

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta stavební



Diplomová práce

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra mechaniky

Experimentální a teoretická analýza dynamického chování  
existující lávky pro chodce

The Experimental and Theoretical Analysis of the Existing  
Footbridge

**Autor:** Bc. Magdaléna Boháčová

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Michal Polák, CSc.

**Akademický rok:** 2021/2022

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Boháčová Jméno: Magdaléna Osobní číslo: 468724  
 Zadávající katedra: K132 - katedra mechaniky  
 Studijní program: SI - stavební inženýrství  
 Studijní obor: K - konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Experimentální a teoretická analýza dynamického chování existující lávky pro chodce.

Název diplomové práce anglicky: The Experimental and Theoretical Analysis of the Existing Footbridge.

Pokyny pro vypracování:

Součástí diplomové práce bude příprava, realizace a vyhodnocení dynamického experimentu in situ, při kterém budou stanoveny aktuální hodnoty vlastních frekvencí existující lávky pro chodce. Dále bude prověřeno kmitání mostovky vyvolané chodci a vibrace závěsů od větru. Dále bude sestaven teoretický 3D model lávky, který bude verifikován na základě výsledků experimentu.

Seznam doporučené literatury:

ČSN 736209 Zatěžovací zkoušky mostních objektů.

ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou.

ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.

Pirner, M. - Fischer, O.: Dynamika ve stavební praxi.

Maia a kolektiv: Theoretical and Experimental Modal Analysis.

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. Michal Polák, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 30.9.2021

Termín odevzdání diplomové práce: 2. 1. 2022

*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

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“.*

30.9.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací na téma „Experimentální a teoretická analýza dynamického chování existující lávky pro chodce“ vypracovala samostatně pod odborným vedením prof. Ing. Michala Poláka, CSc. a všechny použité zdroje jsem uvedla v příloženém seznamu.

V Praze dne 2. 1. 2022

.....

Bc. Magdaléna Boháčová

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala především prof. Ing. Michalu Polákovi, CSc. za odborné vedení, trpělivost, čas a cenné rady, které mi při zpracování práce poskytl. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Tomáši Plachému, Ph.D. za odbornou pomoc při experimentu. Také bych chtěla poděkovat společnosti Valbek, s. r. o. za poskytnutí realizační dokumentace lávky pro chodce v Lužci nad Vltavou. Nakonec bych ráda poděkovala Bc. Martinu Mildnerovi nejen za pomoc při experimentu, ale i za oporu, kterou mi byl během zpracování této práce.

## **Abstrakt**

Předmětem této práce je experimentální a teoretická analýza dynamického chování existující lávky pro chodce. V rešeršní části práce je shrnuta problematika především experimentální dynamické analýzy lávek pro chodce, a dále problematika týkající se kmitání závěsů. Druhá část práce je zaměřena na analýzu dynamického chování lávky pro chodce v Lužci nad Vltavou. Na lávce pro chodce byly provedeny dva experimenty. První experiment byl zaměřen na kmitání závěsů způsobené větrem. V rámci druhého experimentu byla provedena experimentální modální analýza, ze které byly vyhodnoceny vlastní frekvence a vlastní tvary vodorovné nosné konstrukce lávky. Poté byla realizována dynamická zkouška zatěžovací, při které byla sledována dynamická odezva konstrukce lávky na dynamické zatížení chodci. Získané výsledky byly posouzeny podle současných norem, předpisů a doporučení. Dále byl sestaven teoretický 3D model lávky, na kterém byly vypočteny vlastní frekvence a vlastní tvary konstrukce. Následně byla provedena verifikace a identifikace modelu lávky.

## **Klíčová slova**

Dynamika, lávka pro chodce, experiment, vibrace, kmitání závěsů, experimentální modální analýza, dynamická zkouška zatěžovací, kritérium pohody, chodci, posouzení dynamické odezvy, 3D model, verifikace, identifikace

## **Abstract**

The topic of this thesis is an experimental and theoretical analysis of the dynamic behavior of an existing footbridge. In the first part of this thesis is a summary of a problematics of the experimental dynamic analysis of footbridges, as well as the problematics related to vibrations of cable stays. The second part of this thesis is dedicated to the analysis of the dynamic behavior of the footbridge in Lužec nad Vltavou across the river Vltava. Two dynamic experiments were carried out on this footbridge. The first experiment was focused on vibrations of cable stays caused by wind. The experimental modal analysis was carried out within the second experiment and natural frequencies and modes of the structure were evaluated from it. Then the dynamic load testing was performed. The dynamic response to dynamic pedestrian load was monitored. The final results were assessed according to current standards, regulations and recommendations. Then the theoretical 3D model of the footbridge was compiled. Natural vibration frequencies and modes were calculated. Then the verification and identification of the model was done.

## **Keywords**

Dynamics, footbridge, experiment, vibration, vibration of stay cables, experimental modal analysis, dynamic load testing, comfort criterion, pedestrians, assessment of dynamic response, 3D model, verification, identification

---

## Obsah

1	Úvod .....	18
2	Cíle práce.....	19
3	Úvod do problematiky.....	20
3.1	Základní úlohy dynamiky.....	20
3.1.1	Volné netlumené kmitání.....	20
3.1.2	Vynucené tlumené kmitání.....	21
4	Experimentální analýza lávek pro chodce.....	22
4.1	Dynamické zkoušky .....	22
4.1.1	Dynamická zkouška informativní.....	22
4.1.2	Dynamická zkouška zatěžovací.....	24
4.2	Souhrn požadavků dle norem, předpisů a doporučení.....	24
4.3	Matematické postupy pro vyhodnocení vybraných parametrů a jevů ze záznamů kmitání .....	28
4.3.1	Fourierova transformace .....	28
4.3.2	Efektivní hodnota zrychlení.....	29
4.3.3	Útlum a jeho charakteristiky .....	30
4.3.4	Porovnání charakteristik vlastního kmitání z výpočtu a z experimentu ...	31
4.3.4.1	Shoda vlastních frekvencí.....	32
4.3.4.2	Shoda vlastních tvarů .....	32
5	Účinky chodců na lávky pro chodce .....	34
5.1	Zatížení na mostovku způsobené pohybem chodce .....	34
5.2	Kritický rozsah frekvencí lidského kroku z hlediska možného vzniku rezonance .....	35
6	Specifika kmitání závěsů.....	37
6.1	Strunová teorie.....	37
6.2	Prutová teorie.....	39
6.3	Jevy způsobené větrem.....	39
6.3.1	Odtrhávání Kármánových (Strouhalových) vírů.....	40



---

6.3.2	Galloping lan.....	41
<b>7</b>	<b>Experimentální analýza dynamického chování lávky pro chodce v Lužci nad Vltavou.....</b>	<b>42</b>
7.1	Popis objektu.....	42
7.2	Měřicí linka.....	47
7.3	Experiment zaměřený na kmitání závěsů.....	48
7.3.1	Meteorologické podmínky .....	48
7.3.2	Průběh a uspořádání experimentu.....	49
7.3.3	Vyhodnocení experimentu .....	53
7.3.3.1	Vlastní frekvence závěsů.....	53
7.3.3.2	Předpínací síla v závěsech.....	57
7.3.3.3	Identifikace předpínací síly a ohybové tuhosti závěsu.....	63
7.3.3.4	Maximální výkmity a rozkmity.....	64
7.3.4	Shrnutí a zhodnocení výsledků experimentu .....	65
7.4	Experimentální modální analýza a dynamická zkouška zatěžovací .....	66
7.4.1	Meteorologické podmínky .....	66
7.4.2	Plán experimentu.....	67
7.4.3	Experimentální modální analýza .....	68
7.4.3.1	Uspořádání experimentální modální analýzy .....	68
7.4.3.2	Průběh experimentální modální analýzy.....	71
7.4.3.3	Vyhodnocení experimentální modální analýzy.....	72
7.4.4	Dynamická zkouška zatěžovací.....	83
7.4.4.1	Uspořádání dynamické zkoušky zatěžovací.....	83
7.4.4.2	Zatěžovací stavy.....	85
7.4.4.3	Vyhodnocení dynamické zkoušky zatěžovací.....	87
7.4.4.4	Posouzení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení způsobené chodci.....	95
7.4.5	Shrnutí a zhodnocení výsledků experimentální modální analýzy a dynamické zkoušky zatěžovací.....	107

---

<b>8</b>	<b>Teoretická analýza dynamického chování lávky pro chodce v Lužci nad Vltavou</b>	<b>108</b>
8.1	Tvorba 3D modelu konstrukce	108
8.1.1	Vodorovná nosná konstrukce	109
8.1.2	Závěsy	114
8.1.3	Pylon	116
8.1.4	Opěra O3	118
8.1.5	Podpěření konstrukce	118
8.1.6	Zatěžovací stavy	119
8.2	Verifikace teoretického 3D modelu konstrukce	120
8.3	Jednotlivé kroky identifikace teoretického 3D modelu konstrukce	122
8.3.1	Změna objemové tíhy betonu mostovky	122
8.3.2	Přesnější modelování hlavy pylonu	124
8.3.3	Změna osových sil v závěsech	126
8.3.4	Změna podpěření	129
8.4	Vypočtené vlastní tvary kmitání konstrukce	130
8.5	Shoda vypočtených a změřených vlastních tvarů posouzená pomocí koeficientu MAC	138
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>142</b>
<b>10</b>	<b>Seznam literatury</b>	<b>144</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma uspořádání měření při metodě FVT [5].....	23
Obr. 2 Rozsahy hodnot zrychlení [ $m/s^2$ ] pro svislé kmitání mostovky [1] .....	26
Obr. 3 Rozsahy hodnot zrychlení [ $m/s^2$ ] pro vodorovné kmitání mostovky [1] .....	26
Obr. 4 Přípustné vážené RMS hodnoty zrychlení pro svislé kmitání v závislosti na frekvenci [13].....	27
Obr. 5 Přípustné vážené RMS hodnoty zrychlení pro vodorovné kmitání v závislosti na frekvenci [13].....	27
Obr. 6 Fourierova transformace [16].....	28
Obr. 7 Efektivní hodnota (RMS) [36] .....	30
Obr. 8 Průběh výchylky v čase při volném tlumeném kmitání [2] .....	31
Obr. 9 Časový průběh svislé kontaktní síly při chůzi (upraveno z [19]).....	34
Obr. 10 Harmonické funkce obsažené v aproximaci průběhu svislé kontaktní síly (upraveno z [19]) .....	35
Obr. 11 Stojaté vlnění na struně [25].....	37
Obr. 12 Příklad kmitání struny zobrazený ve frekvenční oblasti.....	38
Obr. 13 Kármánova vírová stezka [37].....	41
Obr. 14 Lávka v Lužci nad Vltavou – pohled ve směru staničení lávky .....	42
Obr. 15 Podélný řez lávky v Lužci nad Vltavou (upraveno z [32]) .....	43
Obr. 16 Pohled na vodorovnou nosnou konstrukci zespoda od opěry O3 směrem na Lužec nad Vltavou.....	44
Obr. 17 Pohled na kotevní blok pro uchycení reverzního závěsu u opěry O3 .....	45
Obr. 18 Pohled na lávku v Lužci nad Vltavou .....	45
Obr. 19 Pohled na pylon směrem od Bukolu na Lužec nad Vltavou.....	46
Obr. 20 Dva snímače zrychlení Brüel&Kjaer 8344 připevněné magnetem k ocelovému závaží při dynamické zatěžovací zkoušce.....	47
Obr. 21 Měřicí ústředna SIRIUS.....	48
Obr. 22 Průběh teploty vzduchu v průběhu dne 9. 4. 2021.....	49
Obr. 23 Schéma označení závěsů a umístění snímačů v příčném řezu při experimentu 9. 4. 2021 .....	51
Obr. 24 Umístění snímačů zrychlení na závěsech .....	51
Obr. 25 Schéma označení závěsů v podélném řezu při experimentu 9.4.2021 (upraveno z [32]) .....	52
Obr. 26 Kloubové připojení závěsu k mostovce .....	53
Obr. 27 Vybrané záznamy ve frekvenční oblasti s označením vlastních frekvencí příslušných závěsů.....	56

