struktuře materiálu), strukturální útlum (na rozhraní 2 materiálů), konstrukční útlum (spoje) a tlumiče nebo pohlcovače kmitání.

4.4.1 Rayleighův útlum

Rayleighův proporcionální útlum je tzv. klasický útlum a vychází z lineární kombinace matic tuhosti a hmotnosti:

$$\mathbf{C} = \alpha \cdot \mathbf{M} + \beta \cdot \mathbf{K} \quad (4.12)$$

Kde α, β jsou koeficienty tlumení, které lze stanovit, známe-li hodnoty útlumu ξ_i a ξ_j pro dvě rozdílné kruhové frekvence ω_i a ω_j pomocí vztahu:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (4.13)$$

Za předpokladu, že první vlastní tvar je nejméně tlumen a známe-li koeficient poměrného útlumu ξ pouze pro první vlastní kruhovou frekvenci ω_1 , platí:

$$\alpha = \xi \cdot \omega_1, \quad \beta = \frac{\xi}{\omega_1} \quad (4.14)$$

4.4.2 Systémy pohlcování kmitání

Pasivní systém pohlcování kmitání je velmi vhodný pro vyhnutí se nežádoucím frekvencím konstrukce. Pasivní systém rozkmitává hmotu bez externího zdroje síly. Velkou výhodou je nízká cena, jednoduchost a spolehlivost. Nevýhodou je naopak omezená oblast frekvencí pro použití. Pasivní systémy pohlcování kmitání se používají i u obrovských staveb, např. Taipei 101 – těleso o hmotnosti 660 t (odpovídá 0,1 % hmotnosti budovy) umístěno ve výšce 380 m.

Aktivní systém pohlcovače kmitání má v systému řízený zdroj obecné síly, který dodává energii. Výhodou aktivního systému pohlcování kmitání je širší frekvenční oblast použití, za to velkou nevýhodou je cena a také spolehlivost.

Více informací ohledně návrhu použitého pohlcovače kmitání je uvedeno v kapitole 9.

5 Rovinné modely

Pro předběžné zjištění vlastních tvarů a frekvencí lávky ve svislém směru byl vytvořen zjednodušený rovinný model. Informace o materiálech a geometrii konstrukce byly převzaty z výkresové dokumentace poskytnuté společností TopCon Servis s. r. o.

Jedná se o konstrukci spřaženou – železobetonová deska je spřažena s příčnými nosníky. Deska není spřažena po celé své ploše, ale přispívá do tuhosti příčného řezu. Proto byly vytvořeny dva rovinné modely – první, který zahrnuje železobetonovou desku do tuhosti konstrukce po celé její délce, a druhý, který do tuhosti konstrukce desku nezahrnuje a zohledňuje pouze její hmotnost. Předpokladem je, že model se zahrnutím tuhosti bude mít vyšší vlastní frekvence, než jsou skutečné hodnoty a naopak model bez zohlednění desky bude mít tyto hodnoty nižší.

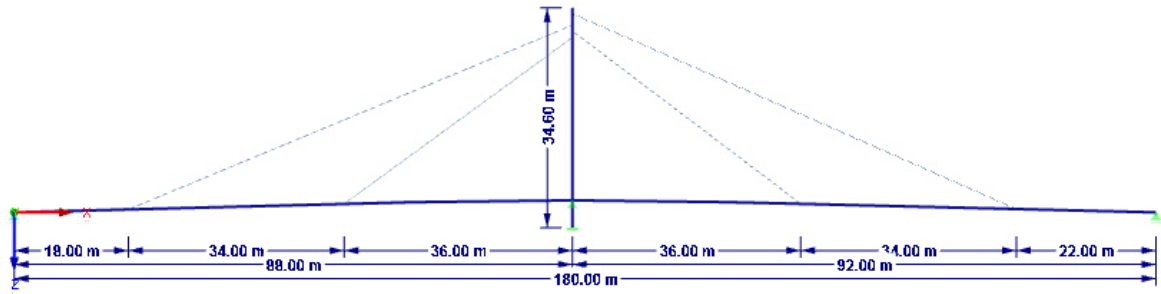
5.1 Geometrie konstrukce

Konstrukce byla modelována směrem od levého břehu ve sklonu 2,55 % ve staničení 0,00 – 63,00 m. Dle výkresové dokumentace by měl být ve staničení 63,00 – 113,00 m oblouk, modelován nebyl oblouk, ale sečny tak, aby niveleta lávky výškově odpovídala ve staničení 63,00, 88,00 a 113,00 m. Poté byla vymodelována poslední část vodorovné konstrukce ve staničení 113,00 – 180,00 m se sklonem -2,40 %. Schéma je zobrazeno na Obr. 5.1.

Vodorovná konstrukce je podepřena na třech místech – ve staničení 0,00 a 180,00 m na kloubových podporách posuvných v podélném směru a ve staničení 88,00 m na pevné kloubové podpoře.

Ve staničení 88,00 m byl vymodelován pylon s výškou 34,60 m od svého uložení. V horní části pylonu byla zakotvena 4 lana – do každého pole 2. Uložení pylonu bylo uvažováno jako vetknutí.

Geometrie konstrukce byla v obou modelech uvažována a modelována stejná.



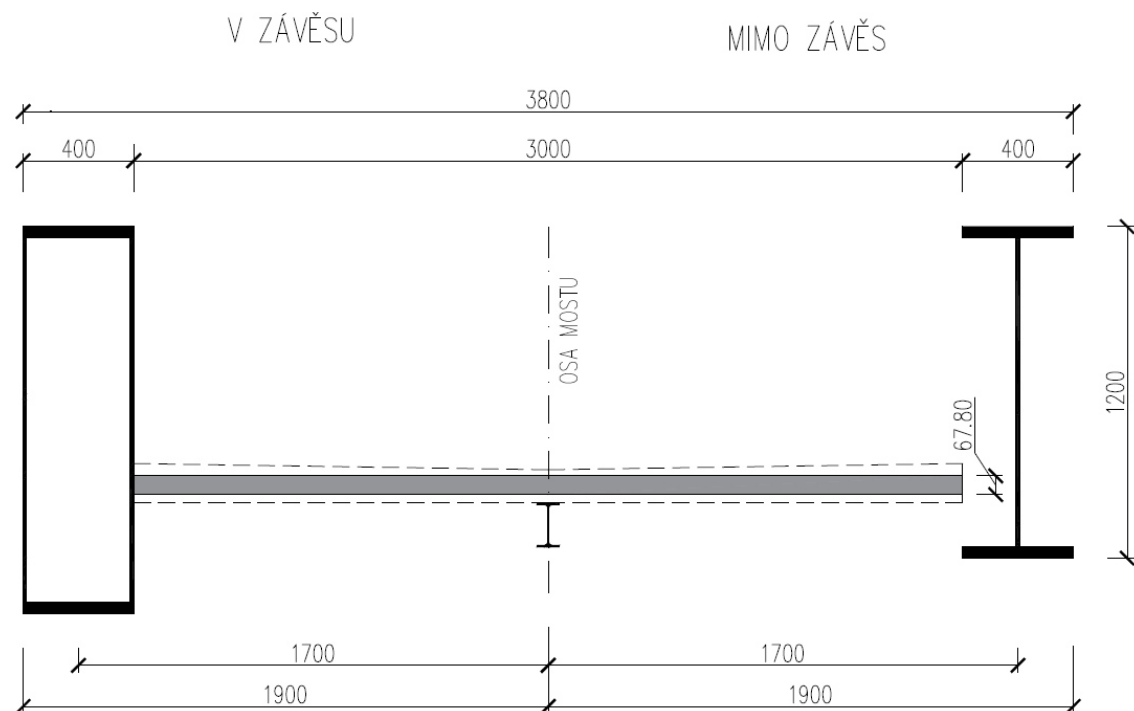
Obr. 5.1 Schéma rovinných modelů

5.2 Model se zahrnutím tuhosti desky

5.2.1 Výpočet tuhostí jednotlivých průřezů

Byl vytvořen zidealizovaný příčný řez (zobrazený na Obr. 5.2) zahrnující hlavní podélné svařované nosníky průřezu I (v místě závěsu uzavřený průřez), podélný nosník IPE 160 a železobetonovou desku, resp. upravenou ocelovou desku.

Složený průřez je tvořen prvky z oceli S 355 (nosníky) a z železobetonové desky (C 30/37 – XF1). Bylo proto zvoleno, že bude složený průřez uvažován z oceli S 355 s modulem pružnosti $E_y = 210 \text{ GPa}$ a objemovou hmotností $\rho_y = 78500 \text{ kg/m}^3$.



Obr. 5.2 Uvažovaný příčný řez pro rovinný model se zahrnutím tuhosti desky [8] - upraveno

Železobetonová deska šířky $s = 3000$ mm s proměnnou tloušťkou 120 – 142,5 mm (znázorněna na Obr. 5.2 čárkovanou čarou) byla „převedená“ na desku ocelovou (zobrazena na Obr. 5.2 šedou plochou) se stejnou ohybovou tuhostí jako deska železobetonová. Modul pružnosti betonu byl uvažován $E_c = 33$ GPa a objemová hmotnost $\rho_c = 2500$ kg/m³. Následně byla tloušťka desky přepočítána pomocí poměru modulů pružnosti betonu a oceli a momentů setrvačnosti.

$$E_c I = E_y I_{\text{náhradní}} \quad (5.1)$$

Z momentu setrvačnosti $I_{\text{náhradní}}$ byla poté spočítána tloušťka desky $t_{\text{náhradní}} = 67,80$ mm a následně i plocha. Ohybová tuhost desky tímto výpočtem byla zachována. Pro zachování tuhosti celého složeného průřezu, byla nově přepočítaná deska umístěna tak, aby její těžiště leželo v těžišti desky původní, tzn. 940 mm pod horní pásnicí hlavního nosníku v ose konstrukce.

Stejným způsobem byla přepočítána i tloušťka desky vybetonované mezi příčníky u opěry do vzdálenosti 4 m od uložení. Původní tloušťka betonové desky byla 200 mm s těžištěm 1100 mm od horní pásnice hlavního nosníku v ose konstrukce. Náhradní tloušťka byla určena na hodnotu $t_{\text{náhradní}} = 107,93$ mm.

Vodorovná konstrukce má proměnný průřez, resp. hlavní nosníky mají proměnný průřez po délce konstrukce. Celkem je na lávce 5 různých průřezů hlavních nosníků – 4 svařované I průřezy s proměnnými tloušťkami stojiny (12 a 14 mm) a pásnice (25, 30 a 40 mm) a uzavřený průřez v okolí závěsů. Dále bylo zohledněno vybetonování u opěr mezi příčníky u opěr. Tuhosti byly spočítány pro 6 typů průřezů. Výpočet tuhostí jednotlivých průřezů vodorovné nosné konstrukce je v tabulce Tab. 5.2.

Vlivem přepočtu železobetonové desky na desku ocelovou by byla hmotnost vyšší než skutečná. Na základě hodnoty přebývající hmoty (uvedeno v Tab. 5.2) byly změny objemové hmotnosti materiálů jednotlivých průřezů – Tab. 5.1.

průřez	1200/400/12/30 1200/400/12/30 IPE 160 "ocelová" deska	1200/400/12/25 1200/400/12/25 IPE 160 "ocelová" deska	1200/400/12/40 1200/400/12/40 IPE 160 "ocelová" deska	1200/400/14/40 1200/400/14/40 IPE 160 "ocelová" deska	uzavřený 1400/400/12/40 uzavřený 1400/400/12/40 IPE 160 "ocelová" deska	1200/400/12/30 1200/400/12/30 IPE 160 deska u opěry "ocelová" deska
objemová hmotnost [kg/m ³]	5 169,79	5 100,49	5 298,41	5 333,27	5 557,05	4 877,79

Tab. 5.1 Přepočítané hodnoty objemových hmotností pro rovinný model se zahrnutím tuhosti desky

Průřez	Ai[mm2]	Iy[mm4]	Ty[mm]	Tzi[mm]	Sy[mm3]	Sz[mm3]	A[mm2]	Ty[mm]	Tz[mm]	Tyi[mm]	Tzi[mm]	Iy[mm4]	m[kg/m]	m[kg/m]
1.	I 1200/400/12/30	37 680,00	9 696 744 000,00	200	600					-1 700,00	-257,69			
	I 1200/400/12/30	37 680,00	9 696 744 000,00	3 600	600	264 074 520	307 889	1 900	857,69	1 700,00	-257,69	26 145 359 667	2 416,93	přebývající hmota vlivem přepočtu betonu na ocel
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	222,31			
"ocelová" deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940						0,00	82,31			-825,21
2.	I 1200/400/12/25	33 800,00	8 425 041 666,67	200	600					-1 700,00	-264,36			
	I 1200/400/12/25	33 800,00	8 425 041 666,67	3 600	600	259 418 520	300 129	1 900	864,36	1 700,00	-264,36	23 073 319 603	2 356,01	
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	215,64			
"ocelová" deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940					0,00	75,64				-825,21
3.	I 1200/400/12/40	45 440,00	12 173 994 666,67	200	600					-1 700,00	-245,33			
	I 1200/400/12/40	45 440,00	12 173 994 666,67	3 600	600	273 386 520	323 409	1 900	845,33	1 700,00	-245,33	32 081 026 110	2 538,76	
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	234,67			
"ocelová" deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940					0,00	94,67				-825,21
4.	I 1200/400/14/40	47 680,00	12 408 149 333,33	200	600					-1 700,00	-241,98			
	I 1200/400/14/40	47 680,00	12 408 149 333,33	3 600	600	276 074 520	327 889	1 900	841,98	1 700,00	-241,98	32 815 282 825	2 573,93	
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	238,02			
"ocelová" deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940					0,00	98,02				-825,21
5.	uzavřený 1400/400/12/40	63 680,00	19 401 002 666,67	200	700					-1 700,00	-155,85			
	uzavřený 1400/400/12/40	63 680,00	19 401 002 666,67	3 600	700	308 010 520	359 889	1 900	855,85	1 700,00	-155,85	43 715 392 193	2 825,13	
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	224,15			
"ocelová" deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940					0,00	84,15				-825,21
6.	I 1200/400/12/30	37 680,00	9 696 744 000,00	200	600					-1 700,00	-389,45			
	I 1200/400/12/30	37 680,00	9 696 744 000,00	3 600	600	667 719 739	674 839	1 900	989,45	1 700,00	-389,45	31 490 221 563	5 297,49	
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	90,55			
deska u opěry	366 950,20	356 190 476,19	1 900	1 100						0,00	110,55			-1 180,56
"ocelová" deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940						0,00	-49,45			-825,21

Tab. 5.2 Přehled výpočtu momentů setrvačnosti příčných řezů vodorovné konstrukce pro zachování ohybové tuhosti pro rovinný model s vlivem tuhosti desky

Pro pylon bylo také nutné přepočítat tuhosti pro rovinný model. Zde byl výpočet o poznání jednodušší, jednalo se pouze o součet tuhostí „nohou“ pylonu. V části, kde pylon tvoří jediný průřez, nebylo nutné tuhost přepočítávat. Pylon má po výšce proměnný průřez a je celý vyroben z ocele S 355, nebylo proto nutné přepočítávat ani materiálové charakteristiky – $E = 210 \text{ GPa}$, $\rho = 78500 \text{ kg/m}^3$.

Průřez	$A_i[\text{mm}^2]$	$I_{yi}[\text{mm}^4]$	$A[\text{mm}^2]$	$I_y[\text{mm}^4]$	$m[\text{kg/m}]$
pylon 1	1 001,60	26 830 825 500	2 003,20	53 661 651 000	15,73
pylon 2	1 106,56	37 123 084 300	2 213,12	74 246 168 600	17,37
pylon 3	996,16	30 339 855 100	1 992,32	60 679 710 200	15,64
pylon 4	1 280,80	46 553 538 600	1 280,80	46 553 538 600	10,05
pylon 5	1 240,80	44 303 405 100	1 240,80	44 303 405 100	9,74

Tab. 5.3 Přehled výpočtu momentů setrvačnosti pro zachování ohybové tuhosti průřezů pylonu

Závěsy lávky jsou kotveny ve více rovinách, proto bylo nutné i zde udělat přepočet tuhosti pro rovinný model. Každé dvojici lan bylo přiřazeno lano s náhradním poloměrem. Lana byla vymodelována z materiálu předpínací ocel 1570/1770 s materiálovými charakteristikami – $E = 195 \text{ GPa}$, $\rho = 78500 \text{ kg/m}^3$.