Obr. 28 Porovnání vypočtených sil v závěsech podle frekvenční metody s hodnotami naměřenými 11. 8. 2020 .....	62
Obr. 29 Průběh teplot vzduchu a povrchu mostovky během dne 15. 10. 2021.....	66
Obr. 30 Schéma uspořádání modální analýzy v příčném řezu (upraveno z [32]).....	69
Obr. 31 Schéma uspořádání experimentální modální analýzy v podélném řezu a půdorysu (upraveno z [32]) .....	70
Obr. 32 Zjištěná frekvence dunění pomocí aplikace Spectroid.....	71
Obr. 33 „Complex Mode Indetificator Function“ s vyznačenými vyhodnocenými vlastními frekvencemi.....	73
Obr. 34 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(1)} = 0,72$ Hz .....	74
Obr. 35 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(2)} = 0,92$ Hz .....	75
Obr. 36 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(3)} = 1,19$ Hz .....	75
Obr. 37 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(4)} = 1,73$ Hz .....	76
Obr. 38 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(5)} = 2,11$ Hz .....	76
Obr. 39 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(6)} = 2,28$ Hz .....	77
Obr. 40 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(7)} = 2,77$ Hz .....	77
Obr. 41 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(8)} = 2,84$ Hz .....	78
Obr. 42 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(9)} = 2,98$ Hz .....	78
Obr. 43 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(10)} = 3,13$ Hz .....	79
Obr. 44 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(11)} = 3,41$ Hz .....	79
Obr. 45 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(12)} = 3,61$ Hz .....	80
Obr. 46 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(13)} = 4,20$ Hz .....	80
Obr. 47 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(14)} = 4,56$ Hz .....	81
Obr. 48 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí $f_{(15)} = 4,89$ Hz .....	81
Obr. 49 Záznam č. 022, snímač 112z, dokmitání konstrukce .....	82
Obr. 50 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce, záznam č. 022, snímač 112z .....	82
Obr. 51 Uspořádání dynamické zkoušky zatěžovací (zdroj: upraveno z [32]) .....	84
Obr. 52 Záznam č. 010, snímač 112y .....	91
Obr. 53 Záznam č. 010, snímač 132z.....	92
Obr. 54 Záznam č. 022, snímač 112y .....	93
Obr. 55 Záznam č. 022, snímač 132z.....	94
Obr. 56 Teoretický 3D model konstrukce v programu Dlubal RFEM 6.01 .....	108
Obr. 57 Příčný řez mostovkou – způsob modelování ve výpočetním programu .....	109
Obr. 58 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – podélník .....	110
Obr. 59 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – zjednodušení náběhu.....	110

---

Obr. 60 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – příčník.....	111
Obr. 61 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – předpínací kabel.....	112
Obr. 62 Průřez příčníku nad O1 – schéma natočení průřezu.....	112
Obr. 63 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – příčník nad opěrou O1 .....	113
Obr. 64 Průřez příčníku u O3 – schéma natočení průřezu.....	113
Obr. 65 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – příčník u opěry O3.....	114
Obr. 66 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – závěsy X01 až X14.....	115
Obr. 67 Pohled na pylon ve 3D modelu konstrukce .....	116
Obr. 68 Tvorba náhradního ocelového průřezu za část ocelového pylonu vyplněnou betonem.....	116
Obr. 69 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – stojka ocelového pylonu v hlavě ..	117
Obr. 70 Zjednodušené modelování hlavy pylonu .....	117
Obr. 71 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – dřík opěry O3.....	118
Obr. 72 Podrobnější modelování hlavy pylonu v rámci druhého kroku identifikace modelu .....	124
Obr. 73 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(1)}=0,775$ Hz.....	131
Obr. 74 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(2)}=0,976$ Hz.....	132
Obr. 75 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(3)}=1,118$ Hz.....	132
Obr. 76 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(4)}=1,617$ Hz.....	133
Obr. 77 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(6)}=1,955$ Hz.....	133
Obr. 78 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(7)}=2,088$ Hz.....	134
Obr. 79 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(8)}=2,596$ Hz.....	134
Obr. 80 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(9)}=2,633$ Hz.....	135
Obr. 81 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(10)}=2,933$ Hz.....	135
Obr. 82 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(11)}=3,076$ Hz.....	136

Obr. 83 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(12)}=3,128$ Hz.....	136
Obr. 84 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(14)}=3,672$ Hz.....	137
Obr. 85 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(15)}=3,971$ Hz.....	137
Obr. 86 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí $f_{(16)}=4,126$ Hz.....	138

## Seznam tabulek

Tab. 1 Mezní hodnoty vážených hodnot zrychlení podle [6].....	25
Tab. 2 Úrovně pohodlí chodců na lávkách pro pěší podle [12] .....	25
Tab. 3 Hodnoty logaritmického dekrementu útlumu a poměrného útlumu podle zkušeností prof. Ing. Michala Poláka, CSc.....	31
Tab. 4 Hodnoty mezních odchylek pro porovnání vypočtených a změřených vlastních frekvencí konstrukce [6].....	32
Tab. 5 Údaje o frekvencích a rychlostech lidského pohybu podle [22].....	35
Tab. 6 Přehled porízených záznamů .....	50
Tab. 7 Vyhodnocené vlastní frekvence závěsů.....	54
Tab. 8 Předpínací síly v závěsech určené podle strunové teorie.....	58
Tab. 9 Předpínací síly v závěsech určené podle prutové teorie s uložením typu kloub – kloub .....	60
Tab. 10 Porovnání výsledků získaných výpočtem podle strunové a prutové teorie .....	61
Tab. 11 Identifikace předpínací síly a ohybové tuhosti na základě vztahu (20).....	63
Tab. 12 Maximální vyhodnocené výkmity výchylky ve sledovaných bodech závěsů a jim odpovídající rozkmity výchylky .....	65
Tab. 13 Přehled vyhodnocených vlastních frekvencí a popis charakteru odpovídajících vlastních tvarů .....	73
Tab. 14 Seznam porízených záznamů při dynamické zkoušce zatěžovací.....	85
Tab. 15 Vlastní frekvence konstrukce podle předběžné FFT analýzy v porovnání s vlastními frekvencemi konstrukce naměřenými zaměstnanci ÚTAM AV ČR a charakteru vlastních tvarů kmitání konstrukce .....	87
Tab. 16 Vyhodnocené maximální hodnoty výkmitů zrychlení naměřené ve sledovaných bodech mostovky.....	88
Tab. 17 Vyhodnocené maximální RMS hodnoty zrychlení v jednotlivých sledovaných bodech mostovky.....	89
Tab. 18 Shrnutí posouzených RMS hodnot zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžný provoz“, podle [6] .....	96
Tab. 19 Shrnutí posouzených RMS hodnot zrychlení ze všech záznamů podle [6].....	96
Tab. 20 RMS hodnoty zrychlení posouzené podle [6] .....	96
Tab. 21 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžný provoz“, podle [11] .....	98
Tab. 22 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení ze všech záznamů podle [11] .....	98
Tab. 23 Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení posouzené podle [11] .....	98

---

Tab. 24 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžnou úroveň dynamického zatížení“, podle NAD normy [12] .....	100
Tab. 25 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení ze všech záznamů podle NAD [12].....	100
Tab. 26 Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení posouzené podle NAD [12].....	100
Tab. 27 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžnou úroveň dynamického zatížení“, podle [1].....	102
Tab. 28 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení ze všech záznamů podle [1].....	102
Tab. 29 Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení posouzené podle [1].....	102
Tab. 30 Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení ve vodorovném směru posouzené na nebezpečí vzniku „lock-in“ efektu podle kritérií uvedených v [1].....	103
Tab. 31 Shrnutí posouzených RMS hodnot zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžný provoz“, podle [13] .....	105
Tab. 32 Shrnutí posouzení všech RMS hodnot zrychlení ze všech záznamů podle [13]	105
Tab. 33 RMS hodnoty zrychlení posouzené podle [13] .....	106
Tab. 34 Přehled závěsů, použitých typů závěsů dle [32], plochy závěsu udávané výrobcem a hodnota vypočteného průměru náhradního ocelového průřezu.....	114
Tab. 35 Seznam zatěžovacích stavů pro výpočet modální analýzy.....	119
Tab. 36 Hodnoty uvažovaných osových sil v závěsech ve výpočetním modelu.....	119
Tab. 37 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – verifikace 3D modelu.....	121
Tab. 38 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – první krok identifikace .....	122
Tab. 39 Porovnání zlepšení/zhoršení výsledků výpočtu vlastních frekvencí konstrukce – první krok identifikace .....	123
Tab. 40 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – druhý krok identifikace .....	125
Tab. 41 Porovnání zlepšení/zhoršení výsledků výpočtu vlastních frekvencí konstrukce – druhý krok identifikace .....	125
Tab. 42 Hodnoty sil v závěsech, které byly použity v rámci třetího kroku identifikace .....	126
Tab. 43 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – třetí krok identifikace.....	127
Tab. 44 Porovnání zlepšení/zhoršení výsledků výpočtu vlastních frekvencí konstrukce – třetí krok identifikace.....	128
Tab. 45 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – čtvrtý krok identifikace.....	129
Tab. 46 Porovnání zlepšení/zhoršení výsledků výpočtu vlastních frekvencí konstrukce – čtvrtý krok identifikace.....	130



Tab. 47 Přehled vypočtených vlastních frekvencí a popis charakteru odpovídajících vlastních tvarů .....	131
Tab. 48 Přehled odpovídajících si vypočtených a změřených vlastních frekvencí konstrukce podle vizuální kontroly vlastních tvarů kmitání.....	139
Tab. 49 Vypočtený koeficient korelace modální analýzy MAC mezi vypočtenými a změřenými vlastními tvary konstrukce .....	140
Tab. 50 Vypočtený koeficient korelace modální analýzy MAC mezi změřenými vlastními tvary konstrukce .....	141

# 1 Úvod

V současné době se u stavebních konstrukcí (lávky pro chodce nevyjímaje) projevuje tendence úspory materiálu, což je žádoucí nejen z hlediska ekonomického, ale i z hlediska architektonického. Tato skutečnost však obnáší i určitá rizika, u lávek pro chodce především zvýšenou pravděpodobnost vzniku rezonance. Při rozpětí lávky zhruba 25 m a více totiž zpravidla leží některá z vlastních frekvencí v takovém intervalu frekvencí, kterými působí chodci na mostovku při jejich pohybu po lávce. Na tento fenomén by se měl v ideálním případě brát ohled již při návrhu lávky, není však vždy možné riziko tohoto jevu zcela vyloučit. Při rezonanci může dojít k výraznému kmitání lávky, což nepříznivě ovlivňuje komfort chodců, v extrémním případě může dokonce znemožnit přirozenou chůzi, jako tomu bylo např. v roce 2000 u lávky Millennium Bridge v Londýně [1]. Tendence úspory materiálu se týká nejen mostovky, ale i dalších konstrukčních prvků, např. závěsů. Závěsy mají lokální vlastní frekvence, u kterých hrozí riziko rozkmitání větrem. Mimoto kmitání buzené větrem je vědecká disciplína, jejíž vývoj stále pokračuje a dosud existují takové jevy, které podle současného stavu poznání v této oblasti nebyly objasněny.

První část práce obsahuje shrnutí problematiky dynamické analýzy lávek pro chodce, a to především experimentální, protože právě experiment je základním předmětem této práce. Součástí je také souhrn požadavků dle norem, předpisů a doporučení, které se dané problematiky týkají. Dále jsou v této práci popsány matematické postupy pro vyhodnocení vybraných parametrů a jevů ze záznamů kmitání. V závěru první části práce je kapitola věnovaná popisu specifik kmitání závěsů.

Druhá část práce je věnována dynamické analýze existující lávky pro chodce v Lužci nad Vltavou. Součástí je popis dvou uskutečněných experimentů na této lávce pro chodce. První experiment byl zaměřen na kmitání závěsů od větru, v rámci jeho vyhodnocení byly vypočteny síly v závěsech frekvenční metodou. Druhý experiment byl zaměřen na zjištění dynamických charakteristik vodorovné nosné konstrukce lávky, z něhož byly vyhodnoceny vlastní frekvence a vlastní tvary vodorovné nosné konstrukce. Dále byla realizována dynamická zkouška zatěžovací, při které byla sledována dynamická odezva konstrukce lávky na dynamické zatížení chodci, vyhodnocené výsledky byly posouzeny podle současných norem, předpisů a doporučení. Součástí dynamické analýzy lávky pro chodce v Lužci nad Vltavou bylo také sestavení teoretického 3D modelu konstrukce ve výpočetním programu Dlubal RFEM a jeho verifikace a identifikace na základě výsledků experimentů.

## 2 Cíle práce

Předmětem této práce bylo provedení experimentální a teoretické analýzy dynamického chování existující lávky pro chodce. Součástí této práce byly celkem dva experimenty in situ. Dílčí cíle práce lze rozdělit do následujících bodů:

- příprava experimentů,
- realizace experimentů,
- vyhodnocení zaznamenaného kmitání závěsů lávky,
- vyhodnocení charakteristik vlastního kmitání lávky,
- vyhodnocení dynamické odezvy na dynamické zatížení chodci,
- posouzení dynamické odezvy mostovky na dynamické zatížení chodci podle současných norem, předpisů a doporučení,
- sestavení teoretického 3D modelu konstrukce,
- verifikace teoretického 3D modelu konstrukce na základě výsledků experimentu,
- identifikace teoretického 3D modelu konstrukce na základě výsledků experimentu,
- posouzení shody vypočtených a změřených vlastních tvarů konstrukce.

## 3 Úvod do problematiky

Základem klasické mechaniky jsou tři Newtonovy zákony, které doplňuje d'Alembertův princip. Dynamika řeší úlohy o dynamické rovnováze, do které jsou kromě pružných a vnějších sil zahrnuty i setrvačné a tlumicí síly. Dynamická odezva konstrukce závisí na dynamických vlastnostech konstrukce, jako jsou tuhost, hmotnost a útlum, a na časovém průběhu zatížení. Oproti tomu statika řeší úlohy o statické rovnováze vnitřních a vnějších sil a odezva na statické zatížení závisí pouze na tuhosti konstrukce [2] [3].

### 3.1 Základní úlohy dynamiky

Na rozdělení dynamických úloh lze nahlížet z více hledisek. Podle toho, je-li bráno v úvahu tlumení, rozlišuje se kmitání na tlumené a netlumené. Je-li soustava zatížena časově proměnnou silou, jedná se o kmitání vynucené. Pakliže byla soustava uvedena do pohybu udělením počátečních podmínek a dále na ni žádná síla nepůsobí, jedná se o kmitání volné. Kmitání systému popisují pohybové rovnice ve tvaru soustav obyčejných diferenciálních rovnic<sup>1</sup> [2] [4].

#### 3.1.1 Volné netlumené kmitání

V této kapitole bylo čerpáno z [2] a [4].

Cílem řešení pohybové rovnice je stanovit dynamické charakteristiky systému, a to vlastní kruhové frekvence a odpovídající vlastní tvary kmitání. Volné netlumené kmitání soustavy s  $n$  stupni volnosti je popsáno pohybovou rovnicí

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{r}(t) = \mathbf{0}, \quad (1)$$

kde  $\mathbf{M}$  je matice hmotnosti,

$\mathbf{K}$  je matice tuhosti,

$\mathbf{r}(t)$  je vektor přemístění a jeho druhá derivace je vektor zrychlení.

Řešení rovnice je ve tvaru

$$\mathbf{r}(t) = \boldsymbol{\Phi}(A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t)), \quad (2)$$

kde konstanty  $\mathbf{A}$  a  $\mathbf{B}$  lze určit z počátečních podmínek. Dosazením (2) do pohybové rovnice (1) vychází

---

<sup>1</sup> obyčejné diferenciální rovnice jsou takové rovnice, které obsahují neznámou funkci jedné nezávislé proměnné a její derivace

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\boldsymbol{\phi}(A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t)) = \mathbf{0} \quad (3)$$

a protože  $(A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t))$  není v úlohách dynamiky identicky rovno nule, musí být

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M})\boldsymbol{\phi}_n = \mathbf{0}, \quad (4)$$

což je zobecněný problém vlastních čísel. Neznámé jsou vlastní kruhové frekvence  $\omega_n$  a vlastní tvary kmitání  $\boldsymbol{\phi}_n$ , kdy  $n$  je počet stupňů volnosti a zároveň počet vlastních tvarů a frekvencí soustavy.

### 3.1.2 Vynucené tlumené kmitání

Vynucené tlumené kmitání soustavy s  $n$  stupni volnosti je popsáno pohybovou rovnicí

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{r}(t) = \mathbf{f}(t), \quad (5)$$

kde  $\mathbf{C}$  je matice útlumu,

$\dot{\mathbf{r}}(t)$  je vektor rychlostí a

$\mathbf{f}(t)$  je vektor budících sil.

Určení matice útlumu soustavy je obvykle velmi obtížné. S dostatečnou přesností lze použít buď tzv. Rayleighův útlum, který předpokládá matici útlumu jako lineární kombinaci matice hmotnosti a tuhosti, nebo tzv. viskózní útlum, u nějž je matice útlumu závislá na matici hmotnosti a rychlosti soustavy.

## 4 Experimentální analýza lávek pro chodce

Důvody k experimentálnímu zkoumání konstrukcí mohou být různé, např. se může jednat o ověření spolehlivosti nových konstrukcí před jejich uvedením do provozu, identifikace výpočtových modelů, zjištění parametrů, které nelze jinak určit, popř. ověření, zda je výpočetní model dostatečně výstižný atd. [5]. V následujících kapitolách je podrobněji popsáno uspořádání zkoušek na lávkách pro chodce, postupy při vyhodnocování záznamů kmitání konstrukce a kritéria pro posouzení mezního stavu použitelnosti (komfortní kritérium), která se lávek pro chodce týkají.

### 4.1 Dynamické zkoušky

Dynamická zkouška je souhrn experimentálních metod používaných pro sledování kmitání stavebních konstrukcí, jejichž účelem může být např. prověření dynamických vlastností nebo stavu konstrukce, ověření její spolehlivosti z hlediska odpovídajících mezních stavů únosnosti a použitelnosti, popř. získání pokladů pro teoretický výpočet. Dynamické zkoušky lze rozdělit na dynamické zkoušky zaměřené na stanovení charakteristik vlastního kmitání (experimentální modální analýza, dynamické zkoušky informativní [6]), a dále na dynamické zkoušky zaměřené na sledování vynuceného kmitání stavebních konstrukcí (dynamické zkoušky zatěžovací) [5] [7].

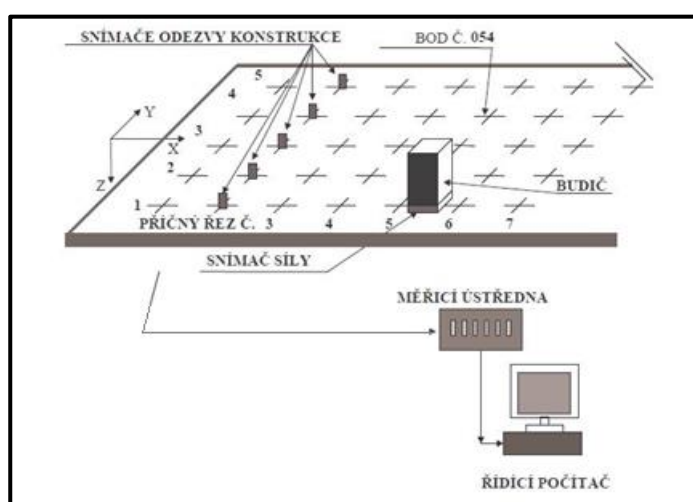
Obecná problematika dynamických zkoušek stavebních konstrukcí je popsána normou ČSN 73 2044 „Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí“ [8], která stanovuje, za jakých podmínek a jakým způsobem lze dynamické zkoušky provádět. Zatěžovacími zkouškami mostních konstrukcí se zabývá norma ČSN 73 6209 „Zatěžovací zkoušky mostních objektů“ [6].

#### 4.1.1 Dynamická zkouška informativní

Dynamické zkoušky informativní jsou zkoušky zaměřené na charakteristiky vlastního kmitání konstrukce. Těmi jsou frekvence vlastního kmitání, tvary vlastního kmitání a útlum vlastního kmitání (logaritmický dekrement útlumu, poměrný útlum) [5]. Ve smyslu názvosloví ČSN 73 2044 je pojem „dynamická zkouška informativní“ totéž jako „experimentální modální analýza“ [7]. Existují dva základní postupy experimentálního určování charakteristik vlastního kmitání zkoušené konstrukce, jsou jimi AVT (Ambient Vibration Testing) a FVT (Forced Vibration Testing). Tyto dva způsoby se liší ve vyhodnocení, ve většině případů i v buzení [7].

Při metodě AVT je využíváno zdrojů dynamického zatížení, které na konstrukci přirozeně působí. Přirozeným zdrojem dynamického zatížení může být např. vítr, mikroseismicita či pohyblivé zatížení (zatížení chodci či dopravou) [5]. Při metodě AVT je tedy objekt rozkmitáván neznámými budícími silami, jejichž dynamické vlastnosti není možné sledovat. Měřicí linka pro metodu AVT se obvykle skládá z několika snímačů odezvy konstrukce, včetně referenčního snímače umístěného v referenčním bodě, měřicí ústředny a řídicího počítače. Určení polohy referenčního bodu vychází z požadavku, aby každý z hledaných vlastních tvarů konstrukce měl v tomto bodě co největší pořadnici. Pokud by měl některý z vlastních tvarů konstrukce v tomto bodě uzel kmitání, bylo by problematické jej vyhodnotit. Na konstrukci je experimentátory vhodně zvolena síť bodů, ve kterých je měřena dynamická odezva, snímače jsou při měření mezi těmito body v ideálním případě postupně po řezech přemístovány [7].