Průřez	$r[\text{mm}]$	$A[\text{mm}^2]$	$r_{\text{náhr}}[\text{mm}]$
kratší závěsy	25	3926,991	35,36
delší závěsy	27	4580,442	38,18

Tab. 5.4 Přehled výpočtu náhradních poloměrů pro zachování normálové tuhosti

5.2.2 Hmoty

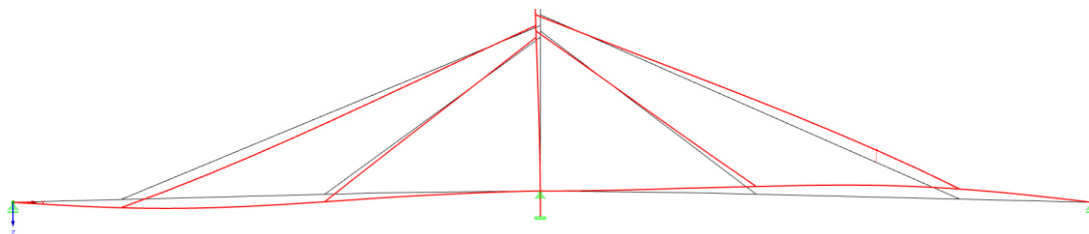
Všechny pruty jsou přiřazeny k materiálu, který má určenou objemovou hmotnost, program spočítá hmotnost konstrukce.

Vzhledem k tomu, že je model rovinný, nebylo možné v něm vymodelovat příčné nosníky. Na vodorovné konstrukci se nacházejí po 2 m v podélném směru. Do těchto bodů byly umístěny soustředěné hmoty. Stejně tak byly hmoty přidány na místa příčných nosníků na pylonu, tzn. v místě ložisek (3,55 m od paty pylonu) a ve výšce 15,00 m od paty pylonu.

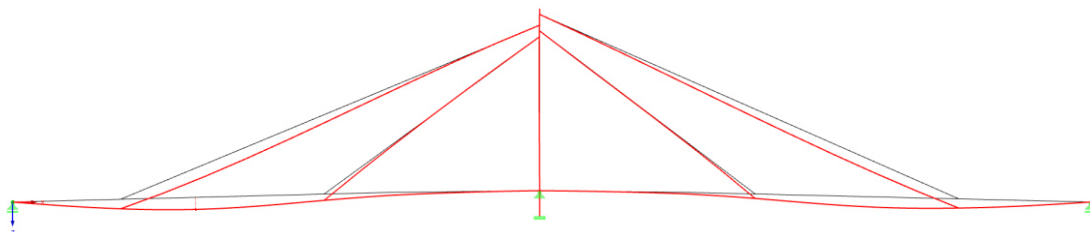
Dále byla přidána hmota 24 kg/m na vodorovnou konstrukci, tato hmota představuje zatížení od zábradlí. Skutečná hmotnost zábradlí nebyla zjištěna, tato hodnota byla odhadnuta.

5.2.3 Vlastní tvary a frekvence

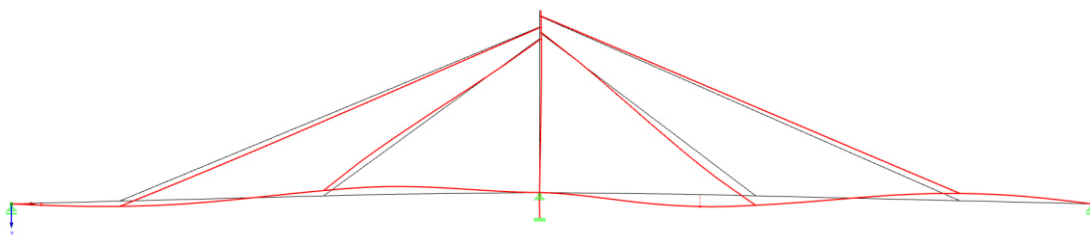
Po vytvoření modelu v Dlubal RFEM 5.08 byl spuštěn výpočet v přídatném modulu RF – DYNAM Pro. Bylo zjištěno prvních 6 vlastních tvarů kmitání ve svislém směru.



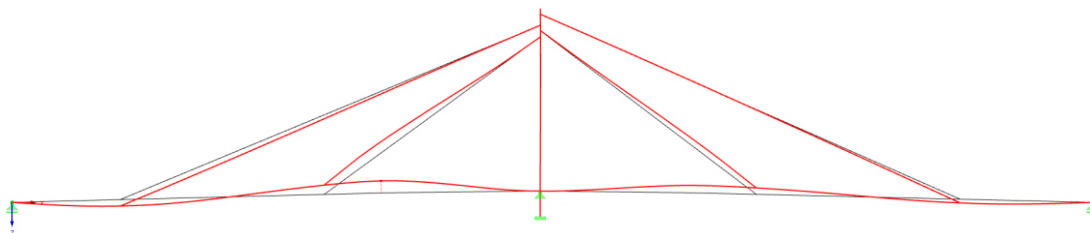
Obr. 5.3 1. vlastní tvar - 0,654 Hz



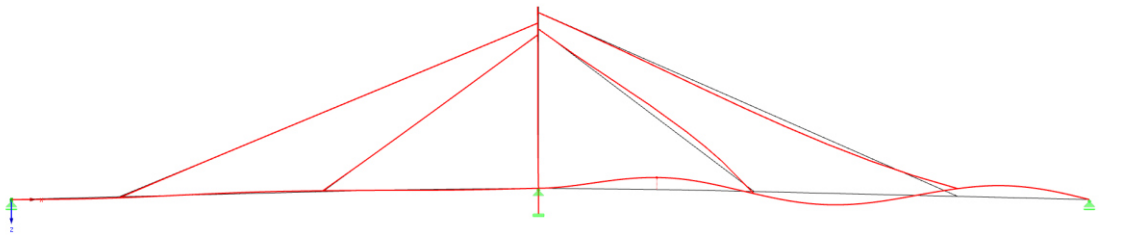
Obr. 5.4 2. vlastní tvar - 1,196 Hz



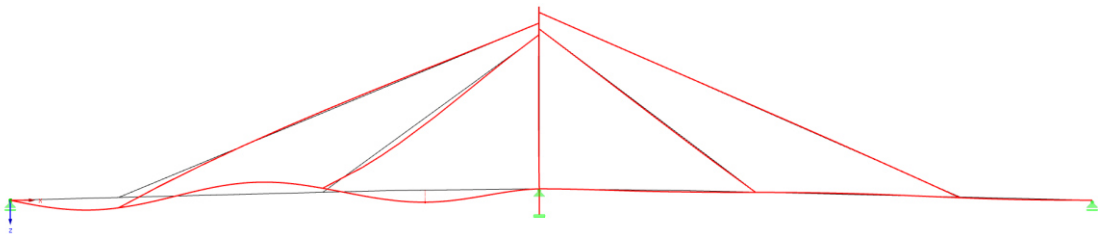
Obr. 5.5 3. vlastní tvar - 2,061 Hz



Obr. 5.6 4. vlastní tvar - 2,209 Hz



Obr. 5.7 5. vlastní tvar - 3,490 Hz



Obr. 5.8 6. vlastní tvar - 3,825 Hz

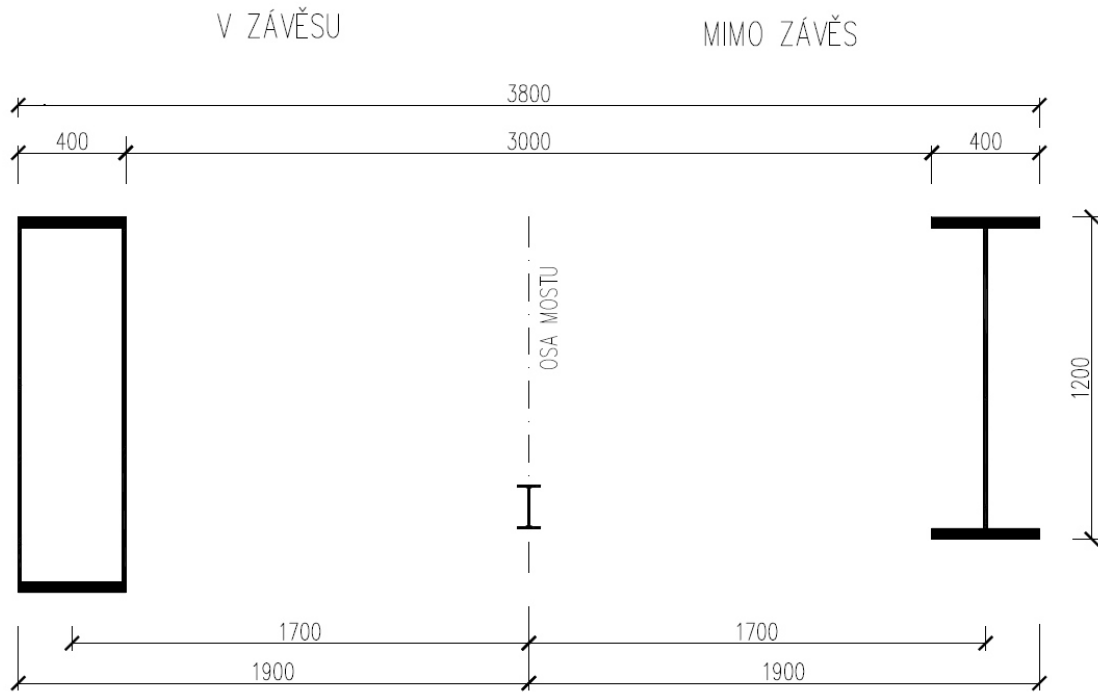
Podle očekávání se v prvních vlastních frekvencích objevují hodnoty, které mohou být nebezpečné pro lávky pro pěši – 3. vlastní tvar s hodnotou vlastní frekvence 2,061 Hz. Dále je zde vidět pravidelnost nesymetrických a symetrických tvarů a také to, jak se se zvyšující vlastní frekvencí zvětšuje složitost vlastního tvaru.

5.3 Model bez zahrnutí tuhosti desky

5.3.1 Výpočet tuhosti jednotlivých průřezů

Byl vytvořen zidealizovaný příčný řez (zobrazený na Obr. 5.8) zahrnující hlavní podélné svařované nosníky průřezu I (v místě závěsu uzavřený průřez) a podélný nosník IPE 160. Celý složený průřez je tvořen z oceli S 355 s materiálovými charakteristikami – $E = 210 \text{ GPa}$ a $\rho = 78500 \text{ kg/m}^3$. Výpočet tuhostí jednotlivých průřezů vodorovné nosné konstrukce je v tabulce Tab. 5.5.

Tloušťka betonové desky u opěr byla přepočítána stejným způsobem jako je uvedeno v kapitole 5.2.1. Náhradní tloušťka „ocelové“ desky je $t_{\text{náhradní}} = 107,93 \text{ mm}$. Těžiště bylo zachováno na stejném místě jako před přepočtem pro zachování tuhosti celého složeného průřezu. Tímto přepočtem vznikla deska stejně tuhá v ohybu, ale těžší než skutečná betonová deska, proto byla přepočítána objemová hmotnost průřezu $\rho_{\text{náhradní}} = 5192,99 \text{ kg/m}^3$.



Obr. 5.9 Uvažovaný příčný řez pro rovinný model bez zahrnutí tuhosti desky [8] - upraveno

Výpočet tuhostí pylonu a závěsů byl stejný jako u modelu s vlivem tuhosti desky. Popis a tabulky přehledu výpočtu jsou uvedeny v kapitole 5.2.1. (Tab. 5.3 a Tab. 5.4)

5.3.2 Hmoty

Všechny pruty jsou přiřazeny k materiálu, který má určenou objemovou hmotnost, program spočítá hmotnost konstrukce.

V tomto modelu je na rozdíl od modelu předcházejícího je deska zahrnuta pouze do hmotnosti konstrukce. Byla proto přidána hmota 984,38 kg/m na vodorovnou konstrukci.

Vzhledem k tomu, že je model rovinný, nebylo možné v něm vymodelovat příčné nosníky. Na vodorovné konstrukci se nacházejí po 2 m v podélném směru. Do těchto bodů byly umístěny soustředěné hmoty. Stejně tak byly hmoty přidány na místa příčných nosníků na pylonu, tzn. v místě ložisek (3,55 m od paty pylonu) a ve výšce 15,00 m od paty pylonu.

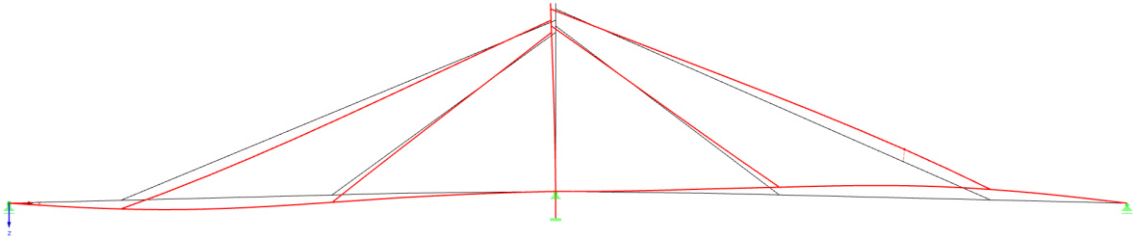
Dále byla přidána hmota 24 kg/m na vodorovnou konstrukci, tato hmota představuje zatížení od zábradlí. Skutečná hmotnost zábradlí nebyla zjištěna, tato hodnota byla odhadnuta.

Průřez	Ai[mm2]	Iy[mm4]	Ty[mm]	Tz[mm]	Sy[mm3]	Sz[mm3]	A[mm2]	Ty[mm]	Tz[mm]	Ty1[mm]	Tz1[mm]	Iy[mm4]	mi[kg/m]	m[kg/m]
1.	I1200/400/12/30	37 680,00	9 696 744 000,00	200	600					-1 700,00	-12,46			
	I1200/400/12/30	37 680,00	9 696 744 000,00	3 600	600	47 385 720	147 001 100	1 900	612,46	1 700,00	-12,46	19 853 035 405	607,35	chybějící hmota vlivem přepočtu betonu na ocel
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	467,54		984,38	
2.	ŽB deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940									
	I1200/400/12/25	33 800,00	8 425 041 666,67	200	600					-1 700,00	-13,85			
	I1200/400/12/25	33 800,00	8 425 041 666,67	3 600	600	42 729 720	132 257 100	1 900	613,85	1 700,00	-13,85	17 308 290 841	546,43	
3.	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	466,15		984,38	
	ŽB deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940									
	I1200/400/12/40	45 440,00	12 173 994 666,67	200	600					-1 700,00	-10,38			
4.	I1200/400/12/40	45 440,00	12 173 994 666,67	3 600	600	56 697 720	176 489 100	1 900	610,38	1 700,00	-10,38	24 809 544 920	729,18	
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	469,62		984,38	
	ŽB deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940									
5.	I1200/400/14/40	47 680,00	12 408 149 333,33	200	600					-1 700,00	-9,90			
	I1200/400/14/40	47 680,00	12 408 149 333,33	3 600	600	59 385 720	185 001 100	1 900	609,90	1 700,00	-9,90	25 278 314 865	764,35	
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	470,10		984,38	
6.	ŽB deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940									
	uzavřený 1400/400/12/40	63 680,00	19 401 002 666,67	200	700					-1 700,00	-5,90			
	uzavřený 1400/400/12/40	63 680,00	19 401 002 666,67	3 600	700	91 321 720	245 801 100	1 900	705,90	1 700,00	-5,90	39 096 292 912	1 015,55	
6.	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	374,10		984,38	
	ŽB deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940									
	I1200/400/12/30	37 680,00	9 696 744 000,00	200	600					-1 700,00	-415,11			
6.	I1200/400/12/30	37 680,00	9 696 744 000,00	3 600	600	451 030 939	844 206 478	1 900	1 015,11	1 700,00	-415,11	35 396 945 729	3 487,91	
	IPE 160	2 009,00	8 693 000,00	1 900	1 080					0,00	64,89			
	deska u opěry	366 950,20	356 190 476,19	1 900	1 100					0,00	84,89			-1 180,56
ŽB deska	230 520,00	77 916 438,00	1 900	940									984,38	

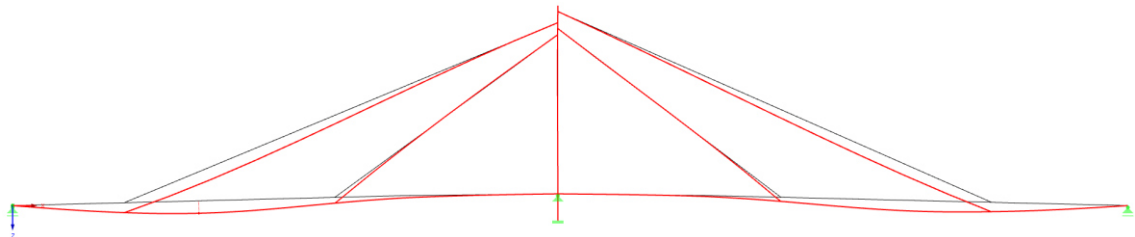
Tab. 5.5 Přehled výpočtu momentů setrvačnosti příčných řezů vodorovné konstrukce pro zachování ohybové tuhosti pro rovinný model bez vlivu tuhosti desky

5.3.3 Vlastní tvary a frekvence

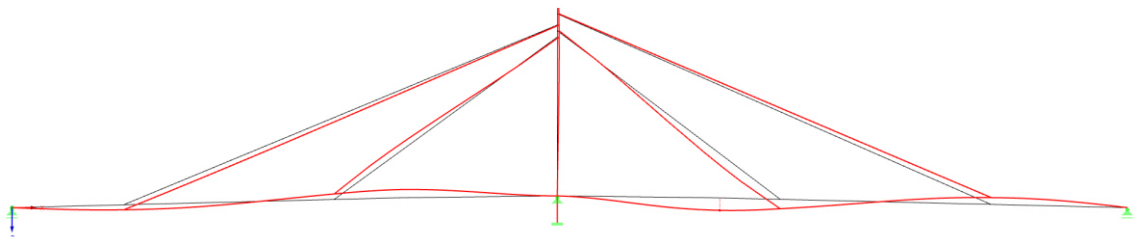
Po vytvoření modelu v Dlubal RFEM 5.08 byl spuštěn výpočet v přídatném modulu RF – DYNAM Pro. Bylo zjištěno prvních 6 vlastních tvarů kmitání ve svislém směru.