Při metodě FVT působí na konstrukci řízená budící síla, jež konstrukci rozkmitává. K buzení konstrukce se většinou používá budič kmitání umístěný v jediném bodě. Určení bodu umístění budiče vychází z požadavku, aby každý z hledaných vlastních tvarů konstrukce měl v tomto bodě co největší pořadnici. Pokud by měl některý z vlastních tvarů konstrukce v tomto bodě uzel kmitání, bylo by prakticky nemožné jej vybudit. Na rozdíl od metody AVT je možné sledovat dynamické vlastnosti (budící frekvence, amplituda) budící síly. Základní část měřicí linky pro metodu FVT zůstává stejná jako při AVT, a to: snímače odezvy konstrukce, měřicí ústředna a řídicí počítač. Při FVT je nutné sledovat dynamické vlastnosti působící budící síly, a proto jsou do měřicího systému zapojeny snímače síly umístěné mezi budičem a konstrukcí [7] [9].



Obr. 1 Schéma uspořádání měření při metodě FVT [5]

### 4.1.2 Dynamická zkouška zatěžovací

Dynamická zatěžovací zkouška se zabývá vynuceným kmitáním, slouží ke zjištění dynamické odezvy konstrukce na užité, popř. jiné dynamické zatížení [7]. Zatížení použité při dynamické zkoušce zatěžovací musí dle [8] odpovídat užitému zatížení z hlediska místa působení i časového průběhu. Při dynamické zatěžovací zkoušce norma [6] připouští použití budiče kmitání. Podle [8] se dynamická zatěžovací zkouška provádí v různých případech, jedním z nich je například nutnost zjistit dynamickou odezvu konstrukce pro srovnání s dynamickým výpočtem.

Při dynamické zkoušce zatěžovací s dynamickým zatížením způsobeným chodci se vyhodnocují maximální výkmity měřených veličin při vynuceném kmitání, a to v dostatečném počtu bodů konstrukce. Je možné vyhodnotit i další amplitudové a frekvenční charakteristiky dynamické odezvy konstrukce.

## 4.2 Souhrn požadavků dle norem, předpisů a doporučení

Této problematice se autorka podrobněji věnovala ve své bakalářské práci [10]. Zde je uveden pouze stručný přehled požadavků dle norem, předpisů a doporučení.

ČSN 73 6209 „Zatěžovací zkoušky mostních objektů“ [6]

V normě [6] je uvedeno: „Při dynamické zatěžovací zkoušce lávek pro pěší a/nebo cyklisty se provoz na lávce simuluje zpravidla čtyřmi způsoby:

- a) náhodné přechody chodců po lávce na úrovni předpokládané hustoty provozu (počet chodců za jednotku času);
- b) vybuzení kroutivého nebo svislého ohybového kmitání lávky synchronizovaným přechodem dvou chodců našlapujících vždy „stejnou nohou“; kroková frekvence se volí tak, aby odezva lávky na přechod chodců byla co největší;
- c) vybuzení vodorovného příčného kmitání synchronizovaným přechodem dvou chodců našlapujících vždy „stejnou nohou“; kroková frekvence se volí tak, aby odezva lávky na přechod chodců byla co největší;
- d) přejezd lehkého nákladního auta u lávek, které jsou na tento přejezd navrhovány.“

Kritériem použitelnosti při dynamické zatěžovací zkoušce lávky pro chodce z hlediska účinků vibrací na lidský organismus je vážená efektivní hodnota zrychlení s použitím váhové funkce  $W_m$ . Vážená efektivní hodnota zrychlení se stanovuje nezávisle



pro svislý a vodorovný směr. Pokud nejsou mezní hodnoty uvedeny v projektu, použijí se hodnoty z následující tab. 1.

Tab. 1 Mezní hodnoty vážených hodnot zrychlení podle [6]

Druh kmitání	$a_{w,ef}$ [ $m/s^2$ ]
Svislé kmitání	0,50
Vodorovné kmitání	0,14
Vodorovné kmitání při výjimečném zatížení davem lidí	0,28

ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [11]

V normě [11] jsou doporučeny maximální hodnoty zrychlení mostovky lávky, a to:

- 0,7  $m/s^2$  pro svislá kmitání,
- 0,2  $m/s^2$  pro vodorovná kmitání od běžné dopravy a
- 0,4  $m/s^2$  pro vodorovné vibrace od výjimečného zatížení davem lidí.

Dále je v normě [11] uvedeno, že kritéria pohody chodců se mají ověřit v případech, když základní frekvence nosné konstrukce mostu je menší než 5 Hz pro svislé kmitání lávky a 2,5 Hz pro vodorovné (příčné) kmitání lávky.

Národní aplikační dokument ČSN EN 1991-2 NA ed. A normy [12]

Kritériem komfortu chodců je v [12] hodnota zrychlení. Komfort je rozdělen do tří úrovní pohodlí chodců (tab. 2). V [12] je také uvedeno, že pokud není specifikováno jinak, měla by být zvolena úroveň pohodlí chodců „průměrná“, což vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 1990/A1 A.2.4.3.2.

Tab. 2 Úrovně pohodlí chodců na lávkách pro pěší podle [12]

Úroveň pohodlí chodců	Svislé zrychlení [ $m/s^2$ ]	Vodorovné zrychlení [ $m/s^2$ ]
Maximální	$\leq 0,50$	$\leq 0,10$
Průměrná	$\leq 0,70$	$\leq 0,20$
Minimální	$\leq 1,00$	$\leq 0,40$

Sétra: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading [1]

Sétra je souhrn poznatků a pokynů týkajících se kmitání lávek pro chodce, který byl vytvořen ve Francii. Limitní hodnoty zrychlení jsou opět různé pro různé úrovně pohodlí chodců (viz obr. 2 a obr. 3).

Acceleration ranges	0	0.5	1	2.5
Range 1	Max			
Range 2		Mean		
Range 3			Min	
Range 4				

Obr. 2 Rozsahy hodnot zrychlení [ $m/s^2$ ] pro svislé kmitání mostovky [1]

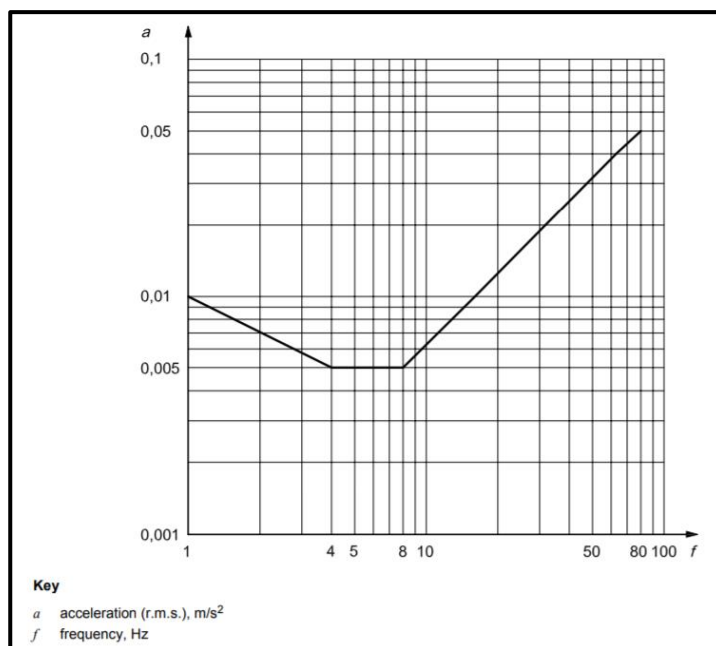
Acceleration ranges	0	0.1	0.15	0.3	0.8
Range 1	Max				
Range 2		Mean			
Range 3			Min		
Range 4					

Obr. 3 Rozsahy hodnot zrychlení [ $m/s^2$ ] pro vodorovné kmitání mostovky [1]

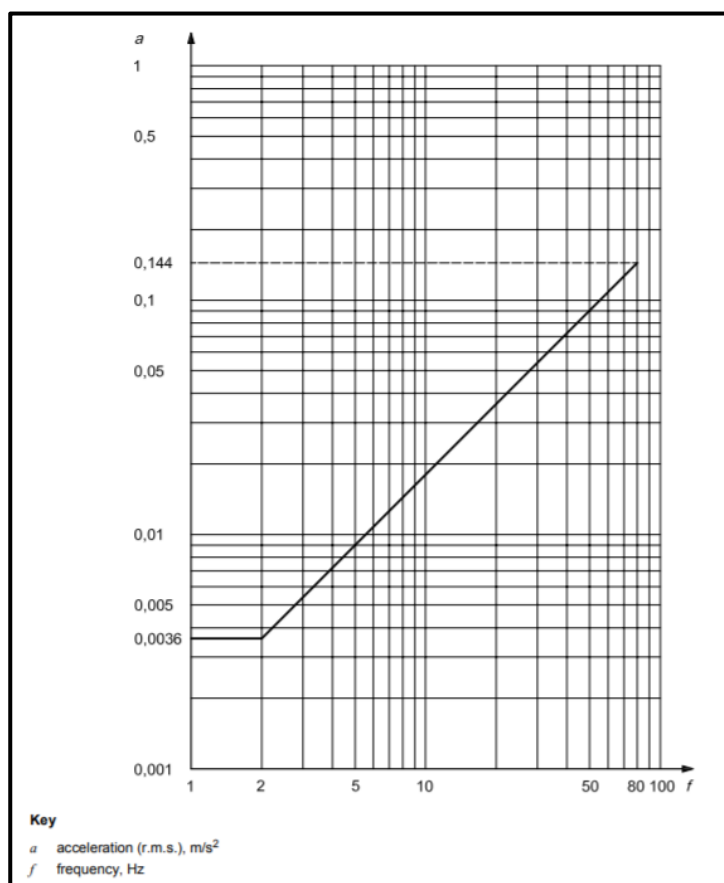
Na obr. 3 je také ukázáno, že pro předcházení vzniku tzv. „lock-in“ efektu je vhodné nepřekračovat hodnotu vodorovného zrychlení  $0,1 m/s^2$ . „Lock-in“ efekt vzniká v situaci, kdy lávka začne kmitat ve vodorovném směru, chodci ve snaze z pohodlnější chůze (při velkých amplitudách dokonce pro schopnost chůze) sjednotí svůj krok s kmitáním lávky, čímž ještě zvětší amplitudu budících sil [1].

ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations [13]

Kritériem pohodlí chodců je podle [13] vážená efektivní (RMS) hodnota. Limitní přípustné hodnoty jsou dány grafy, které jsou na následujících obr. 4 a obr. 5. Vážené efektivní hodnoty (RMS) zrychlení pro svislé kmitání by neměly překročit třicetinásobek hodnot patrných z grafu na obr. 4. Pro vodorovné kmitání platí, že by vážené efektivní hodnoty (RMS) zrychlení neměly přesáhnout šedesátinásobek hodnot patrných z grafu na obr. 5. Pro výpočet efektivní hodnoty (RMS) zrychlení je doporučeno uvažovat průměrný čas 1 s.



Obr. 4 Přípustné vážené RMS hodnoty zrychlení pro svislé kmitání v závislosti na frekvenci [13]



Obr. 5 Přípustné vážené RMS hodnoty zrychlení pro vodorovné kmitání v závislosti na frekvenci [13]

### 4.3 Matematické postupy pro vyhodnocení vybraných parametrů a jevů ze záznamů kmitání

Pro zpracování záznamů kmitání konstrukce pořízené na experimentu in-situ je potřeba jistých specifických matematických postupů. V následujících kapitolách jsou podrobněji popsány vybrané matematické postupy, které byly používány při vyhodnocení dynamických experimentů, jež byly součástí této diplomové práce.

#### 4.3.1 Fourierova transformace

Fourierova transformace bezesporu základní nástroj pro zpracování dynamického signálu (časového záznamu kmitání konstrukce). Umožňuje vzájemně jednoznačný převod z časové oblasti do frekvenční (popř. naopak), pomocí Fourierovy transformace je tedy možné analyzovat frekvenční obsah (frekvenční spektrum) signálu [14]. Fourierova řada je aproximační funkcí k funkci  $f(t)$ , jejíž proměnnou  $t$  je v případě dynamiky čas. Fourierova transformace pak zavádí funkci nové proměnné, kterou je v případě dynamiky frekvence  $f$  [15]. Fourierovu řadu je z hlediska dynamiky výhodné definovat jako:

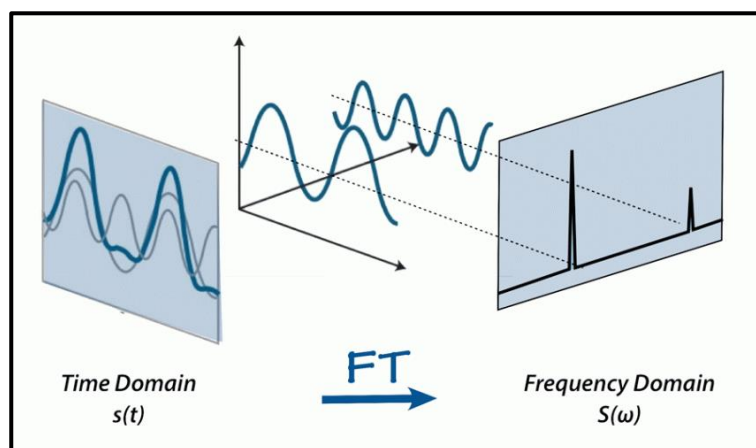
$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n), \quad (6)$$

přičemž platí, že amplituda harmonického členu řady s frekvencí  $f_n$  je

$$B_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (7)$$

a pro úhel fázového posunu platí

$$\tan \varphi_n = \frac{a_n}{b_n}. \quad (8)$$



Obr. 6 Fourierova transformace [16]

Na obr. 6 převzatém z [16] lze vidět, že díky Fourierově transformaci lze získat informaci o frekvenčním složení, amplitudách a fázovém posunu harmonických funkcí, ze kterých se původní signál skládal.

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) nepracuje s funkcí času spojitou, ale bodovou. V definici diskretní Fourierovy transformace vystupuje jako matematická operace nikoliv integrál, ale suma [15]. Z hlediska výpočetní techniky vyžadovala v minulosti diskretní Fourierova transformace hodně času, což bylo pro praktické využití nevýhodné, proto byla snaha vyvinout algoritmus, který bude pracovat rychleji. V roce 1965 byla popsána tzv. rychlá Fourierova transformace (FFT, Fast Fourier Transform), která minimalizuje počet potřebných matematických operací. Použití FFT je vázáno na podmínku, že interval, na kterém pracuje, má velikost právě  $2^n$  bodových signálů. Pro dynamické experimenty se využívají zejména intervaly o počtu bodových signálů 512, 1024, 2048, 4096 a 8192 [15].

### 4.3.2 Efektivní hodnota zrychlení

V některých normách lze v souvislosti s termínem „zrychlení“ najít i termín „efektivní hodnota zrychlení“. Efektivní hodnota (RMS, Root Mean Square) zrychlení je definována jako

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a(t)]^2 dt}. \quad (9)$$

Pro harmonické<sup>2</sup> kmitání platí, že

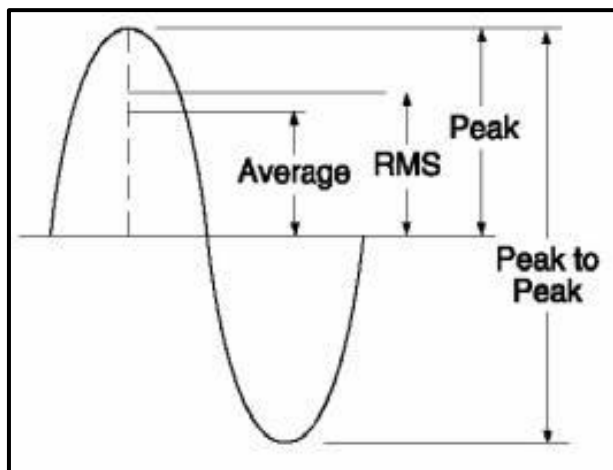
$$a_{RMS} = \frac{\sqrt{2}}{2} a_{AMPL}, \quad (10)$$

kde  $a_{AMPL}$  je amplituda zrychlení.

Z (9) je zřejmé, že efektivní hodnota zrychlení závisí na volbě časového intervalu  $T$ . Díky skutečnosti, že efektivní hodnota pracuje s časovým intervalem, je její použití výhodné při vyhodnocování signálu, neboť lze pomocí efektivní hodnoty zrychlení pohoda chodců vystihnout mnohdy lépe než jedinou naměřenou extrémní hodnotou.

---

<sup>2</sup> harmonické kmitání je takové kmitání, které má jedinou frekvenci a konstantní amplitudu.



Obr. 7 Efektivní hodnota (RMS) [36]

### 4.3.3 Útlum a jeho charakteristiky

Útlum je schopnost stavební konstrukce přeměnit kinetickou energii kmitavého pohybu na jiný typ energie, nejčastěji na teplo (výjimečně zvuk) [17]. Útlum lze obecně rozdělit podle charakteru dynamické odezvy na dynamické zatížení na

- nadkritický a kritický útlum, pro které je charakter dynamické odezvy na dynamické zatížení neperiodický a
- podkritický útlum, pro který je charakter dynamické odezvy na dynamické zatížení periodický a je typický pro stavební konstrukce [2] [18].

Jednou z charakteristik popisující útlum je logaritmický dekrement útlumu, který je definován jako [2]

$$\vartheta = \frac{1}{n} \ln \frac{w(t_i)}{w(t_i + n \cdot T_D)}, \quad (11)$$

kde  $n$  je počet kmitů,

$w(t_i)$  je výchylka v čase  $t_i$  a

$T_D$  je vlastní perioda tlumeného kmitání.

Další charakteristikou útlumu je poměrný útlum  $\xi$ . Pro malý útlum ( $\xi < 0,2$ ) platí

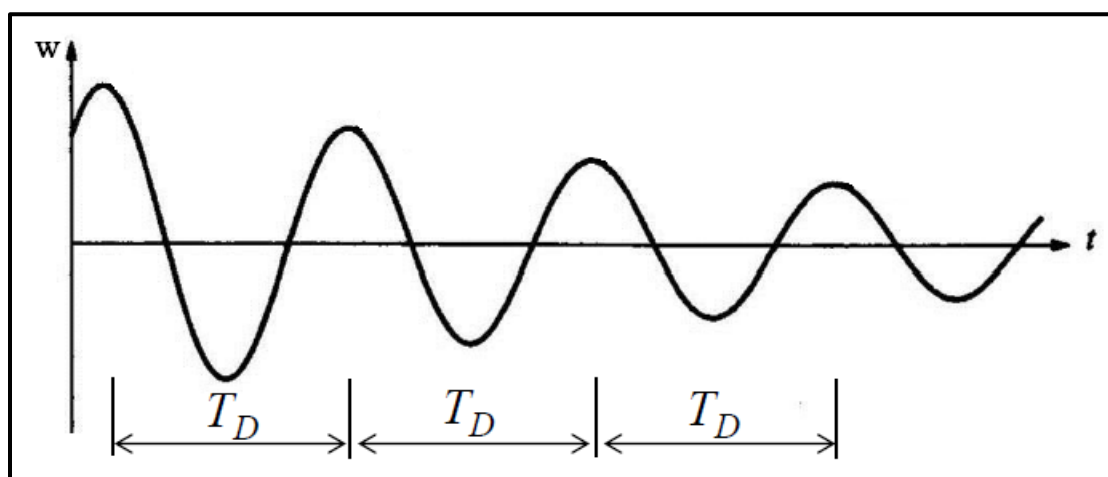
$$\vartheta \doteq 2\pi\xi. \quad (12)$$

Stanovení přesné hodnoty útlumu může být mnohdy velmi obtížné. Každá vlastní frekvence a vlastní tvar konstrukce je spjat s různou hodnotou útlumu. Podle materiálu nosné konstrukce lze však předpokládat, jaká bude přibližně hodnota útlumu [17]. V následující tab. 3 jsou uvedeny hodnoty útlumu, které vychází ze zkušeností pana prof. Ing. Michala Poláka, CSc. (vedoucího této diplomové práce).

Tab. 3 Hodnoty logaritmického dekrementu útlumu a poměrného útlumu podle zkušeností prof. Ing. Michala Poláka, CSc.

Materiál konstrukce	Logaritmický dekrement útlumu $\vartheta$	Poměrný útlum $\xi$ [%]
Železobeton	0,20	2,5–3,5
Předpjatý beton	0,07	1,0–2,0
Ocelobeton	0,08	1,0–2,0
Ocel	0,05	0,5–1,5

Na následujícím obr. 8 je křivka tzv. dokmitání konstrukce. Jedná se o průběh výchylky v čase při volném tlumeném kmitání. Výchylky se v čase postupně snižují, až dojde k úplnému utlumení kmitání [2]. Při experimentální analýze jsou záznamy dokmitání konstrukce vhodné k vyhodnocení logaritmického dekrementu útlumu konstrukce.



Obr. 8 Průběh výchylky v čase při volném tlumeném kmitání [2]

#### 4.3.4 Porovnání charakteristik vlastního kmitání z výpočtu a z experimentu

Jednou z disciplín při vyhodnocování experimentů na stavebních konstrukcích je porovnání výsledků dynamického výpočtu s vyhodnocenými daty z experimentu. Parametry, které se porovnávají, jsou charakteristiky vlastního kmitání konstrukce. Shoda mezi zkouškou zjištěnými a výpočtem stanovenými charakteristikami vlastního kmitání konstrukce mostu je podle [6] tehdy, když současně platí:

- Zkouškou zjištěné vlastní frekvence se od ověřovaných vypočtených neliší více, než je uvedeno v tab. 4 v kapitole 4.3.4.1.
- Zkouškou zjištěné ověřované vlastní tvary kmitání konstrukce mají shodný počet uzlových linií s vypočtenými vlastními tvary a uzlové linie leží ve shodných polích

konstrukce. U složitějších případů se použije koeficient shody vlastních tvarů MAC, který je podrobně popsán v kapitole 4.3.4.2.

- Zkouškou stanovený logaritmický dekrement útlumu  $\mathfrak{D}_{OBS}$  je větší nebo roven hodnotě  $\mathfrak{D}_{CAL}$  použité při dynamickém výpočtu vynuceného kmitání.

#### 4.3.4.1 Shoda vlastních frekvencí

Rozdíl vlastních frekvencí se stanoví podle vztahu (13) a porovná se s mezními hodnotami v tab. 4 [6]:

$$\Delta_{(j)} = \frac{f_{(j)CAL} - f_{(k)OBS}}{f_{(j)CAL}} \cdot 100, \quad (13)$$

kde  $f_{(j)CAL}$  je vypočtená  $j$ -tá vlastní frekvence konstrukce a  $f_{(k)OBS}$  je změřená  $k$ -tá vlastní frekvence konstrukce.