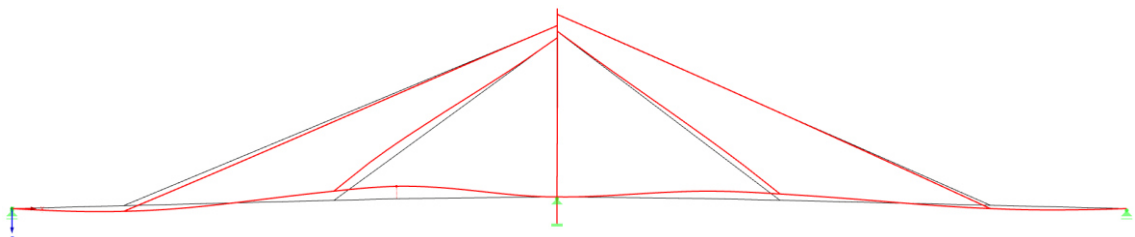
Obr. 5.10 1. vlastní tvar - 0,602 Hz



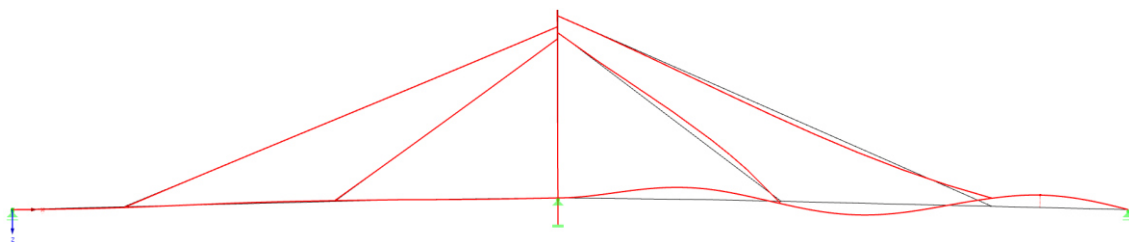
Obr. 5.11 2. vlastní tvar - 1,131 Hz



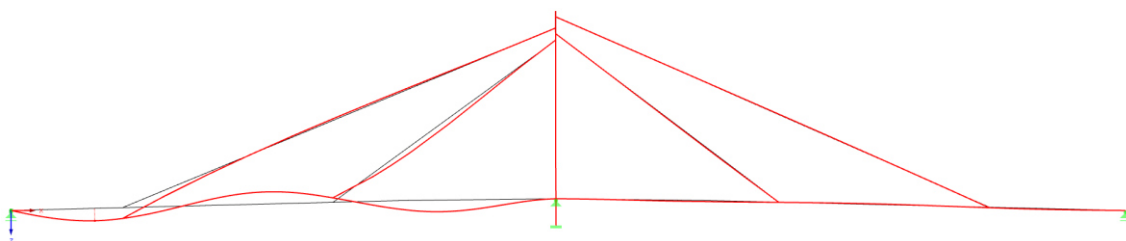
Obr. 5.12 3. vlastní tvar - 1,911 Hz



Obr. 5.13 4. vlastní tvar - 2,062 Hz



Obr. 5.14 5. vlastní tvar - 3,087 Hz



Obr. 5.15 6. vlastní tvar - 3,393 Hz

5.4 Porovnání rovinných modelů

Dle předpokladů se vlastní tvary v obou modlech shodují. V prvních 6 vlastních tvarech se objevují 3 ohybové tvary symetrické a 3 nesymetrické. První ohybový tvar má v každém poli jednu vlnu, druhý vlny dvě a třetí vlny tři.

Také bylo očekáváno, že rovinný model s vlivem tuhosti desky bude tužší a tudíž jeho vlastní frekvence budou mít vyšší hodnoty, tento předpoklad byl také splněn.

Již z předběžného zjištění vlastních tvarů a frekvencí je patrné, že bude nutné posoudit 3. a 4. vlastní tvar s frekvencemi kolem 2 Hz na zatížení chodci.

V tabulce Tab. 5.6 je srovnání vlastních frekvencí obou rovinných modelů.

č. vlastního tvaru	typ vlastního tvaru	f_i [Hz]		rozdíl mezi rovinnými modely [%]
		s vlivem tuhosti desky	bez vlivu tuhosti desky	
1	1. nesymetrický ohyb	0,654	0,602	8,64
2	1. symetrický ohyb	1,196	1,131	5,75
3	2. nesymetrický ohyb	2,061	1,911	7,85
4	2. symetrický ohyb	2,209	2,062	7,13
5	3. nesymetrický ohyb	3,49	3,087	13,05
6	3. symetrický ohyb	3,825	3,393	12,73

Tab. 5.6 Porovnání vlastních frekvencí rovinných modelů

6 Prostorový model

Prostorový model je pro zjištění vlastních tvarů a frekvencí velmi důležitý. Lávku je nutné řešit jako prostorovou konstrukci, protože je nutné posoudit nejen tvary ve svislém směru, ale také ve směru vodorovném a torzním, případně jejich kombinace.

Informace o materiálech a geometrii konstrukce byly převzaty z výkresové dokumentace poskytnuté společností TopCon Servis s. r. o.

6.1 Tvorba modelu

Bylo zvoleno, že model bude desko – prutový. Všechny prvky jsou určeny jako pruty až na železobetonovou spřaženou desku a desku vybetonovanou v okolí opěr. Vzhledem ke složitosti konstrukce musely být některé prvky zjednodušeny, případně zanedbány.

6.1.1 Použité materiály

V prostorovém modelu byly použity celkem čtyři materiály:

Nejvíce prvků konstrukce je z oceli S 355 J2G3. Materiálové charakteristiky – modul pružnosti $E = 210 \text{ GPa}$, objemová hmotnost $\rho = 7850 \text{ kg/m}$. Z oceli jsou tvořeny průřezy hlavních podélných nosníků, příčné nosníky, průřezy pylonu a nosník IPE 160.

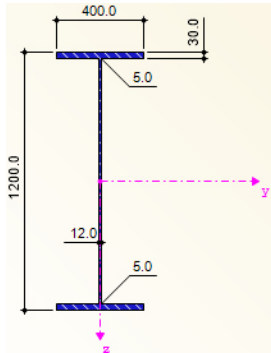
Na lanové závěsy byly použity předpínací ocelová lana 1570/1770. Materiálové charakteristiky – $E = 195 \text{ GPa}$, $\rho = 7850 \text{ kg/m}$.

Pro vybetonování mezi příčníky v okolí opěr byl zvolen materiál beton C 30/37. Materiálové charakteristiky – $E = 33 \text{ GPa}$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}$.

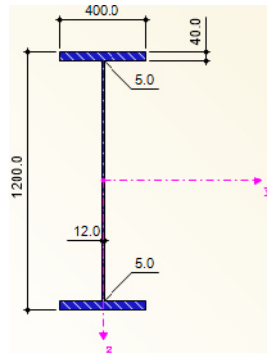
Pro železobetonovou desku byla upravena objemová hmotnost materiálu beton C 30/37. Vzhledem k systému vytváření modelu v softwaru, musela být deska vymodelována s šířkou 3,40 m a tloušťkou 131 mm. Ve skutečnosti je deska široká 3,00 m s průměrnou tloušťkou 131 mm. Pro zachování hmoty a tuhosti byla upravena hodnota objemové hmotnosti. Materiálové charakteristiky – $E = 33 \text{ GPa}$, $\rho = 2210 \text{ kg/m}$.

6.1.2 Použité průřezy

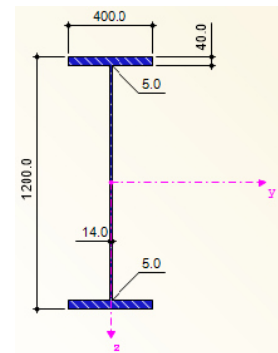
V prostorovém modelu bylo použito celkem 22 různých průřezů prutů a dvě tloušťky desek. Pro zjednodušení a lepší přehlednost jsou průřezy hlavních nosníků znázorněny na Obr. 6.1 až Obr. 6.5., průřezy příčných nosníků na Obr. 6.6 až Obr. 6.11.



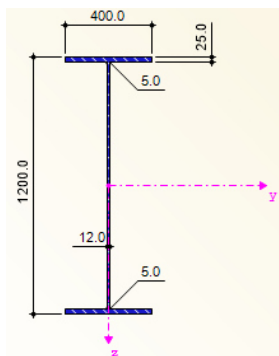
Obr. 6.1 Hlavní nosník 1



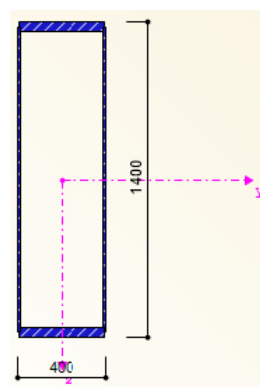
Obr. 6.2 Hlavní nosník 2



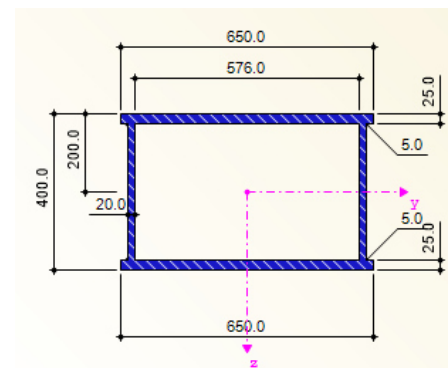
Obr. 6.3 Hlavní nosník 3



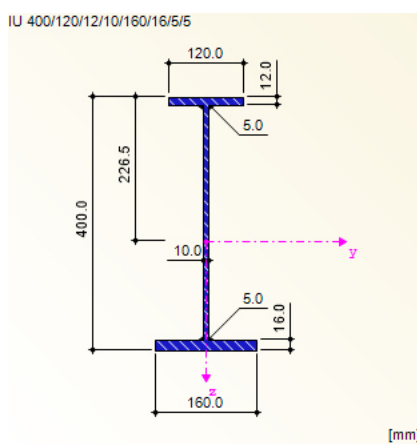
Obr. 6.4 Hlavní nosník 4



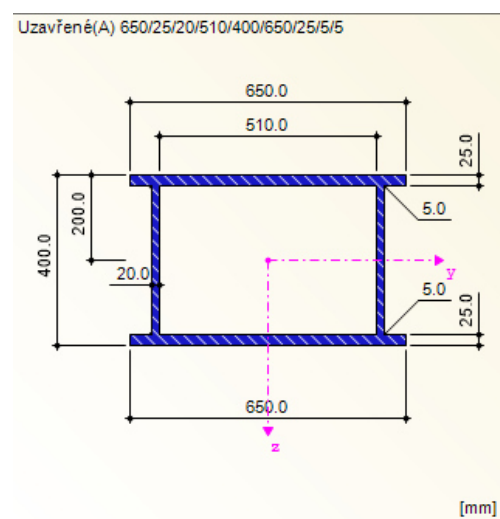
Obr. 6.5 Hlavní nosník 5



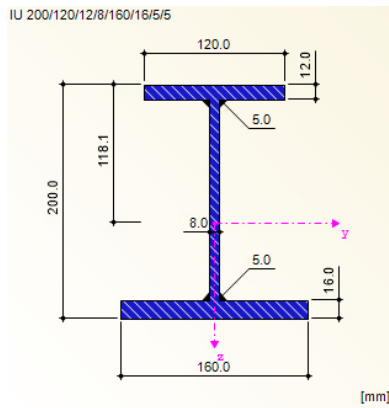
Obr. 6.6 Příčný nosník E



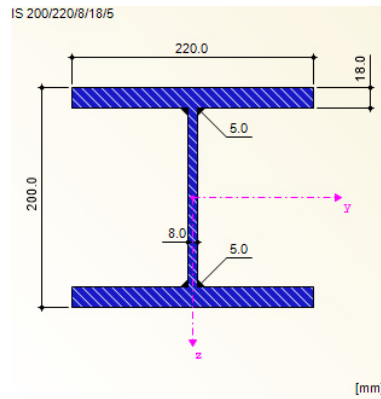
Obr. 6.4 Příčný nosník B



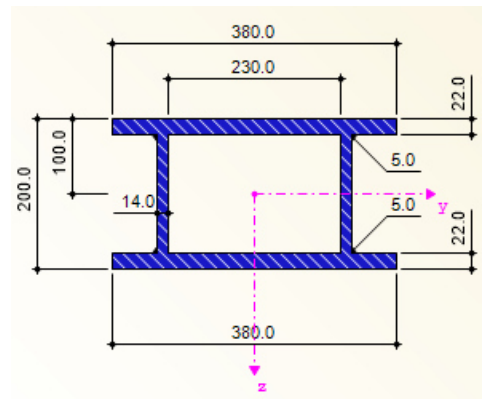
Obr. 6.5 Příčný nosník C



Obr. 6.6 Příčný nosník A+F

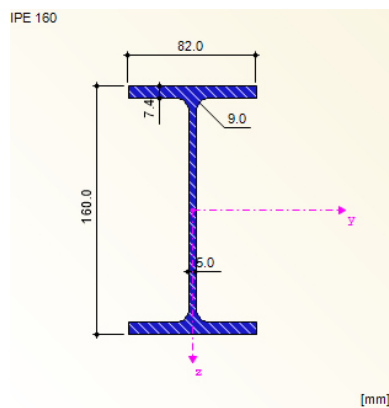


Obr. 6.7 Příčný nosník G

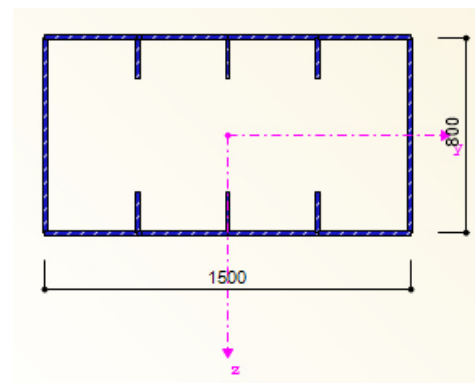


Obr. 6.8 Příčný nosník D

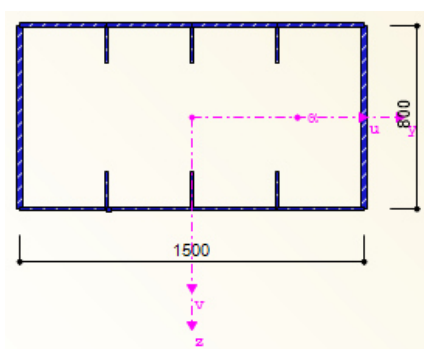
Na obrázku Obr. 6.12 je znázorněn průřez podélného nosníku IPE 160, na Obr. 6.13 až 6.17 jsou znázorněny průřezy pylonu.



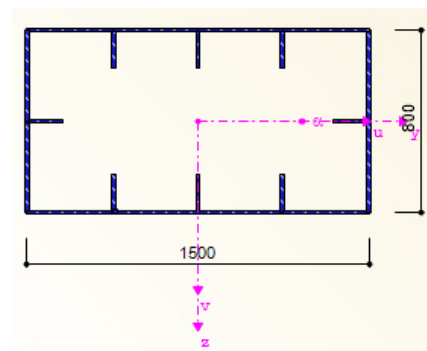
Obr. 6.12 Nosník IPE 160



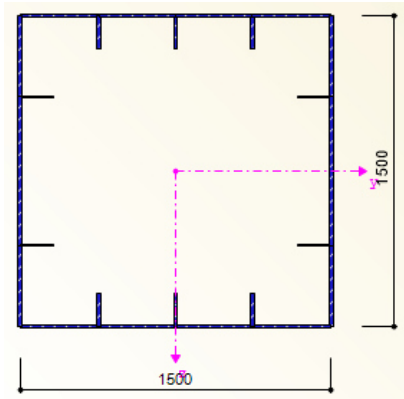
Obr. 6.9 Pylon 1



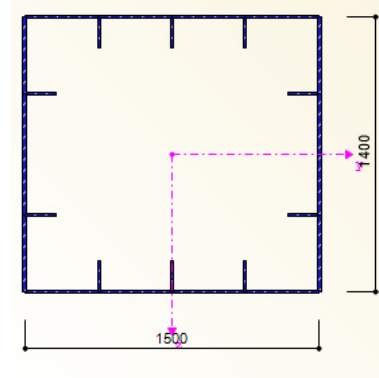
Obr. 6.10 Pylon 2



Obr. 6.14 Pylon 3

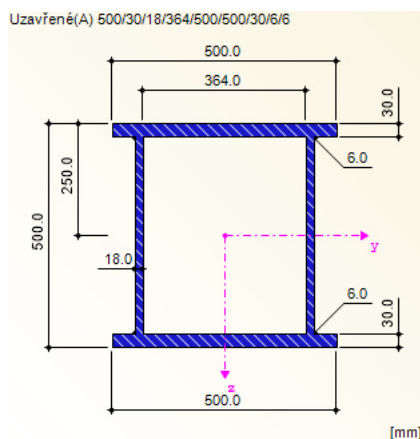


Obr. 6.12 Pylon 4

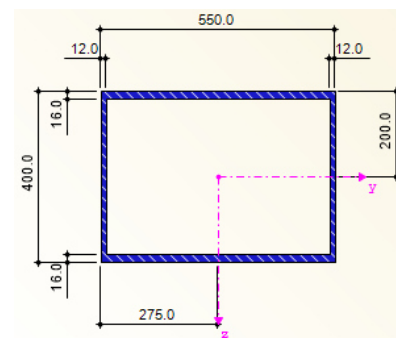


Obr. 6.11 Pylon 5

Na obrázku Obr. 6.18 je znázorněn průřez příčného nosníku mezi nohami pylonu ve výšce 3,55 m od uložení pylonu na základ. Na tomto nosníku jsou uložena všesměrně pevná ložiska. Na obrázku Obr. 6.19 je znázorněn průřez nosníku mezi dvěma díly pylonu ve výšce 15,00 m od uložení pylonu na základ.



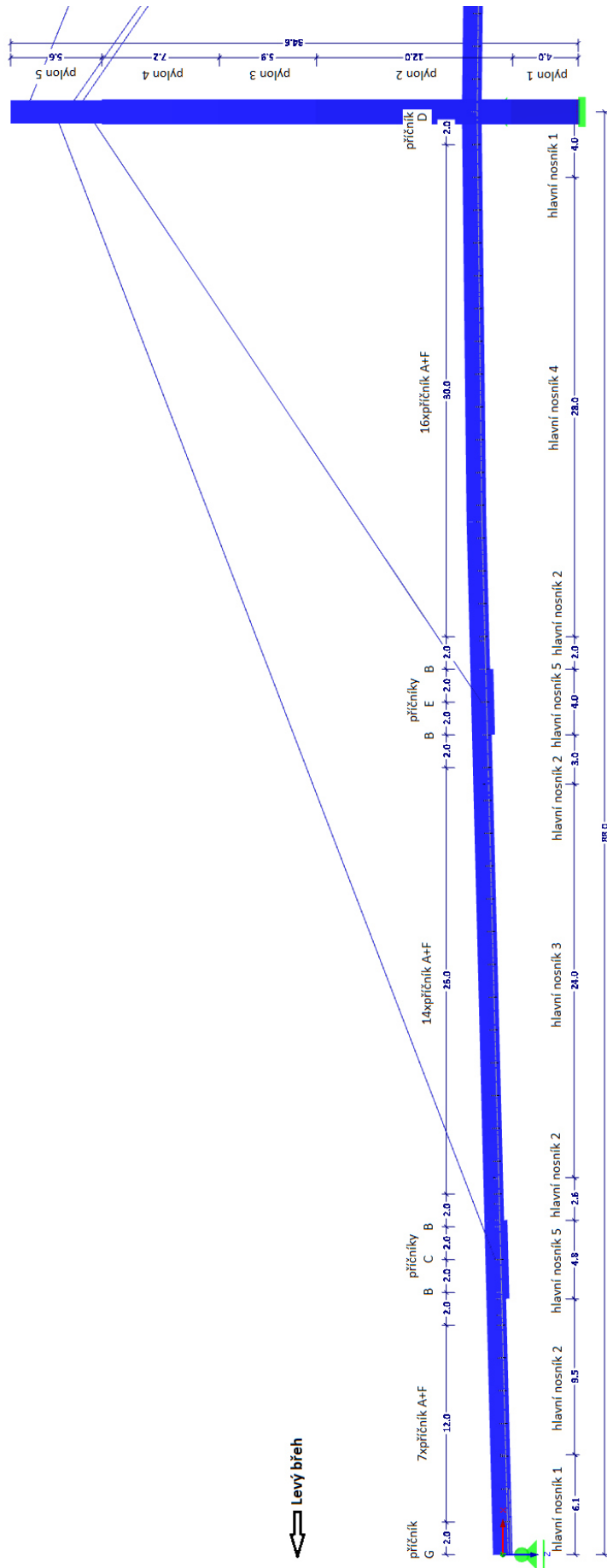
Obr. 6.13 Příčný nosník pylonu ve výšce 3,55 m



Obr. 6.14 Příčný nosník pylonu ve výšce 15 m

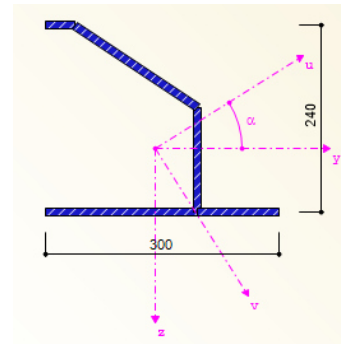
Lanové závěsy jsou tvořeny 16, pro delší závěsy, nebo 14 lany, pro kratší závěsy. Průměry závěsů byly zaokrouhleny na 54 mm a 50 mm. Bylo uvažováno, že jedno lano má plochu 150 mm². Závěsy jsou tvořeny předpínacími ocelovými lany 1550 / 1750.

Na obrázku Obr. 6.20 je schéma umístění jednotlivých průřezů v prostorovém modelu. Schéma znázorňuje pouze kratší pole délky 88 m a pylon. Průřezy na delším poli jsou umístěny zrcadlově kolem osy pylonu. Jediný rozdíl v delším poli je, že u posuvných ložisek je umístěn příčný nosník G a následně 9 příčných nosníků průřezu A+F. Všechny průřezy jsou z oceli S 355.



Obr. 6.15 Schéma umístění jednotlivých průřezů na lávce v kratším poli a na pylonu

Na hlavní nosníky průřezu I je navařen „nástavec“ na vedení kabelů. Na hlavním nosníku je navařen tak, aby na spodní vodorovné části „nástavce“ byla umístěna železobetonová deska. Průřez je vždy umístěn od hlavního nosníku směrem k ose lávky. Tento průřez byl v modelu také zohledněn a je znázorněn na obrázku 6.21. – pro levý hlavní nosník z pohledu ve směru staničení. Tyto průřezy nejsou umístěny v místech závěsů na uzavřených průřezích hlavních nosníků.



Obr. 6.16 "Nástavec" na hlavních nosnících

Mezi hlavními podélnými nosníky je umístěna deska s šířkou 3,4 m a tloušťkou 131 mm. Na konstrukci má tato deska proměnnou tloušťku a její šířka je 3,0 m. Deska byla zjednodušena tak, aby byla zachována její tuhost a zároveň hmotnost. Tuhost byla zachována průměrnou tloušťkou desky skutečné a hmotnost úpravou objemové hmotnosti betonu z 2500 kg/m^3 na 2210 kg/m^3 – uvedeno v kapitole 6.1.1.

Betonová deska je umístěna do vzdálenosti 4 m od uložení na ložiskách na opěrách. Tyto desky se nacházejí mezi příčnými nosníky. Tloušťka desky je 200 mm a šířka 3,4 m. Deska je tvořena z betonu C 30 / 37 o objemové hmotnosti 2500 kg/m^3 .

6.1.3 Geometrie konstrukce

V modelu byly použity dva typy prutových prvků – nosníky, které přenášejí veškeré vnitřní síly a příhradové (pouze N), které přenášejí pouze normálové síly. Lanové závěsy byly vymodelovány jako příhradové (pouze N), ostatní prutové prvky byly určeny jako nosníky.

Nejprve byl vymodelován levý podélný nosník (prutový prvek) z pohledu ve směru staničení se sklony 2,55 % ve staničení 0 – 63 m, 1,17 % (odpovídá oblouku $R = 1097,7 \text{ m}$) 63 – 88 m, -1,17 % 88 – 113 m a -2,40 % 113 – 180 m. Všechny ostatní prvky vodorovné nosné konstrukce byly umísťovány na hlavní podélný nosník s excentricitou, aby poloha střednice prutu odpovídala střednici průřezu na skutečné konstrukci.

Následně byl umístěn „nástavec“ (prutový prvek) na hlavní nosníky s průřezem I. Poté byl umístěn podélný nosník IPE (prutový prvek) rovnoběžně s hlavním nosníkem ve

vzdálenosti 1,7 m. Mezi hlavní nosník a nosník průřezu IPE byly po dvou metrech v podélném směru umístěny příčné nosníky (prutové prvky) s daným průřezem (kapitola 6.1.2, Obr. 6.20). Příčným nosníkům i podélnému nosníku IPE byla určena excentricita tak, aby horní pásnice průřezů byla zarovnána se spodní stranou železobetonové desky.

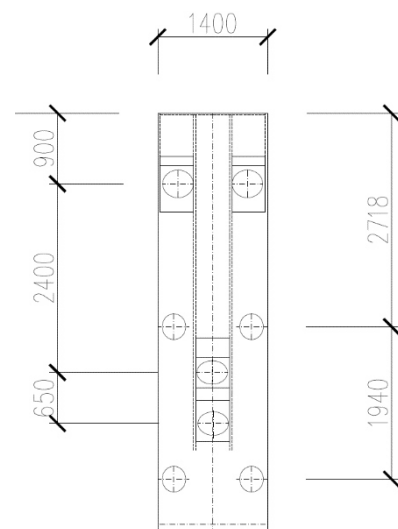
Dále byla umístěna betonová deska s tloušťkou 200 mm v okolí opěry mezi příčné a podélné nosníky. Poté byla vymodelována železobetonová deska s tloušťkou 131 mm. Byla umístěna tak, aby její spodní strana byla zarovnána s horní pásnicí podélného nosníku IPE.

Po umístění všech prvků vodorovné nosné konstrukce byly prvky (kromě nosníku IPE) pomocí funkce „zrcadlit“ umístěny i na druhou stranu od osy konstrukce. Vznikl tak celý příčný řez (Obr. 3.2)

Dále byl vymodelován pylon vysoký 34,6 m ze dvou sbíhajících se prutových prvků, které se spojují ve výšce 21,9 m od uložení pylonu. Poté byl pylon modelován pouze jedním prutovým prvkem. Použité průřezy jsou uvedeny v kapitole 6.1.2 a na Obr. 6.20.

Na pylonu se nacházejí dva příčné nosníky spojující nohy pylonu. Jeden z nich se nachází ve výšce 15 m od uložení pylonu a jeho průřez je znázorněn na obrázku Obr. 6.19. Druhý příčný nosník se nachází ve výšce 3,55 m a je na něm uložena dvojice všesměrně pevných ložisek. Průřez tohoto nosníku je na Obr. 6.18.

Lana byla uchycena na pylon v místech podle schématu Obr. 6.22. Pohled na pylon je ve směru staničení (z levého břehu). Na vodorovnou nosnou konstrukci byly závěsy uchyceny na příčné nosníky C (delší dvojice lan) nebo E (kratší dvojice lan). Příčné nosníky v místě závěsu jsou delší. Jejich přesah za hlavní podélný nosník byl odhadnut na 800 mm. Závěsy jsou uchyceny na konec příčných nosníků.



Obr. 6.17 Pohled na ukotvení závěsů
[8] - upraveno

Na obou opěrách je konstrukce uložena na dvojicích podélně posuvných ložiskách, byly proto zvoleny podélně posuvné klouby s osovou vzdáleností 3,4 m.

V místě uložení na pylon je dvojice všesměrně pevných ložisek, proto byly zvoleny pevné klouby s osou vzdáleností 3,4 m. Pylon je pevně ukotven k železobetonovému základu, proto bylo uvažováno vetknutí.

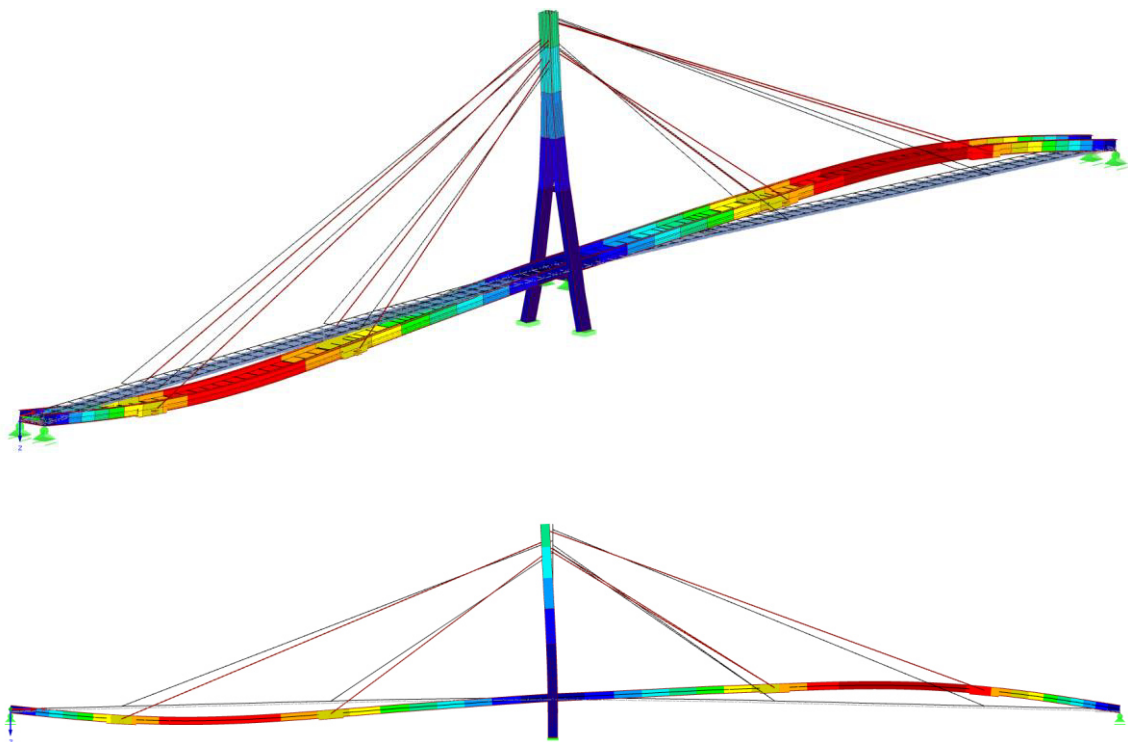
6.1.4 Hmoty

Všechny prvky modelu jsou přiřazeny k materiálu s objemovou hmotností a program hmotnost těchto prvků počítá z materiálových a průřezových charakteristik. Z tohoto důvodu byla zvolena úprava objemové hmotnosti železobetonové desky – kapitola 6.1.1.