Tab. 4 Hodnoty mezních odchylek pro porovnání vypočtených a změřených vlastních frekvencí konstrukce [6]

Frekvence	$f_{(\min)CAL}, f_{(j)CAL, A}$	$f_{(j)CAL, B}$
Mezní odchylka $\Delta_{(j)}$ [%]	+10 až -15	$\pm(14 + f_{(j)CAL} / f_{(\min)CAL}) \leq \pm 25$

kde  $f_{(\min)CAL}$  je nejnižší porovnávaná vlastní frekvence příslušná ke globálnímu tvaru vlastního kmitání hlavní nosné konstrukce s dominantními pořadnicemi ve svislém směru,

$f_{(j)CAL, A}$  je jakákoliv ověřovaná vlastní frekvence nižší než  $f_{(\min)CAL}$ , která přísluší ke globálnímu vlastnímu tvaru hlavní nosné konstrukce, který nemá dominantní pořadnice ve svislém směru a

$f_{(j)CAL, B}$  je kterákoliv ověřovaná vlastní frekvence vyšší než  $f_{(\min)CAL}$

#### 4.3.4.2 Shoda vlastních tvarů

Vzájemné přiřazení a porovnání vlastních tvarů se provádí vizuálně. U složitějších případů se přistoupí k výpočtu koeficientu korelace modální analýzy MAC [5], který se určí jako

$$MAC_{(j,k)} = \frac{\left( \{r_{(j)CAL}\}^T \{r_{(k)OBS}\} \right)^2}{\left( \{r_{(j)CAL}\}^T \{r_{(j)CAL}\} \right) \left( \{r_{(k)OBS}\}^T \{r_{(k)OBS}\} \right)}, \quad (14)$$

kde  $r_{(j)CAL}$  je vektor vypočteného  $j$ -tého vlastního tvaru a  $r_{(k)OBS}$  je vektor změřeného  $k$ -tého vlastního tvaru.



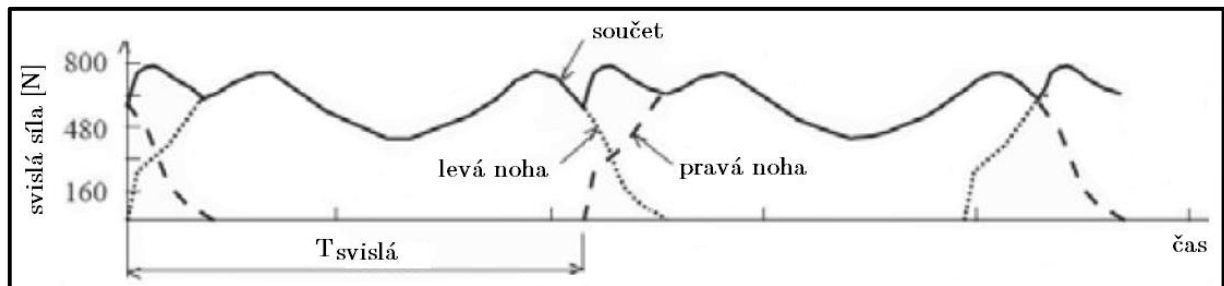
Když  $\text{MAC}_{(j,k)} \geq 0,85$  pro  $\mathbf{r}_{(j)\text{CAL}}$  a  $\mathbf{r}_{(k)\text{OBS}}$  a zároveň  $\text{MAC}_{(j,m)} \leq 0,4$  pro všechny ostatní měřené vlastní tvary kmitání  $\mathbf{r}_{(m)\text{OBS}}$ , pak je možné předpokládat, že se jedná o odpovídající si vlastní tvary kmitání [6].

## 5 Účinky chodců na lávky pro chodce

U lávek pro chodce je potřeba tomuto typu zatížení věnovat zvýšenou pozornost, a to kvůli riziku vzniku rezonance. Pro zatížení chodci je typická proměnnost polohy i velikosti v čase. Ačkoliv je přesný průběh zatížení vyvolaného pohybem chodce pro každého chodce unikátní, přesto má tento druh zatížení na konstrukci své typické účinky [19].

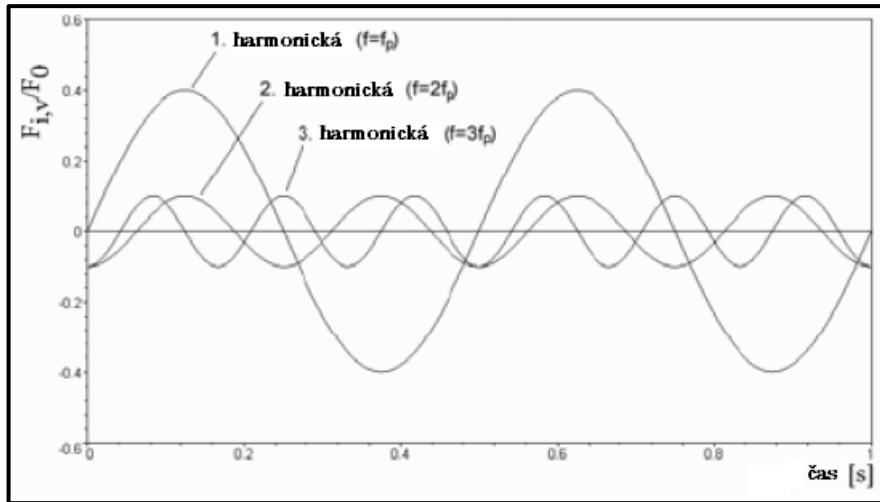
### 5.1 Zatížení na mostovku způsobené pohybem chodce

Na následujícím obr. 9 je typický časový průběh svislé síly způsobené pohybem chodce. Svislá složka nášlapové síly při chůzi dosahuje maxima právě tehdy, když je těžiště chodce nejvýše nad pocházenou plochou. Tzv. sedlový bod mezi oběma vrcholy je okamžik, kdy je těžiště nejnižší nad pocházenou plochou, tedy právě v okamžiku, kdy se nohy chodce míjejí. Průsečík jednotlivých křivek je okamžik, kdy se obě nohy chodce dotýkají pocházené plochy, a tedy tíha chodce je rozložena rovnoměrně na obě nohy. Při běhu tzv. sedlový bod zmizí [20].



Obr. 9 Časový průběh svislé kontaktní síly při chůzi (upraveno z [19])

Při podrobnějším zkoumání časového průběhu svislé kontaktní síly lze zjistit, že se dá velmi výstižně popsat pomocí součtu tří harmonických funkcí o třech různých frekvencích a amplitudách. Platí, že tzv. první harmonická funkce má zpravidla největší amplitudu (je dominantní). Další dvě funkce, tzv. druhá a třetí harmonická, mají amplitudu menší, jejich vliv je však stále patrný (viz obr. 10) [19].



Obr. 10 Harmonické funkce obsažené v aproximaci průběhu svislé kontaktní síly (upraveno z [19])

## 5.2 Kritický rozsah frekvencí lidského kroku z hlediska možného vzniku rezonance

Lidský pohyb po mostovce v závislosti na rychlosti a způsobu pohybu vyvozuje odlišnou periodickou sílu působící na konstrukci ve svislém, vodorovném podélném i příčném směru. Frekvence budící síly je nejdůležitější charakteristikou chůze z hlediska dynamiky. Údaje o vztahu mezi vybranými způsobem pohybu, budícími frekvencemi a přibližnými rychlostmi chůze jsou uvedeny v následující tab. 5 [21].

Tab. 5 Údaje o frekvencích a rychlostech lidského pohybu podle [22]

Druh lidského pohybu	frekvence $f$ [Hz]	rychlost $v$ [m/s]
Pomalá chůze	1,7	1,1
Normální chůze	2,0	1,5
Rychlá chůze	2,3	2,2
Pomalý běh	2,5	3,3
Rychlý běh	>3,2	5,5

Pokud je frekvence budící síly shodná s některou z vlastních frekvencí konstrukce, dochází k rezonanci, pro kterou je typická vyšší úroveň vibrací, což může mít negativní vliv na komfort chodce, v extrémním případě může dokonce znemožnit přirozenou chůzi, jako tomu bylo např. na Millenium Bridge v Londýně [1].

V národním aplikačním dokumentu ČSN EN 1991-2 NA ed. A [12] je uvedeno, že ověření dynamického chování lávky při dynamickém zatížení chodci se při jejím návrhu provede, jestliže jakákoli vlastní frekvence konstrukce při svislém kmitání spadá do

intervalu frekvencí 1,3 Hz až 2,3 Hz, popř. pro konstrukce s malým útlumem (logaritmický dekrement útlumu  $\leq 0,05$ ) se ověření provede také pro interval frekvencí 2,5 Hz až 4,6 Hz. Pro kmitání ve vodorovném směru platí, že se provede ověření dynamického chování hlavní nosné konstrukce lávky při dynamickém zatížení chodci, jestliže jakákoli vlastní frekvence konstrukce vodorovného kmitání v příčném směru spadá do intervalu frekvencí 0,5 Hz až 1,2 Hz, popř. 2,6 Hz až 3,4 Hz.

V dokumentu [23] jsou kritické rozsahy frekvencí z hlediska možného vzniku rezonance definovány obdobně jako v NAD normy [12]. Pro svislý směr kmitání je rizikový interval frekvencí 1,25 Hz až 2,3 Hz, v případě možného vzniku rezonance pomocí druhé harmonické složky dynamického zatížení od chodců je rizikový interval frekvencí 1,25 Hz až 4,6 Hz. Pro vodorovný příčný směr kmitání je rizikový interval frekvencí 0,5 Hz až 1,2 Hz.

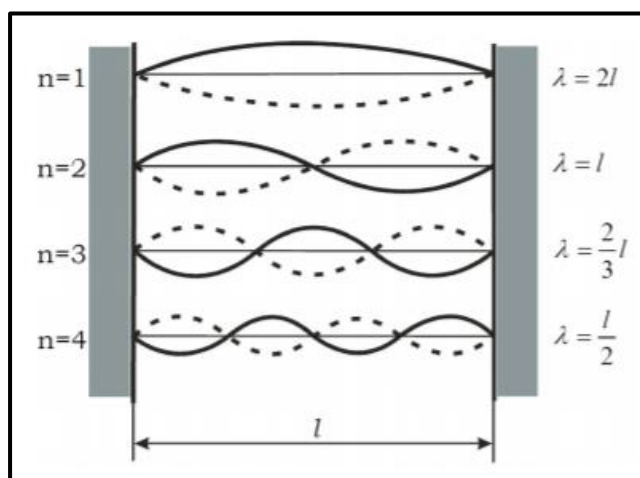
## 6 Specifika kmitání závěsů

Závěsy jsou konstrukční prvky, které lze charakterizovat jako prvky s nízkou hmotností, zanedbatelnou ohybovou tuhostí a malým útlumem. Většinou jsou kloubově připojeny ke konstrukci. Díky tomu se jejich kmitání vyznačuje jistými specifiky oproti zbylým konstrukčním prvkům. Mohou být také náchylné ke kmitání buzeným větrem. Závěsy je možné modelovat různými způsoby:

- podle strunové teorie s charakteristickou hmotností na metr běžný  $\mu$ ,
- podle prutové teorie s charakteristickou hmotností na metr běžný  $\mu$  a ohybovou tuhostí  $EI$ . U prutové teorie lze rozlišit různé způsoby chování v závislosti na variantě uložení prutu:
  - kloub – kloub,
  - vetknutí – vetknutí [17].

### 6.1 Strunová teorie

Ideální struna je charakteristická dokonalou ohebností, nulovou ohybovou tuhostí  $EI$  a konstantní hmotností na metr běžný  $\mu$  po celé délce struny. Strunová teorie popisuje kmitání struny, které je z fyzikálního hlediska jasně definováno, jedná se o tzv. stojaté vlnění. Příčinou tohoto chování je fakt, že po struně se šíří příčná vlna, která se na koncích struny odráží, proti sobě jdoucí vlny interferují a vzniká stojatá vlna [24] [25]. Bod, který má při kmitání nulovou výchylku, se nazývá uzel. Bod, který kmitá s největší amplitudou, se nazývá kmitna. Platí, že při kmitání v  $n$ -tém vlastním tvaru je právě  $n$  kmiten a  $n-1$  vnitřních uzlů.