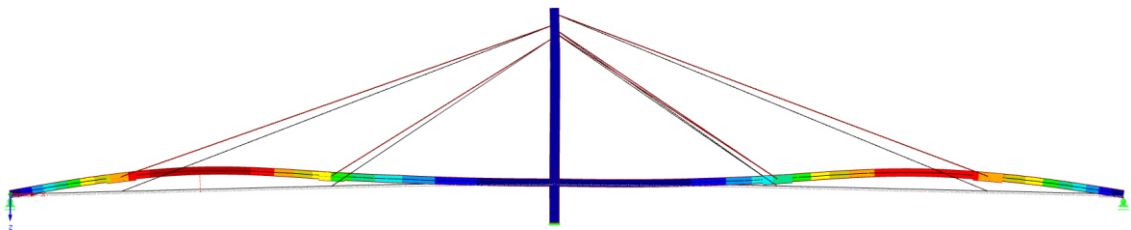
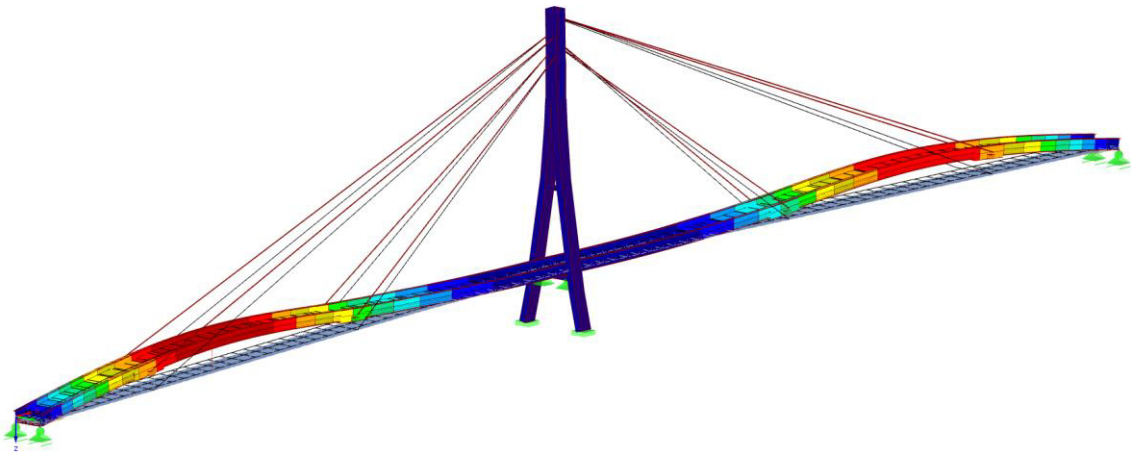
Na každý hlavní podélný nosník byla přidána hmota 12 kg/m, tato hmota představuje zábradlí, které je na nosnících připevněno. Nikde nebyla zjištěna skutečná hmotnost zábradlí, proto byla hodnota odhadnuta.

6.2 Vlastní tvary a frekvence

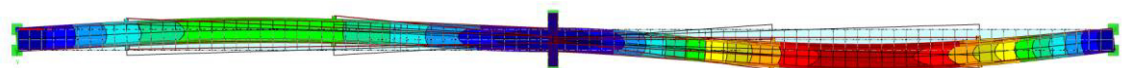
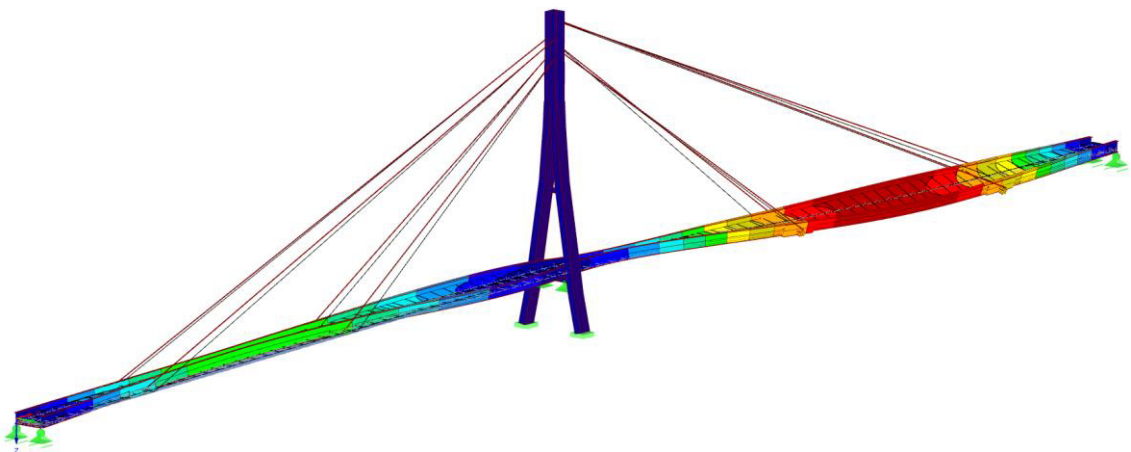
Pomocí programu Dlubal RFEM 5.08 bylo v přídatném modulu RF-DYNAM zjištěno 15 vlastních tvarů a vlastních frekvencí. Byly zjišťovány vlastní frekvence do hodnoty 5 Hz.



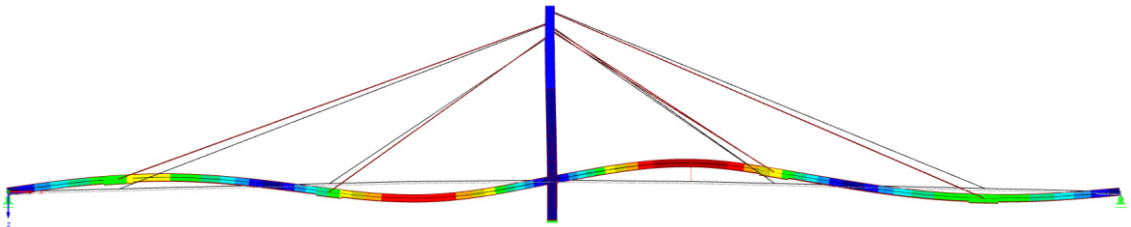
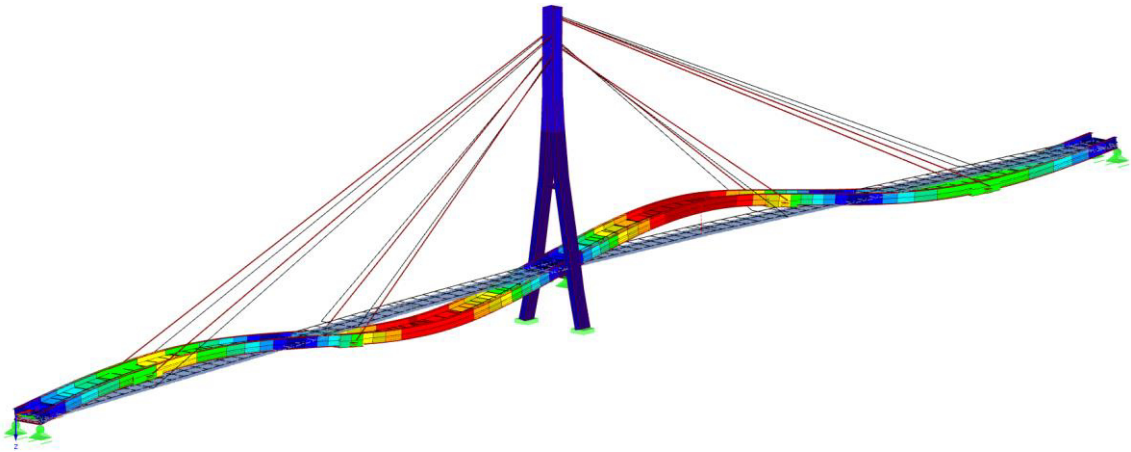
Obr. 6.18 1. vlastní tvar - 0,604 Hz



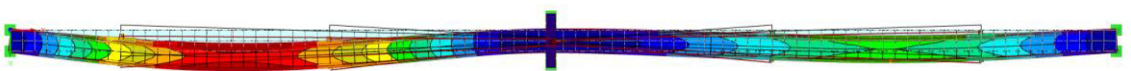
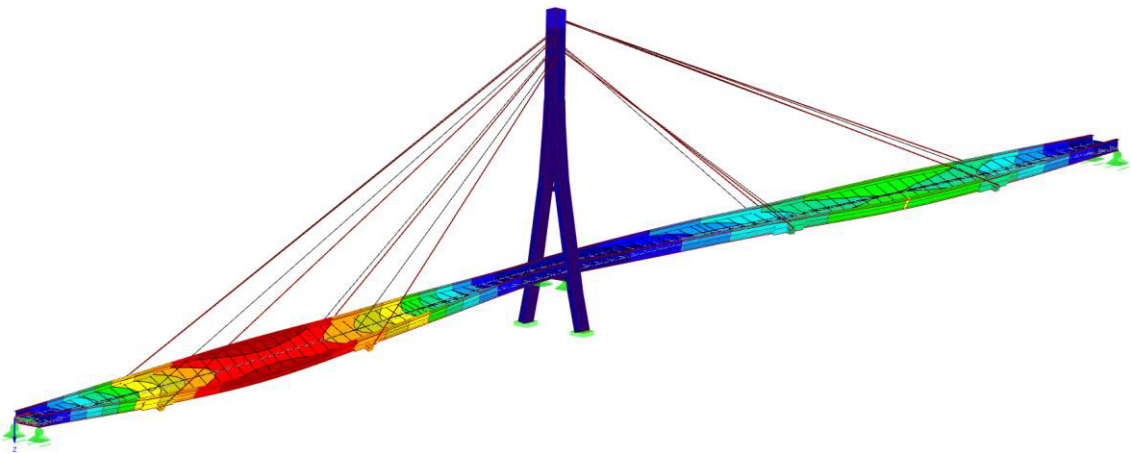
Obr. 6.19 2. vlastní tvar - 1,130 Hz



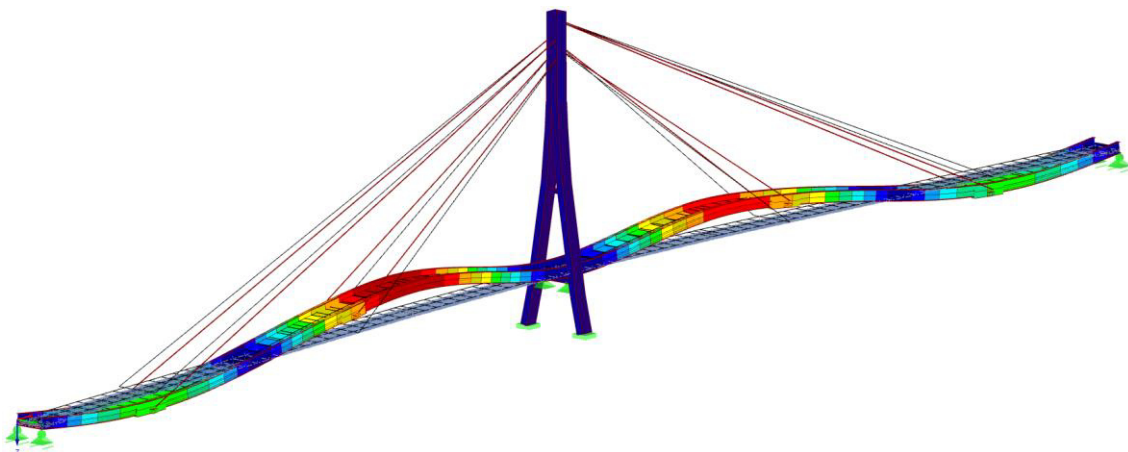
Obr. 6.20 3. vlastní tvar - 1,523 Hz



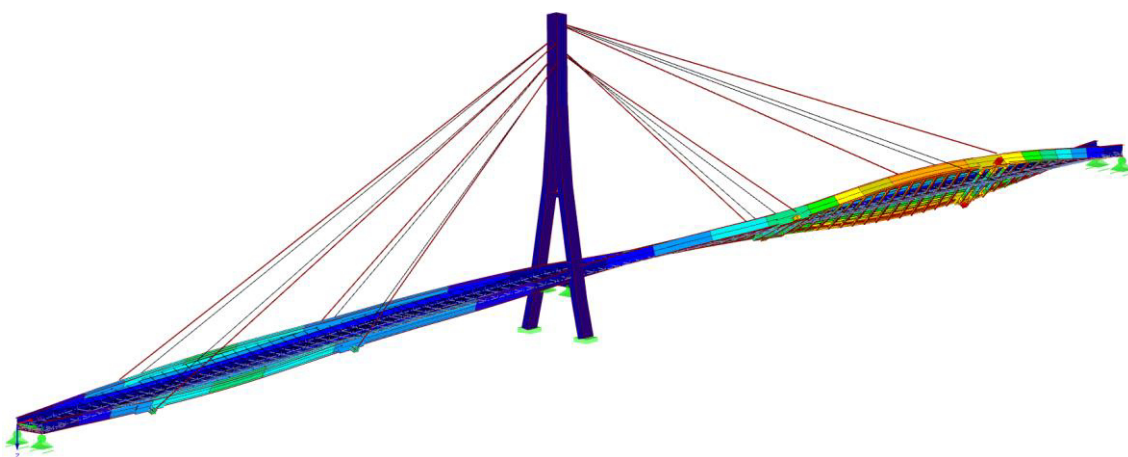
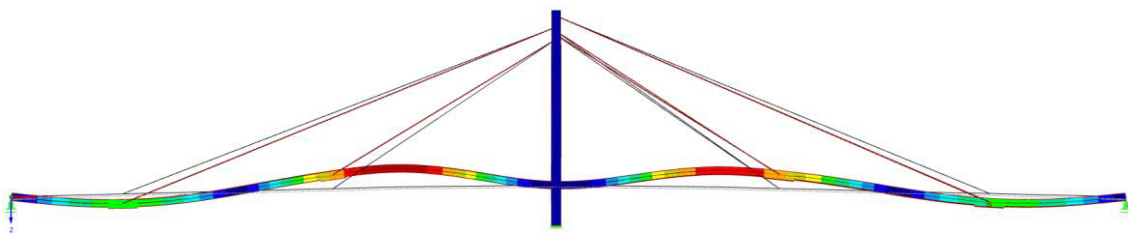
Obr. 6.21 4. vlastní tvar - 1,656 Hz



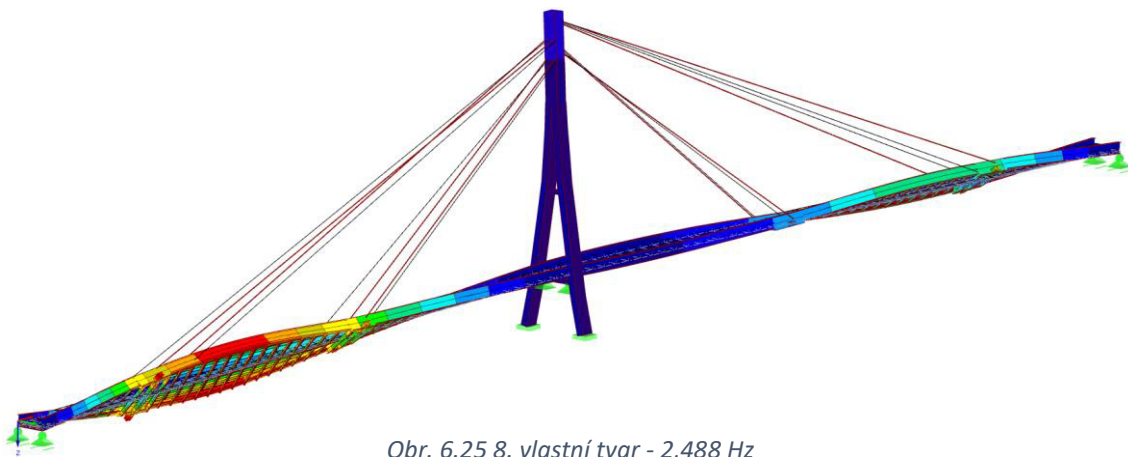
Obr. 6.22 5. vlastní tvar - 1,721 Hz



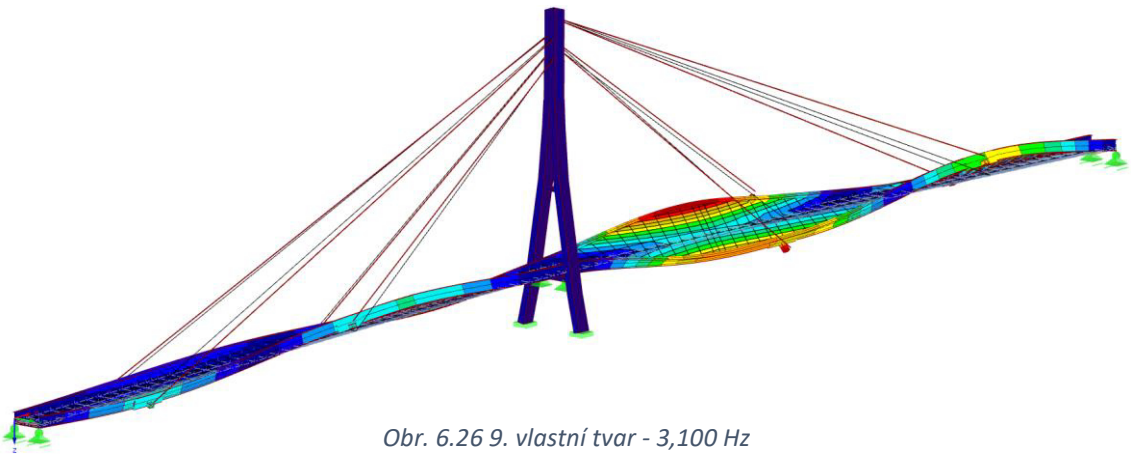
Obr. 6.24 6. vlastní tvar - 2,090 Hz



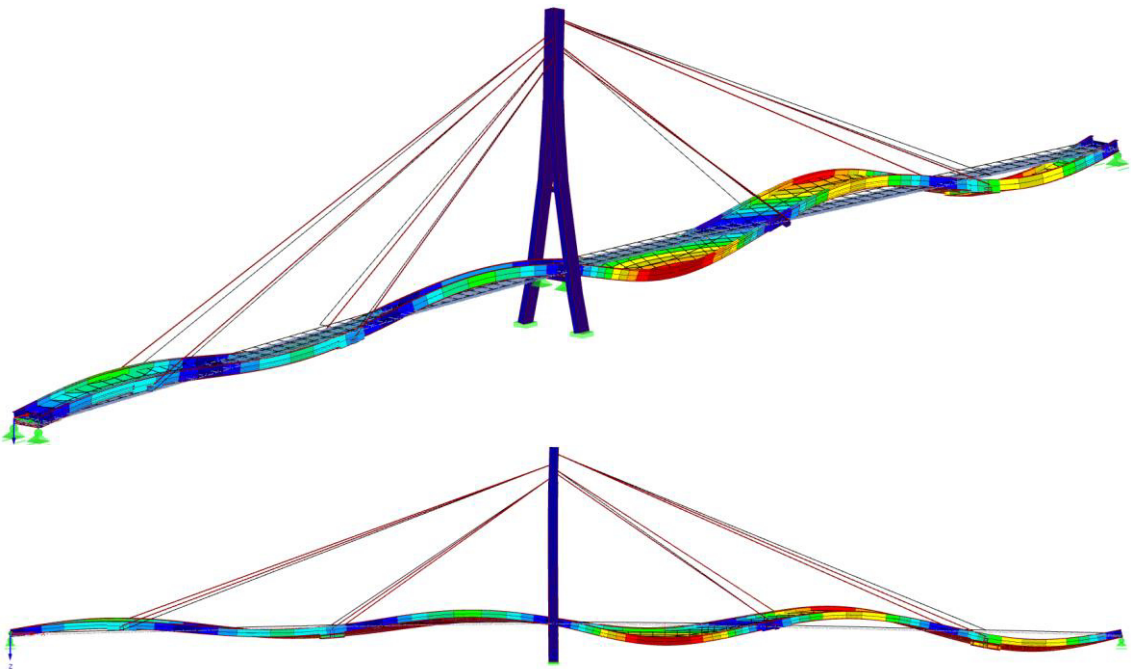
Obr. 6.23 7. vlastní tvar - 2,286 Hz



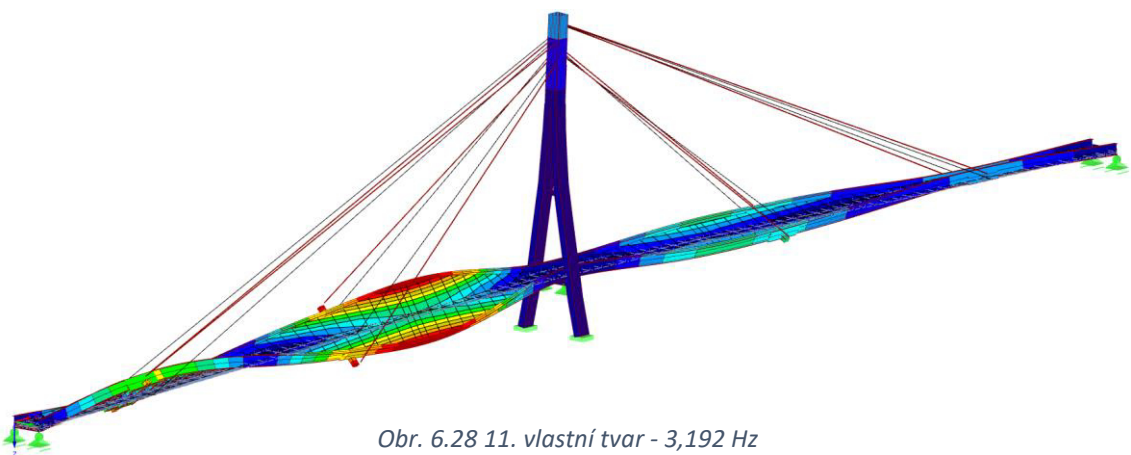
Obr. 6.25 8. vlastní tvar - 2,488 Hz



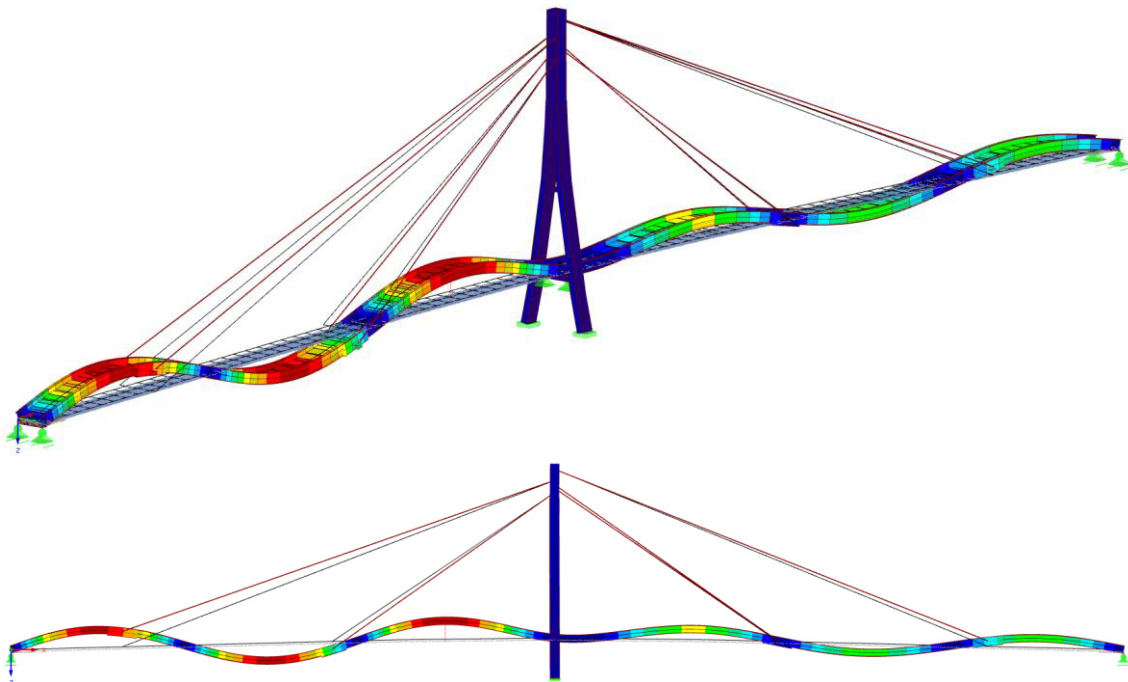
Obr. 6.26 9. vlastní tvar - 3,100 Hz



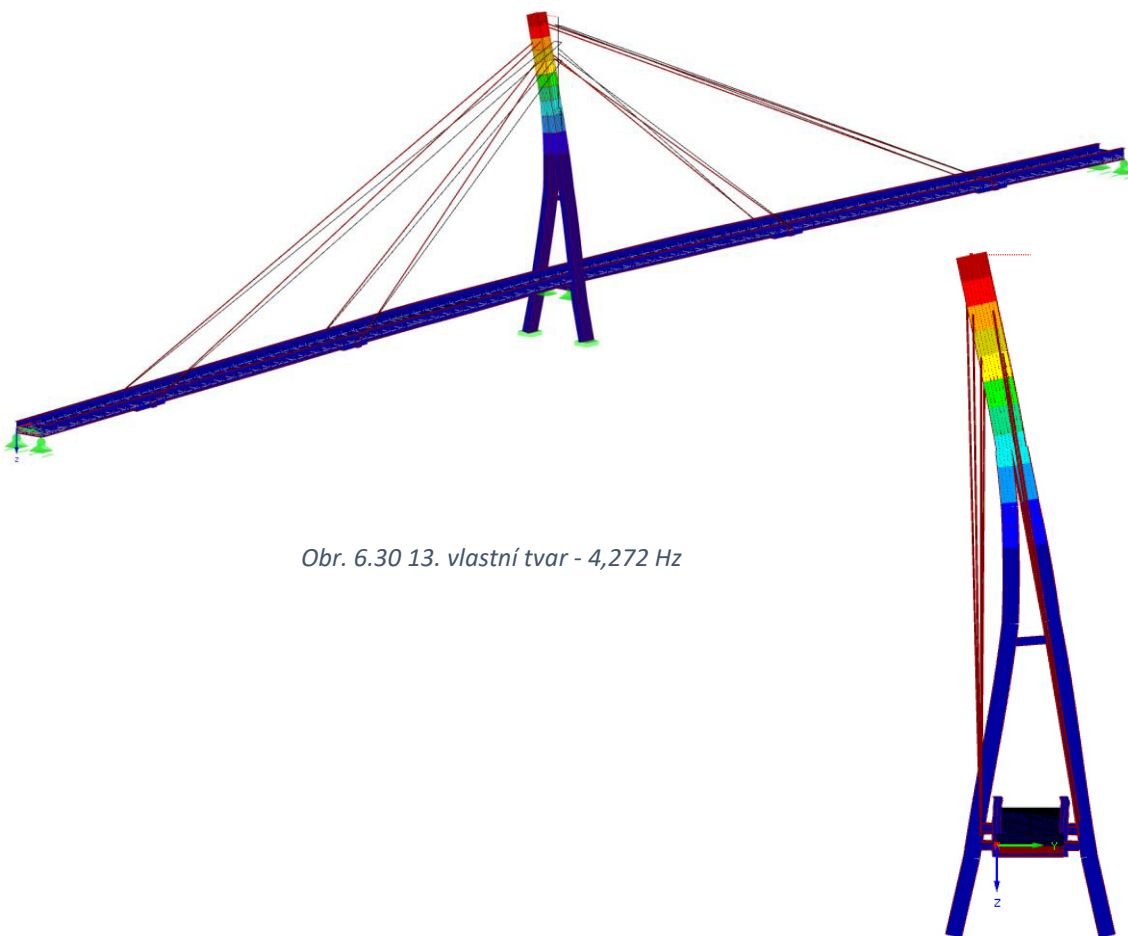
Obr. 6.27 10. vlastní tvar - 3,112 Hz



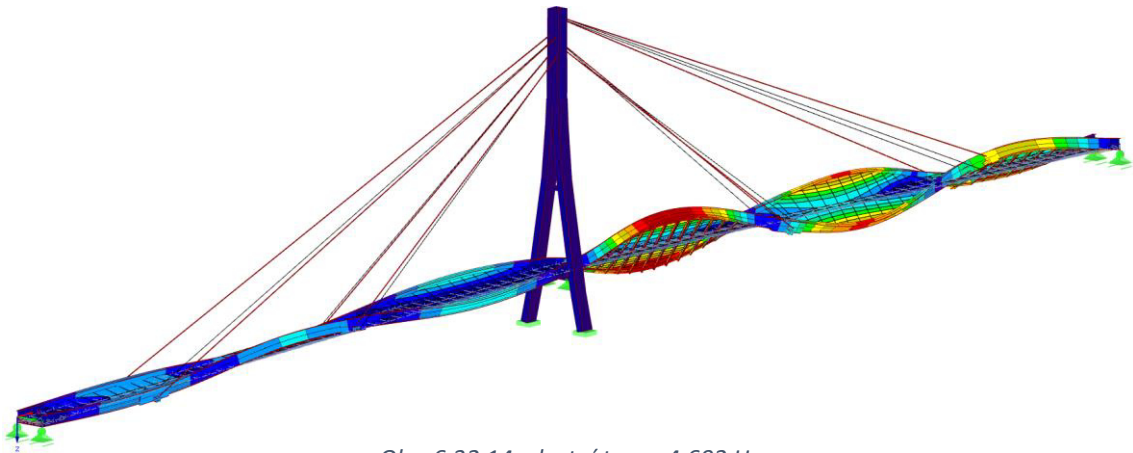
Obr. 6.28 11. vlastní tvar - 3,192 Hz



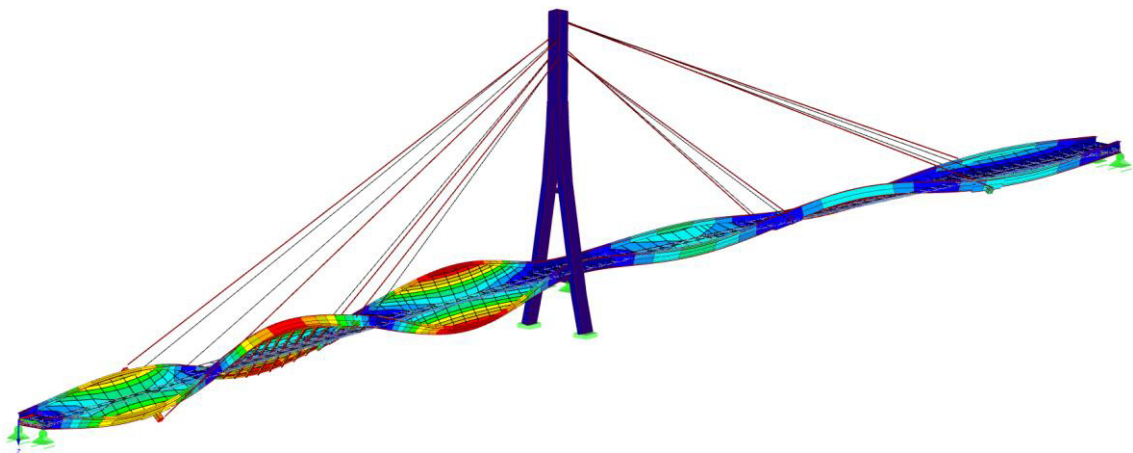
Obr. 6.29 12. vlastní tvar - 3,577 Hz



Obr. 6.30 13. vlastní tvar - 4,272 Hz



Obr. 6.32 14. vlastní tvar - 4,692 Hz



Obr. 6.31 15. vlastní tvar - 4,977 Hz

Na obrázcích Obr. 6.23 až Obr. 6.37 jsou uvedeny tvary s vlastní frekvencí do 5 Hz. Frekvence do 5 Hz jsou u lávek pro pěší rizikové.