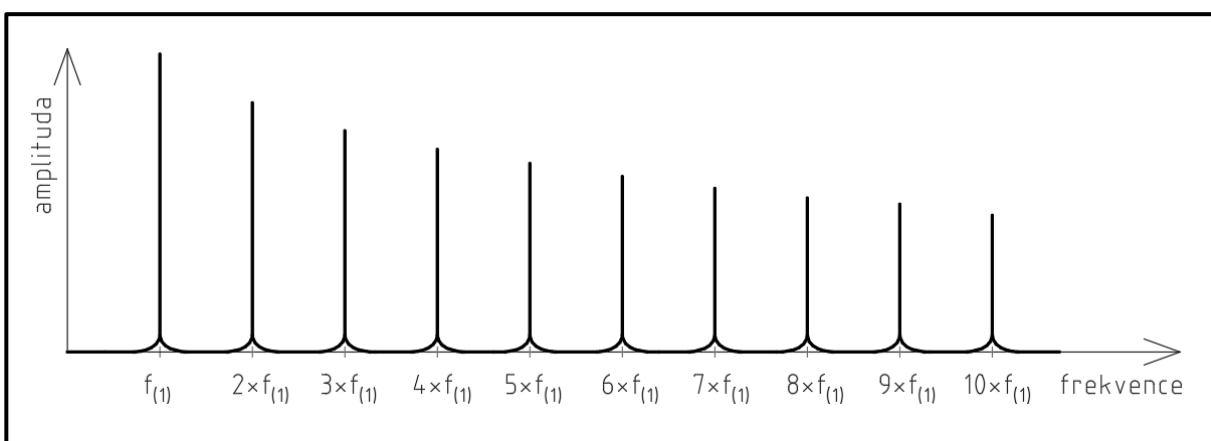
Obr. 11 Stojaté vlnění na struně [25]

Dále při kmitání struny platí, že všechny vyšší harmonické frekvence jsou celočíselným násobkem základní (první) vlastní frekvence struny [26], což popisuje vztah:

$$f_{(n)} = n \cdot f_{(1)} \quad (15)$$

kde  $f_{(1)}$  je základní vlastní frekvence, tedy první vlastní frekvence struny,  
 $f_{(n)}$  je kterákoliv vyšší harmonická frekvence struny,  
 $n$  je přirozené číslo.

Kmitání struny může pak ve frekvenční oblasti vypadat například následujícím způsobem:



Obr. 12 Příklad kmitání struny zobrazený ve frekvenční oblasti

Vztah mezi osovou silou ve struně a vlastní frekvencí struny  $f_{(j)}$  je podle strunové teorie vyjádřen jako:

$$N_{(j)}^S = \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(j)} \cdot L}{j} \right)^2, \quad (16)$$

kde  $\mu$  je hmotnost na metr délky struny,  
 $j$  je pořadové číslo vlastní frekvence struny,  
 $f_{(j)}$  je  $j$ -tá vlastní frekvence struny a  
 $L$  je délka struny.

V případě ideální struny by měla být osová síla ve struně  $N_{(j)}^S$  shodná pro všechny vlastní frekvence  $f_{(j)}$  [17].

## 6.2 Prutová teorie

V následující kapitole bylo čerpáno z [17].

Jako prut lze modelovat takový konstrukční prvek, který má konstantní hmotnost na metr běžný  $\mu$  po celé délce a nenulovou ohybovou tuhost  $EI$ . Vztah mezi osovou silou v prutu a vlastní frekvencí prutu je podle prutové teorie vyjádřen jako:

$$N_{(j)}^P = \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(j)} \cdot L}{j} \right)^2 - \left( \frac{j \cdot \pi}{L} \right)^2 EI, \quad (17)$$

kde  $\mu$  je hmotnost na metr délky prutu,

$j$  je pořadové číslo vlastní frekvence prutu,

$f_{(j)}$  je  $j$ -tá vlastní frekvence prutu,

$L$  je délka prutu a

$EI$  je ohybová tuhost prutu.

Pokud při měření získáme hodnoty vlastních frekvencí závěsu, který lze modelovat jako prut, pak je možné identifikovat předpínací (osovou) sílu v prutu  $N_P$  a ohybovou tuhost prutu  $EI$ . Rovnici (18) lze upravit do tvaru:

$$N_P + \left( \frac{j \cdot \pi}{L} \right)^2 \cdot EI = \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(j)} \cdot L}{j} \right)^2. \quad (18)$$

Soustavu rovnic pro  $n$  změřených frekvencí lze zapsat jako:

$$\begin{pmatrix} 1 & \left( \frac{1 \cdot \pi}{L} \right)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( \frac{j \cdot \pi}{L} \right)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( \frac{n \cdot \pi}{L} \right)^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_P \\ EI \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(1)} \cdot L}{1} \right)^2 \\ \vdots \\ \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(j)} \cdot L}{j} \right)^2 \\ \vdots \\ \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(n)} \cdot L}{n} \right)^2 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Pro nalezení co nejpřesnější lineární aproximace řešení soustavy rovnic lze využít tzv. Gauss – Markova teorému:

$$\begin{pmatrix} 1 & \left( \frac{1 \cdot \pi}{L} \right)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( \frac{j \cdot \pi}{L} \right)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( \frac{n \cdot \pi}{L} \right)^2 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} 1 & \left( \frac{1 \cdot \pi}{L} \right)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( \frac{j \cdot \pi}{L} \right)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( \frac{n \cdot \pi}{L} \right)^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_P \\ EI \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \left( \frac{1 \cdot \pi}{L} \right)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( \frac{j \cdot \pi}{L} \right)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( \frac{n \cdot \pi}{L} \right)^2 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(1)} \cdot L}{1} \right)^2 \\ \vdots \\ \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(j)} \cdot L}{j} \right)^2 \\ \vdots \\ \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(n)} \cdot L}{n} \right)^2 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

## 6.3 Jevy způsobené větrem

Podle své značné proměnlivosti v čase a prostoru se zatížení větrem klasifikují jako zatížení proměnná, jejichž správné určení je ve srovnání s určením jiných proměnných zatížení (např. zatížení užitného či zatížení sněhem) ve většině případů

mnohem náročnější. Odezvu konstrukce na zatížení větrem lze podle její povahy rozdělit na

- kvazistatickou odezvu,
- dynamickou odezvu,
- aeroelastickou odezvu.

Pro většinu stavebních konstrukcí se uvažuje pouze kvazistatická odezva konstrukce. Zatížení větrem lze považovat za kvazistatické tehdy, pokud je nejnižší vlastní frekvence konstrukce tak vysoká, že její rezonanční kmitání od účinků větru je možné zanedbat. Dynamickou odezvu nelze zanedbat u konstrukcí, u kterých je rezonanční kmitání od větru významné [27].

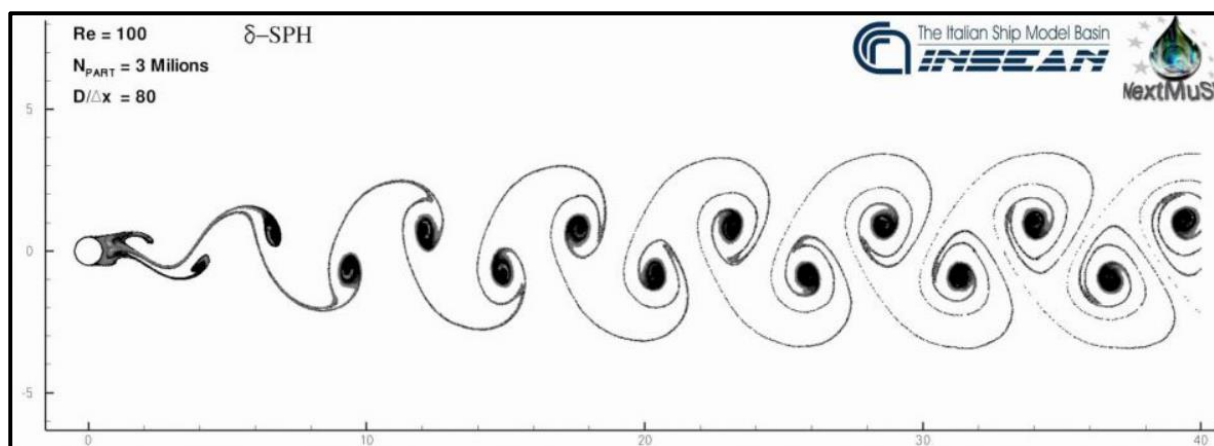
Mezi veličiny popisující charakteristiky větru patří mj. i směr větru. Směr větru je možné popsat pomocí tzv. růžice výskytu v dané lokalitě [21]. K měření rychlosti větru se používají tzv. anemometry, popřípadě k měření rychlosti a směru větru tzv. anemorumbometry [27]. Další charakteristikou větru je režim obtékání. Režim obtékání je charakterizován velikostí tlaků (čelní odpor, vztlak) a prouděním za tělesem (hladký proud, pravidelné oddělování vírů nebo nepravidelné proudění) [21].

### 6.3.1 Odtrhávání Kármánových (Strouhalových) vírů

Při obtékání zejména kruhových průřezů (např. u staveb válcového tvaru) se vytvářejí víry, které se za určitých podmínek oddělují střídavě po obou stranách a vytváří periodickou sílu. Pokud je frekvence odtrhávání vírů shodná s některou z vlastních frekvencí konstrukce, dojde k rozkmitání konstrukce v rovině kolmé ke směru větru. Frekvence odtrhávání vírů závisí na hodnotě Strouhalova čísla, rychlosti větru a charakteristickém rozměru konstrukce (v případě válce průměr) [28]. Na rozdíl od gallopingu tento jev ustává, pokud se rychle změní rychlost větru, protože se změní i frekvence odtrhávání vírů, a ta již nebude shodná s vlastní frekvencí konstrukce. To však nemusí platit v případě, kdy rychlost větru narůstá pomalu, protože může dojít k tzv. lock-in efektu. Pro lock-in efekt je typická skutečnost, že přestože rychlost větru pomalu narůstá, frekvence odtrhávání vírů zůstane shodná s vlastní frekvencí konstrukce. Pro vymanění z rezonance je pak zapotřebí více energie než pro setrvání v rezonanci. To však neplatí nade všechny meze, při překročení jisté mezní rychlosti větru jev ustává [17] [21] [29] [30].



Ve starší literatuře (např. v [31]) je uvedeno, že posouzení kmitání konstrukcí pomocí Kármánových vírů se provádí, pokud je kritická rychlost větru vyšší než 5 m/s a nižší než 20 m/s. V poslední době se však ukazuje, že k výraznému rozkmitání závěsů stačí rychlost větru nižší než 5 m/s, jak vyplývá ze zkušeností vedoucího práce prof. Ing. Michala Poláka, CSc. např. s lávkou v Čelákovících nebo s lávkou v Lužci nad Vltavou.