V prvních 15 vlastních tvarech se objevilo 6 tvarů svislého kmitání, 2 tvary vodorovného kmitání, 6 tvarů kroutivého kmitání a 1 tvar příčného kmitání pylonu. Oba tvary vodorovného kmitání jsou kombinovány s torzním kmitáním. 10. vlastní tvar (5. tvar svislého kmitání) je také výrazně kombinován s kroucením konstrukce.

Výsledky jednotlivých modelů a dynamické zkoušky jsou porovnány v kapitole 7.

Nejběžnější rychlost chůze chodců je kolem 2 Hz. 6. vlastní tvar s hodnotou vlastní frekvence 2,090 Hz je velmi blízko a bude nutné tento tvar posoudit na zatížení chodce. Mohlo by docházet k snížení komfortu pro chodce, případně k překročení stavu použitelnosti. Dále bude posouzen 3. vlastní tvar – tvar vodorovný blízky 1 Hz, kde by také mohlo docházet ke snížení komfortu chůze (kapitola 8).

7 Porovnání výsledků

V tabulce Tab. 7.1 je uvedeno porovnání výsledků prostorového modelu a rovinných modelů.

vlastní tvar č.		f_i [Hz]			Shoda prostorového modelu s modely rovinnými [%]	
prostorový model	rovinné modely	prostorový model	rovinný		s tuhostí desky	bez tuhosti desky
			s tuhostí desky	bez tuhosti desky		
1	1	0,604	0,654	0,602	108,28	99,67
2	2	1,130	1,196	1,131	105,84	100,09
4	3	1,656	2,061	1,911	124,46	115,40
6	4	2,090	2,209	2,062	105,69	98,66
10	5	3,112	3,490	3,087	112,15	99,20
12	6	3,577	3,825	3,393	106,93	94,86

Tab. 7.1 Porovnání vlastních frekvencí prostorového modelu a rovinných modelů

Je zřejmé, že trochu větší podobnost je mezi modelem prostorovým a rovinným bez tuhosti desky. Ani tento rovinný model ale není ideální. Rovinný model s tuhostí desky je příliš tuhý a jeho vlastní frekvence se velmi liší od modelu prostorového. Tyto odlišnosti jsou dané už předpoklady modelů, kde v rovinném modelu není možné kmitání v jiném směru než ve svislém. Tím se zvětšuje tuhost konstrukce a lze předpokládat frekvence vyšší než u modelu prostorového. Dle předpokladu byly většinou hodnoty vlastních frekvencí prostorového modelu mezi hodnotami výsledků modelů rovinných pro jednotlivé vlastní tvary.

V tabulce Tab. 7.2 je uvedeno porovnání výsledků rovinných modelů a výsledků z dynamické zkoušky na lávce [15].

vl.tvar č.	dynamická zkouška	f_i [Hz]		Shoda zkoušky s modely rovinnými [%]	
		rovinný		s tuhostí desky	bez tuhosti desky
rovinné modely		s tuhostí desky	bez tuhosti desky		
1	0,609	0,654	0,602	107,39	98,85
2	1,141	1,196	1,131	104,82	99,12
3	1,578	2,061	1,911	130,61	121,10
4	2,063	2,209	2,062	107,08	99,95
5	3,016	3,490	3,087	115,72	102,35
6	3,453	3,825	3,393	110,77	98,26

Tab. 7.2 Porovnání vlastních frekvencí z dynamické zkoušky s rovinnými modely

Porovnání vlastních frekvencí rovinných modelů s výsledky z dynamické zkoušky jsou velmi podobné porovnání předcházejícímu. Je také vidět, že v tomto porovnání se výsledky shodují méně. Lze tedy předpokládat, že skutečná konstrukce bude hodně kmitat ve vodorovném směru nebo se bude kroutit a z tohoto důvodu je nutné pro lepší porovnání použít model prostorový.

V tabulce Tab. 7.3 je uvedeno porovnání výsledků vlastních frekvencí prostorového modelu s výsledky z dynamické zkoušky na lávce. Výsledky prostorného výpočetního modelu sloužily jako podklad pro dynamickou zkoušku a pro vyhodnocení zkoušky [15].

typ tvaru	vlastní tvar č.	dynamická zkouška	prostorový model	
		f_i [Hz]	f_i [Hz]	shoda [%]
1. svislý	1	0,609	0,604	99,18
2. svislý	2	1,141	1,130	99,04
1. vodorovný	3	-	1,523	-
3. svislý	4	1,578	1,656	104,94
2. vodorovný	5	-	1,721	-
4. svislý	6	2,063	2,090	101,31
1. kroutivý	7	2,203	2,286	103,77
2. kroutivý	8	2,359	2,488	105,47
3. kroutivý	9	-	3,100	-
5. svislý	10	3,016	3,112	103,18
4. kroutivý	11	3,250	3,192	98,22
6. svislý	12	3,453	3,577	103,59
1. pylonu	13	-	4,272	-
5. kroutivý	14	-	4,692	-
6. kroutivý	15	-	4,977	-

Tab. 7.3 Porovnání vlastních frekvencí z dynamické zkoušky s prostorovým modelem

Při dynamické zkoušce provedené na lávce se nepodařilo zachytit všechny vlastní tvary konstrukce. U tohoto porovnání je zřejmá dobrá shoda. Maximální rozdíl mezi naměřenými a spočítanými vlastními frekvencemi je 5,47 %. Dá se tedy usoudit, že tvorba prostorového modelu byla úspěšná a výpočetní model výstižným způsobem vystihuje dynamické vlastnosti skutečné lávky.

8 Odezva konstrukce na zatížení chodci

Lávky pro pěší mohou být velmi citlivé na dynamické zatížení, proto je nutno je posoudit na zatížení chodci. Chodci svým pravidelným krokem budí konstrukci danou frekvencí a může vznikat rezonance. Pokud se frekvence kroku blíží vlastní frekvenci lávky, je nutno tento vlastní tvar posoudit. V tabulce Tab. 8.1 jsou uvedeny přibližné hodnoty rychlosti chůze a běhu a jaké frekvence se v daném směru posuzují.

Typ chůze/běhu	Rychlost	Svislý tvar vlastní frekvence	Vodorovný tvar vlastní frekvence
pomalá chůze	1,7 Hz	1,7 Hz	0,85 Hz
normální chůze	2,0 Hz	2,0 Hz	1,0 Hz
rychlá chůze	2,3 Hz	2,3 Hz	1,15 Hz
pomalý běh	2,5 Hz	2,5 Hz	1,25 Hz
rychlý běh	> 3,2 Hz	> 3,2 Hz	> 1,6 Hz

Tab. 8.1 Přehled posuzovaných frekvencí ve svislém a vodorovném směru [2]

Z tabulky Tab. 8.1 je patrné, že při běžné chůzi je konstrukce buzena frekvencí přibližně 2,0 Hz a komfort chodců může být narušen. Z tabulky je také zřejmé, že chodec vyvolává ve vodorovném směru frekvenci poloviční než ve směru svislém.

8.1 Tlumení konstrukce

Při výpočtu dynamické odezvy konstrukce (vynucené kmitání), kdy lze předpokládat rezonanční stavy, je nutné uvažovat též tlumení konstrukce.

Pro výpočet byl použit Rayleighův útlum (kapitola 4.4.1) vycházející z lineární kombinace matic tuhosti a hmotnosti. Pro výpočet koeficientů α , β je nutné znát hodnotu poměrného útlumu. V době výpočtu odezvy konstrukce na zatížení chodci nebyla tato hodnota z dynamické zkoušky provedené na lávce známa. Byla proto hodnota odhadnuta dle typu konstrukce a rozpětí na $\xi = 0,4 \%$ a bylo uvažováno, že tato hodnota odpovídá tlumení konstrukce při první vlastní frekvenci a je nejnižší. Pro demonstraci vlivu útlumu na odezvu konstrukce byly pro výpočet zvoleny tři různé hodnoty koeficientu útlumu – snížená hodnota 0,1 %, odhadnutá hodnota 0,4 % a zvýšená hodnota 1 %. Pro všechny tyto tři hodnoty byla konstrukce posouzena.

Před zadáním výpočtu do programu je nutné spočítat koeficienty α , β . Uvažované poměrné útlumy jsou nejnižší pro první frekvenci a je tedy možné použít vztahy (4.15) a (4.16). Z těchto vztahů vyplývají hodnoty koeficientů:

ξ	0,1 %			
ω_1	3,7925	[rad/s]	α	0,00379
			β	0,00026
ξ	0,4 %			
ω_1	3,7925	[rad/s]	α	0,01509
			β	0,00105
ξ	1,0 %			
ω_1	3,7925	[rad/s]	α	0,03793
			β	0,00264

Tab. 8.2 Hodnoty koeficientů útlumu

Tyto hodnoty byly zadány do programu Dlubal RFEM pro zjištění odezvy konstrukce.

8.2 Zatěžovací stavy

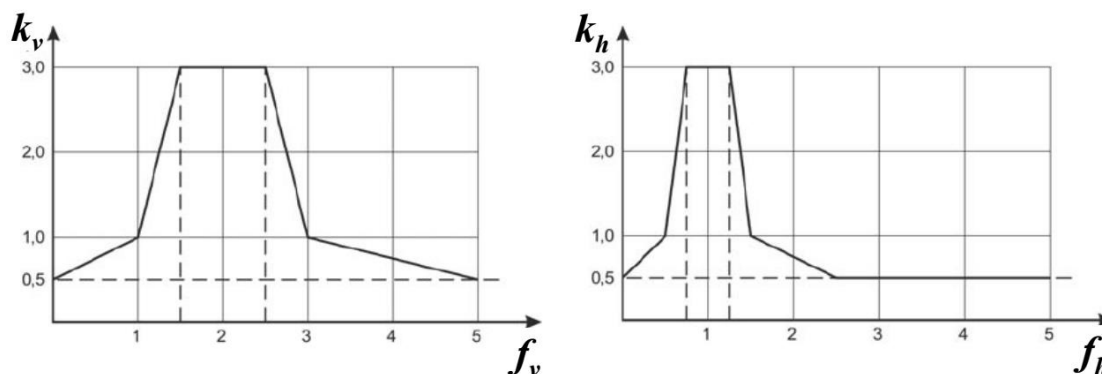
Vzhledem k výše uvedené tabulce Tab. 8.1 bude ve svislém směru posuzován 1. vlastní tvar (0,604 Hz) a 6. vlastní tvar (2,090 Hz) a ve směru vodorovném 3. vlastní tvar (1,523 Hz).

V evropské normě ani v českých předpisech není předepsán přesný způsob, jak modelovat zatížení chodci, bylo proto čerpáno z odborných publikací [2], [3], [11]. Z těchto publikací byly převzaty vztahy pro harmonickou sílu, která představuje působení chodců. Tato síla je vždy umístěna do maximální pořadnice v daném směru pro daný vlastní tvar.

$$F(t) = A \cdot k \cdot \sin(2\pi ft) \quad (8.1)$$

kde $F(t)$ je působící harmonická síla, A je amplituda, k koeficient vyjadřující synchronizaci kroku chodců, f je posuzovaná frekvence a t je čas.

Koeficient k je závislý na frekvenci f . Určuje se pro skupinu osmi až patnácti chodců. Pro svislý tvar se vyjadřuje k_v a pro tvar vodorovný k_h . Pro zatížení jedním chodcem je koeficient $k = 1$. Na obrázku Obr. 8.1 jsou znázorněny grafy, z kterých jsou hodnoty koeficient určovány.

Obr. 8.1 Závislost koeficientů k_v a k_h na frekvenci [3]

Dle koeficientů bude vybráno, zda bude konstrukce zatěžována skupinou (pokud $k > 1$) nebo jedním chodcem (pokud by $k < 1$).

Amplitudy A byly určeny dle [3] – pro svislý tvar $A = 180$ a pro vodorovný tvar $A = 70$.

8.2.1 Zatěžovací stav 1

Tento zatěžovací stav je určen pro 1. vlastní tvar, kde $f_v = 0,604$ Hz. Jedná se o svislé kmitání, bude tedy určen koeficient k_v . Pro tuto hodnotu vlastní frekvence by byl koeficient $k_v < 1$, proto bude uvažováno zatížení jedním chodcem. Předpis harmonické síly je:

$$F_1(t) = 180 \cdot \sin(2\pi \cdot 0,604 \cdot t) \quad [\text{N}] \quad (8.2)$$

Tato síla byla umístěna do bodu s největší pořadnicí pro tento tvar. Umístění odpovídá bodu ve staničení 145 m a je vzdálen 2,267 m od osy levého hlavního nosníku.

8.2.2 Zatěžovací stav 2

Tento zatěžovací stav je určen pro 6. vlastní tvar, kde $f_v = 2,090$ Hz. Tato hodnota vlastní frekvence je nejbližší hodnotě 2 Hz. Jedná se o svislé kmitání, bude tedy určen koeficient k_v . Pro tuto hodnotu vlastní frekvence má koeficient hodnotu $k_v = 3$, proto bude uvažováno zatížení skupinou chodců. Předpis harmonické síly je:

$$F_2(t) = 180 \cdot 3 \cdot \sin(2\pi \cdot 2,090 \cdot t) \quad [\text{N}] \quad (8.3)$$

Tato síla byla umístěna do bodu s největší pořadnicí pro tento tvar. Umístění odpovídá bodu ve staničení 62 m a leží na ose levého hlavního nosníku. Dle [3] byla do tohoto bodu umístěna i přidaná hmota 800 kg, která představuje hmotnost skupiny.

8.2.3 Zatěžovací stav 3

Tento zatěžovací stav je určen pro 3. vlastní tvar, kde $f_h = 1,523 \text{ Hz}$. Jedná se o vodorovné kmitání, bude tedy určen koeficient k_h . Pro tuto hodnotu vlastní frekvence má koeficient hodnotu $k_h = 1$ a stejně jako v předchozím zatěžovacím stavu bude přidána hmoty 800 kg představující skupinu chodců. Proto bude uvažováno zatížení skupinou chodců. Předpis harmonické síly je:

$$F_3(t) = 70 \cdot 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 1,523 \cdot t) \quad [\text{N}]$$

Tato síla byla umístěna do bodu s největší pořadnicí pro tento tvar. Umístění odpovídá bodu ve staničení 139,5 m a leží na ose konstrukce.

8.3 Výsledky

V přídatném modulu RF – DYNAM byly spočítány amplitudy A a zrychlení a ustáleného harmonického kmitání pro jednotlivé zatěžovací stavy a uvažované útlumy. Výsledky jsou uvedeny v tabulce Tab. 8.3.

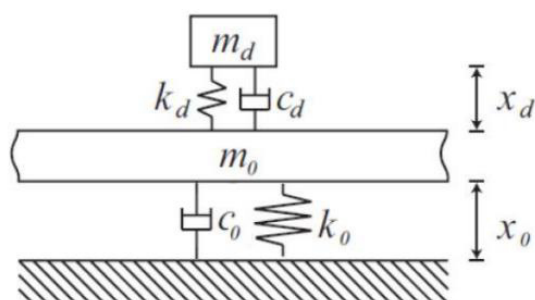
zatěžovací stav	f	ω	ξ	A	a	a_{lim}	splněno
	[Hz]	[s ⁻¹]	[%]	[mm]	[mm/s ²]	[mm/s ²]	
ZS 1 1. vlastní tvar	0,604	3,795	0,1	17,16	0,25	0,70	ano
			0,4	8,67	0,13		ano
			1,0	3,84	0,06		ano
ZS 2 6. vlastní tvar	2,090	13,133	0,1	4,95	0,85	0,70	ne
			0,4	1,98	0,34		ano
			1,0	0,87	0,15		ano
ZS 3 3. vlastní tvar	1,522	9,567	0,1	1,33	0,12	0,20	ano
			0,4	0,52	0,05		ano
			1,0	0,22	0,02		ano

Tab. 8.3 Výsledky odezvy konstrukce na zatížení chodci

Z tabulky Tab. 8.3 je patrné, že velikost útlumu má dle očekávání významný vliv na velikost dynamické odezvy při ustáleném kmitání. Dále lze konstatovat, že zatěžovací stav 2 s uvažovaným útlumem 0,1 % nevyhověl podmínce maximálního zrychlení uvedeného v Eurokódu – Zásady navrhování konstrukcí (ČSN EN 1990) [1]. Limitní hodnota byla překročena přibližně o 8 %. I když je uvažovaný útlum extrémně nízký, není vyloučeno, že by limitní hodnota mohla být překročena i na lávce. Bude proto v následující kapitole navrhnut pasivní pohlcovač kmitání pro zatěžovací stav 2 s uvažovaným útlumem 0,1 %.

9 Pohlčovač kmitání

Konstrukce přesáhla limitní hodnoty zrychlení, a proto byl navrhnut pasivní pohlčovač kmitání pro 6. vlastní tvar s poměrným útlumem $\xi = 0,1 \%$ a s frekvencí $f_v = 2,090$ Hz. Tento tvar odpovídá 4. svislému ohybovému tvaru. Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.4.2, pasivní pohlčovače jsou levné, jednoduché a spolehlivé. Jsou navrhovány vždy pro konkrétní vlastní tvar a frekvenci. Schéma uvažovaného pohlčovače je znázorněno na obrázku Obr. 9.1.



Obr. 9.1 Schéma pasivního pohlčovače (TDM) [4]

Kde m_d je hmotnost pohlčovače, k_d je tuhost pohlčovače, c_d je útlum pohlčovače, m_0 je hmotnost konstrukce, k_0 je tuhost konstrukce a c_0 je útlum konstrukce.

9.1 Návrh pohlčovače kmitání

Pohlčovač byl navržen, modelován a vyhodnocen pro vlastní frekvenci konstrukce 2,09 Hz, která odpovídá 6. vlastnímu tvaru konstrukce.

Aby mohl být použit lineární výpočet, byl uvažován útlum pohlčovače $c_d = 0$. Řešená frekvence odpovídá symetrickému vlastnímu tvaru. Bylo zvoleno, že na konstrukci budou umístěny dva stejné pohlčovače – jeden do každého pole do bodu maximální výchylky ve směru osy z. Hmotnost pohlčovače je určena z poměru obou hmotností:

$$\mu = \frac{m_d}{m_0} \quad (9.1)$$

Celková hmotnost pohlčovače kmitání byla zvolena jako 1 % celkové hmotnosti konstrukce. Vzhledem k tomu, že bude pohlčovač umístěn do každého pole, byla

uvažována hmotnost konstrukce jako hmotnost pole. Kvůli nesymetrii byla pro zjednodušení uvažována průměrná hmotnost polí. Poté platí vztah:

$$m_d = 0,01 \cdot 179,65 \quad (9.2)$$

A hodnota celkové hmotnosti pohlcovače kmitání je:

$$m_d \cong 1,800 \text{ t} \quad (9.3)$$

Dále je nutné pohlcovač naladit na optimální frekvenci f_d dle:

$$f_d = \frac{f_v}{1+\mu} \quad (9.4)$$

Kde f_v je vlastní frekvence konstrukce pro daný tvar. Po dosazení do (9.4) platí:

$$f_d = \frac{2,090}{1+0,01} \quad (9.5)$$

$$f_d = 2,069 \text{ Hz} \quad (9.6)$$

Úpravou rovnice (4.5) získáváme rovnici pro stanovení tuhosti pohlcovače k_d :

$$k_d = (2\pi f_d)^2 \cdot m_d \quad (9.7)$$

Po dosazení do (9.7):

$$k_d = (2\pi \cdot 2,069)^2 \cdot 1,800 \quad (9.8)$$

$$k_d = 304,196 \text{ kN/m} \quad (9.9)$$

9.2 Modelování pohlcovače kmitání

Software Dlubal RFEM 5. 08 neumožňuje zadání pohlcovače kmitání. Bylo proto nutné umístit hmotu m_d na svislý prut s tuhostí k_d do bodu s největší pořadnicí výchylky ve směru osy z v každém poli.

$$k_d = \frac{EA}{l} \quad (9.10)$$

Kde E je modul pružnosti materiálu, A je plocha průřezu prutu a l je délka prutu. Délka prutů, na kterých je umístěna hmota m_d , byla zvolena jako $l = 0,2 \text{ m}$. Průřez prutů byl zvolen čtvercový o délce strany $a = 0,01 \text{ m}$. Pak platí pro určení modulu pružnosti fiktivního materiálu:

$$E = 608,392 \text{ MPa} \quad (9.11)$$

Hmoty připojené na pruty byly přidány do programu a byl znovu proveden výpočet vlastních tvarů a frekvencí konstrukce s pohlcovačem kmitání. Nová vlastní frekvence odpovídající 4. svislému ohybovému tvaru je 1,869 Hz.

Zatěžovací harmonická síla bylo stanovena dle postupu v kapitole 8.2. Vlastní tvar byl posuzován pro skupinu chodců s koeficientem $k_v = 3$ a přidanou hmotou 800 kg do bodu maximální výchylky ve směru osy z. Předpis uvedené síly je:

$$F_4(t) = 180 \cdot 3 \cdot \sin(2\pi \cdot 1,869 \cdot t) \text{ [N]} \quad (9.12)$$

9.3 Výsledky

Při výpočtu bylo postupováno stejně jako u vyhodnocení odezvy konstrukce bez pohlcovače kmitání. Výsledky z přídatného modulu RF – DYNAM s pohlcovačem a bez pohlcovače byly porovnány – Tab. 9.1

ZS 2	f	ω	ξ	A	a	a_{lim}	splněno
	[Hz]	[s ⁻¹]	[%]	[mm]	[mm/s ²]	[mm/s ²]	
bez pohlcovače	2,090	13,133	0,1	4,95	0,85	0,70	ne
s pohlcovačem	1,869	11,749	0,1	2,78	0,46	0,70	ano

Tab. 9.1 Výsledky odezvy konstrukce na zatížení chodci bez pohlcovače a s pohlcovačem kmitání

Z výsledků je patrné, že pohlcovač kmitání o hmotnosti přibližně 1 % hmotnosti pole prokazatelně snížil hodnotu zrychlení pod hodnotu limitní. Konstrukce po přidání pohlcovače kmitání vyhověla. Pasivní pohlcovače kmitání jsou jednoduchým, rychlým a spolehlivým řešením při překročení limitních hodnot zrychlení.

10 Závěr

V bakalářské práci byly úspěšně vytvořeny rovinné modely i prostorový model, byla zjištěna odezva na zatížení chodci a byl navrhnout pohlcovač kmitání.

Rovinné modely byly vytvořeny pro předběžné zjištění hodnot vlastních frekvencí pro jednotlivé tvary svislého kmitání. Již z výsledků rovinných modelů bylo patrné, že některý z tvarů svislého kmitání bude mít hodnotu vlastní frekvence okolo 2 Hz a bude nutné posoudit odezvu konstrukce na zatížení chodci.

Výsledky vlastních tvarů prostorového modelu ukázaly, že v prvních 15 vlastních tvarech se vyskytuje 6 tvarů svislého kmitání, 2 tvary vodorovného kmitání, 6 tvarů kroutivého kmitání a 1 tvar příčného ohybu pylonu. Z porovnání výsledků vlastních frekvencí z prostorového modelu a z dynamické zkoušky vyplynulo, že model dobře zachycuje vlastnosti lávky a maximální chyba byla 5,47 %.

Na prostorovém modelu byla stanovena odezva na zatížení chodci pro 1. tvar svislého kmitání ($f_1 = 0,604$ Hz), 1. tvar vodorovného kmitání ($f_3 = 1,523$ Hz) a pro 4. tvar svislého kmitání ($f_6 = 2,090$ Hz). Byly uvažovány tři hodnoty útlumu – 0,1 %, 0,4 % a 1,0 %. Zatížení bylo zjednodušeně simulováno harmonickou silou v místě největší pořadnice v daném směru pro daný vlastní tvar. Nebyly překročeny limity maximálního zrychlení kromě frekvence 2,090 Hz (velmi blízké typické frekvenci chůze) při útlumu 0,1 %. I když je útlum extrémně nízký, je možné riziko překročení limitních hodnot zrychlení, a tak snížení komfortu chodců. Z tohoto důvodu byl pro tuto frekvenci a útlum navržen pohlcovač kmitání.

Pohlcovač kmitání byl umístěn do každého pole, na konstrukci se tedy nacházejí 2 pohlcovače kmitání. Prostorový model s pohlcovači byl znovu zatížen harmonickou silou. Výsledky jasně ukázaly zlepšení vlastností konstrukce. Limitní hodnoty zrychlení nebyly překročeny a konstrukce vyhověla na zatížení chodci.

11 Seznam obrázků

Obr. 3.1 Pohled na lávku z levého břehu řeky	13
Obr. 3.2 Příčný řez konstrukcí v místě závěsu a mimo závěs [8]	13
Obr. 3.3 Podélný řez a pohled a schéma průběhu nivelety [8]	14
Obr. 5.1 Schéma rovinných modelů	20
Obr. 5.2 Uvažovaný příčný řez pro rovinný model se zahrnutím tuhosti desky [8] - upraveno	20
Obr. 5.3 1. vlastní tvar - 0,654 Hz	24
Obr. 5.4 2. vlastní tvar - 1,196 Hz	24
Obr. 5.5 3. vlastní tvar - 2,061 Hz	24
Obr. 5.6 4. vlastní tvar - 2,209 Hz	24
Obr. 5.7 5. vlastní tvar - 3,490 Hz	25
Obr. 5.8 6. vlastní tvar - 3,825 Hz	25
Obr. 5.9 Uvažovaný příčný řez pro rovinný model bez zahrnutí tuhosti desky [8] - upraveno	26
Obr. 5.10 1. vlastní tvar - 0,602 Hz	28
Obr. 5.11 2. vlastní tvar - 1,131 Hz	28
Obr. 5.12 3. vlastní tvar - 1,911 Hz	28
Obr. 5.13 4. vlastní tvar - 2,062 Hz	28
Obr. 5.14 5. vlastní tvar - 3,087 Hz	29
Obr. 5.15 6. vlastní tvar - 3,393 Hz	29
Obr. 6.1 Hlavní nosník 1	31
Obr. 6.2 Hlavní nosník 2	31
Obr. 6.3 Hlavní nosník 3	31
Obr. 6.4 Hlavní nosník 4	31
Obr. 6.5 Hlavní nosník 5	31
Obr. 6.6 Příčný nosník E	31
Obr. 6.7 Příčný nosník B	31
Obr. 6.8 Příčný nosník C	31
Obr. 6.9 Příčný nosník A+F	32

Obr. 6.10 Příčný nosník G	32
Obr. 6.11 Příčný nosník D.....	32
Obr. 6.12 Nosník IPE 160	32
Obr. 6.13 Pylon 1	32
Obr. 6.14 Pylon 3	32
Obr. 6.15 Pylon 2	32
Obr. 6.16 Pylon 5	33
Obr. 6.17 Pylon 4	33
Obr. 6.18 Příčný nosník pylonu ve výšce 3,55 m	33
Obr. 6.19 Příčný nosník pylonu ve výšce 15 m	33
Obr. 6.20 Schéma umístění jednotlivých průřezů na lávce v kratším poli a na pylonu..	34
Obr. 6.21 "Nástavec" na hlavních nosnících	35
Obr. 6.22 Pohled na ukotvení závěsů [8] - upraveno	36
Obr. 6.23 1. vlastní tvar - 0,604 Hz	37
Obr. 6.24 2. vlastní tvar - 1,130 Hz	38
Obr. 6.25 3. vlastní tvar - 1,523 Hz	38
Obr. 6.26 4. vlastní tvar - 1,656 Hz	39
Obr. 6.27 5. vlastní tvar - 1,721 Hz	39
Obr. 6.28 7. vlastní tvar - 2,2,286 Hz	40
Obr. 6.29 6. vlastní tvar - 2,090 Hz	40
Obr. 6.30 8. vlastní tvar - 2,488 Hz	40
Obr. 6.31 9. vlastní tvar - 3,100 Hz	41
Obr. 6.32 10. vlastní tvar - 3,112 Hz	41
Obr. 6.33 11. vlastní tvar - 3,192 Hz	41
Obr. 6.34 12. vlastní tvar - 3,577 Hz	42
Obr. 6.35 13. vlastní tvar - 4,272 Hz	42
Obr. 6.36 15. vlastní tvar - 4,977 Hz	43
Obr. 6.37 14. vlastní tvar - 4,692 Hz	43
Obr. 8.1 Závislost koeficientů k_v a k_h na frekvenci [3]	48
Obr. 9.1 Schéma pasivního pohlcovače (TDM) [4]	50

12 Seznam tabulek

Tab. 5.1 Přepočítané hodnoty objemových hmotností pro rovinný model se zahrnutím tuhosti desky.....	21
Tab. 5.2 Přehled výpočtu momentů setrvačnosti příčných řezů vodorovné konstrukce pro zachování ohybové tuhosti pro rovinný model s vlivem tuhosti desky	22
Tab. 5.3 Přehled výpočtu momentů setrvačnosti pro zachování ohybové tuhosti průřezů pylonu	23
Tab. 5.4 Přehled výpočtu náhradních poloměrů pro zachování normálové tuhosti.....	23
Tab. 5.5 Tab. 5.2 Přehled výpočtu momentů setrvačnosti příčných řezů vodorovné konstrukce pro zachování ohybové tuhosti pro rovinný model bez vlivu tuhosti desky	27
Tab. 5.6 Porovnání vlastních frekvencí rovinných modelů.....	29
Tab. 7.1 Porovnání vlastních frekvencí prostorového modelu a rovinných modelů.....	44
Tab. 7.2 Porovnání vlastních frekvencí z dynamické zkoušky s rovinnými modely.....	44
Tab. 7.3 Porovnání vlastních frekvencí z dynamické zkoušky s prostorovým modelem	45
Tab. 8.1 Přehled posuzovaných frekvencí ve svislém a vodorovném směru [2].....	46
Tab. 8.2 Hodnoty koeficientů útlumu	47
Tab. 8.3 Výsledky odezvy konstrukce na zatížení chodci	49
Tab. 9.1 Výsledky odezvy konstrukce na zatížení chodci bez pohlcovače a s pohlcovačem kmitání	52

13 Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 1990/A2. Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí – Příloha pro mosty. ČNI, duben 2007
- [2] MÁCA, J., ŠTĚPÁNEK, J. Pedestrian load models of footbridges, DynWind 2017
- [3] Grandić, I. Š., Serviceability verification of pedestrian bridges under pedestrian loading, 2015, Tehnički vjesnik 22 pp 527-537
- [4] MÁCA, J. Dynamic response of footbridges with tuned maas dampers, BestInfra 2017 (v tisku)
- [5] MÁCA, J., VALÁŠEK, M. Interaction od Human Gait and Footbridges
- [6] MÁCA, J. Přednášky Dynamika 1, Praha, ČVUT, 2016. Dostupné na <https://mech.fsv.cvut.cz/student/>.
- [7] MÁCA, J. Dynamika stavebních konstrukcí 1, 1. vydání, Praha, ČVUT 2016.
- [8] Výkresová dokumentace pro lávku přes řeku Berounku v Dobřichovicích, TopCON servis s. r. o.
- [9] BITTAR, Z., ŠEJNOHA, J. Numerické metody mechaniky, Praha, ČVUT, 1992, ISBN 80-01-00855-X.
- [10] BAŤA, M., PLACHÝ. V., TRÁVNÍČEK. F. Dynamika stavebních konstrukcí, 1. vydání. Bratislava 1987, 448 s
- [11] KALA, J. Kmitání mostní konstrukce vyvolané pohybe osob, Brno, VUT 2009.
- [12] DAZIO Alessandro. Fundamentals of Structural Dynamics, An-Najah National University, 2013.
- [13] Manuál pro program Dlubal RFEM 5:
<http://www.dlubal.cz/manualy-pro-kategorii-dynamicka-analyza.aspx>
- [14] Manuál pro přídatný modul RF – DYNAM programu Dlubal RFEM:
<http://www.dlubal.cz/manualy-pro-kategorii-dynamicka-analyza.aspx>
- [15] Čítek, A. Experimentální dynamická analýza stávající lávky pro pěší, ČVUT Fakulta stavební, 2017

14 Použitý software

Autodesk:	AutoCAD 2016
Software Dlubal:	RFEM 5.08
- Přídavné moduly a doplňky:	RF – DYNAM
	SHAPE – THIN 8.07
Microsoft:	MS Office 2016 – Word, Excel