Obr. 13 Kármánova vírová stezka [37]

### 6.3.2 Galloping lan

Galloping je samobuzené kmitání, většinou v rovině kolmé na směr větru, při kterém je energie čerpána ze vzdušného proudu. Jedná se o kmitání s nízkými frekvencemi a značnými amplitudami. Riziko vzniku gallopingu roste především za jistých meteorologických podmínek, např. při dešti či námraze, a to z důvodu, že námrazou či stékající vodou dojde k porušení pravidelného kruhového tvaru příčného řezu. Při rostoucí rychlosti větru kmitání neustává, naopak se amplitudy zvětšují [17] [21] [30].

## **7 Experimentální analýza dynamického chování lávky pro chodce v Lužci nad Vltavou**

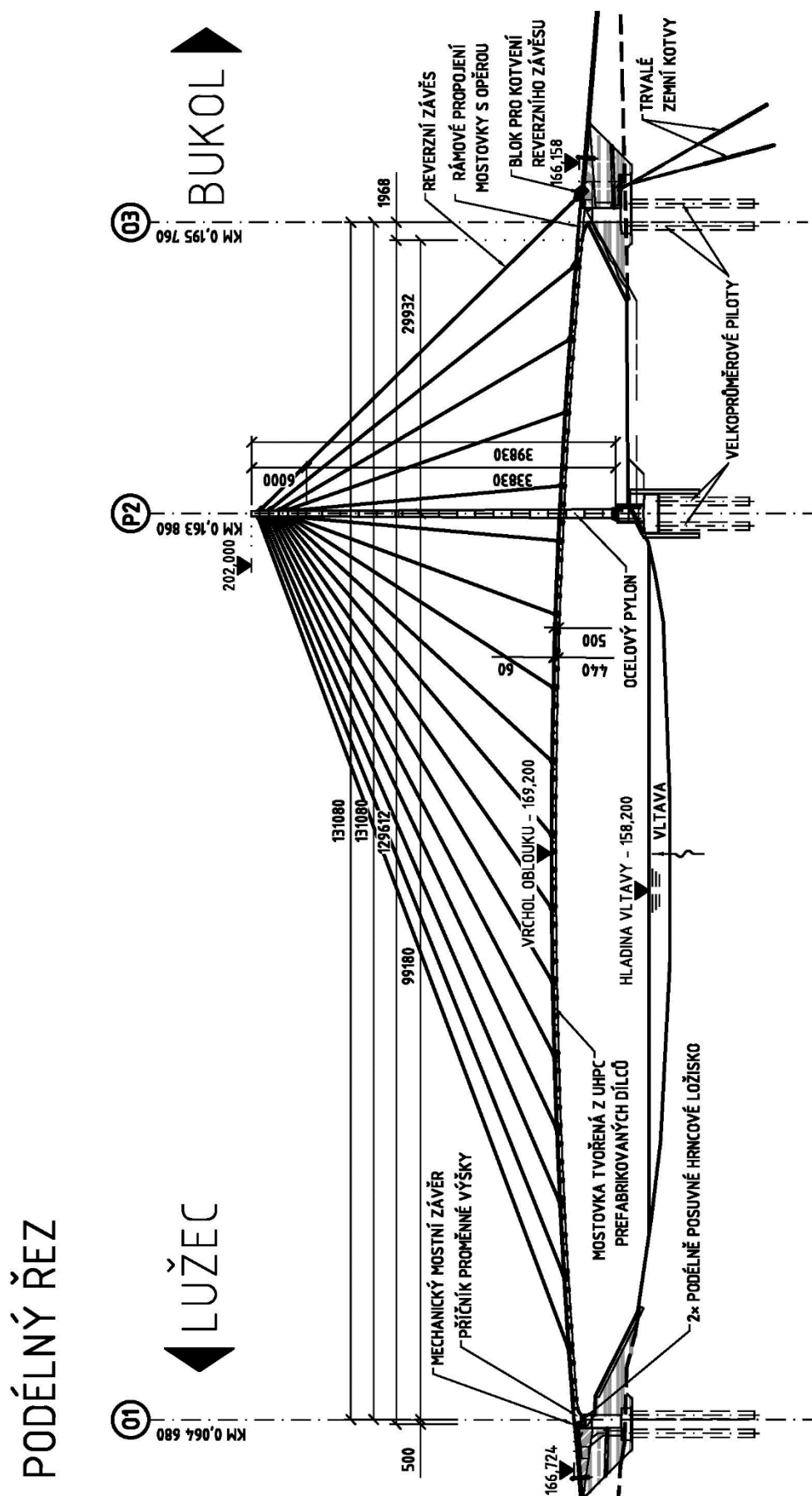
Jako objekt pro dynamický experiment byla vybrána lávka pro chodce a cyklisty v Lužci nad Vltavou. Autorce byla poskytnuta realizační dokumentace, kterou vyhotovila společnost Novák & Partner, s r. o. [32]. V rámci této diplomové práce byly provedeny dva dynamické experimenty. Jeden byl zaměřen na kmitání závěsů způsobené větrem, druhý byl zaměřen na analýzu charakteristik vlastního kmitání konstrukce (experimentální modální analýza) a na zjištění dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodce (dynamická zkouška zatěžovací). Podrobný průběh obou experimentů je popsán v následujících kapitolách.

### **7.1 Popis objektu**

Zavěšená lávka pro chodce a cyklisty převádí stezku pro pěší a cyklostezku přes řeku Vltavu mezi obcemi Lužec nad Vltavou a Bukol. Nosná konstrukce je tvořena prefabrikovanými UHPC segmenty, které jsou rámově spojeny s opěrou O3. Segmenty jsou dále zavěšeny pomocí závěsů Redaelli na ocelovém pylonu. Lávka má teoreticky dvě pole, která jsou nesymetrická a mají rozpětí 99,18 m a 31,9 m. Konstruktivní výška monolitického příčnicku nad opěrou O1 je proměnná od 750 mm do 500 mm. Na příčník navazují segmenty s konstantní výškou 500 mm, které se napojují na opěru O3, kde se v místě rámového rohu výška konzoly opěry zvětšuje náběhem z 500 mm na 1000 mm [32].



*Obr. 14 Lávka v Lužci nad Vltavou – pohled ve směru staničení lávky*



Obr. 15 Podélný řez lávky v Lužci nad Vltavou (upraveno z [32])

Celková šířka UHPC segmentů je 4,5 m, délka typického segmentu je 3,998 m. Vodorovná nosná konstrukce mostovky je tvořena 31 typickými segmenty a 2 atypickými segmenty. Krajní atypické segmenty byly vytvořeny rozdělením typického segmentu v polovině délky. Délka atypického segmentu je 1,998 m. Šířka krajních trámů segmentu je v nejužším místě 400 mm, trámy se po výšce rozšiřují směrem k ose segmentu na 500 mm a přes lineární náběh přecházejí do desky segmentu, která má tloušťku 60 mm. Příčná žebra, která jsou ve  $\frac{1}{4}$  délky segmentu a ve  $\frac{3}{4}$  délky segmentu (respektive v  $\frac{1}{2}$  délky u atypických segmentů), se po výšce plynule osově rozšiřují z 200 mm do 400 mm a přes lineární náběh přecházejí do horní desky segmentu. Na čelech segmentů je vytvořen „límec“, po obvodu je mezi segmenty vloženo těsnění a spára vytvořená „límecem“ je vyplněna monolitickým vysokopevnostním výplňovým materiálem. Horní povrch segmentů byl ve výrobně vyhotoven v podélném i příčném směru s nulovým sklonem. Skladba UHPC segmentů kopíruje průběh projektované nivelety s odchylkou max 1 mm.

Pro dodatečné předpětí nosné konstrukce byla použita předpínací lana  $\varnothing 15,7$  mm z předpínací oceli St 1640 /1860 MPa. Jednotný systém předpětí je od firmy VSL. Veškeré předpínací jednotky použité pro předpětí nosné konstrukce jsou složeny z 19 lan [32].



*Obr. 16 Pohled na vodorovnou nosnou konstrukci zespoda od opěry O3 směrem na Lužec nad Vltavou*

Příčnick u opěry O1 má proměnnou výšku od 750 mm do 500 mm (ve směru staničení). Horní povrch má podélný sklon 8,0 %. Napojení vodorovné nosné konstrukce do opěry O3 je provedeno pomocí monolitické části mostovky s proměnnou výškou od 500 mm do 1000 mm v místě vetknutí mostovky do opěry O3, tento náběh je parabolický. Reverzní závěsy jsou v této části uchyceny do kotevních bloků (viz obr. 17) [32].



Obr. 17 Pohled na kotevní blok pro uchycení reverzního závěsu u opěry O3

Na lávce je použito 17 dvojic závěsů. Závěsy jsou kotveny v hlavě pylonu a dále pak přes kotevní prvky ve vybraných segmentech vodorovné nosné konstrukce, případně v kotevním bloku opěry u O3. Systém závěsů včetně koncovek je od firmy Redaelli, typ FLC – „Full locked coil strands“ (uzavřená lana) [32].



Obr. 18 Pohled na lávku v Lužci nad Vltavou

Nosnou konstrukci ocelového pylonu tvoří dvě stojky obdélníkového průřezu, které jsou nahoře spojené masivní hlavou, ve které jsou ukotvena nosná lana mostovky. Průřez stojky v patě má rozměry 1000×600 mm, ve vrcholu pak 600×600 mm. Stojky jsou vetknuty do základu přes zabetonované kotevní šrouby M42-8.8. Stěny i pásnice stojek jsou vyrobeny z plechu tloušťky 20 mm jakosti S355J2+N bez podélných i příčných výtuh. Osová vzdálenost stojek v patě je 7060 mm, stojky se směrem vzhůru sbíhají až na světlu vzdálenost cca 940 mm u hlavy pylonu. Do pylonu je ukotveno 12 úrovní nosných lan ve směru na Lužec nad Vltavou a 5 úrovní nosných lan ve směru na Bukol. Lana jsou ukončena systémovými koncovkami a přes čepy ukotvena do ukloněných styčnickových plechu ve směru závěsů respektujících ve svislém směru orientaci jednotlivých lan. Vrchol i pata pylonu jsou ukončeny víčky zajišťujícími hermetičnost vnitřního prostoru pylonu. Pylon je ve spodní části (až do výškové úrovně mostovky) vyplněn betonem C30/37 – XC2-SCC – D<sub>max</sub>16 [32].



*Obr. 19 Pohled na pylon směrem od Bukolu na Lužec nad Vltavou*

## 7.2 Měřicí linka

Protože byla při experimentu v rámci této diplomové práce použita shodná měřicí linka jako v autorčině bakalářské práci [10], byl popis měřicí linky z [10] převzat.

Měřicí linka použitá při dynamické zkoušce lávky se skládala z osmi snímačů zrychlení (akcelerometrů) Brüel&Kjaer 8344, měřicí ústředny SIRIUS 6ACC-2ACC+ (v.č. DB18002762) od firmy Dewesoft s.r.o., která byla přes počítač ovládána pomocí programu DEWESoft. Tento program mimo jiné umožnil i on-line vyhodnocení FFT analýzy naměřeného kmitání lávky.

Snímače zrychlení jsou absolutní nízkofrekvenční piezoelektrické snímače s pracovním rozsahem 0,2 Hz až 3 kHz, pracovním teplotním rozsahem od -50 °C do 100 °C, citlivostí přibližně 2500 mV/g, příčnou citlivostí menší než 5 % a vlastní frekvencí 10 kHz. Během měření kmitání mostovky byly snímače připevněny magnetem k ocelovým závažím (obr. 20) a připojeny kabelem k měřicí ústředně. Během měření kmitání závěsů byly snímače připevněny magnetem přímo k závěsům (podrobněji popsáno v kapitole 7.3.2) a připojeny kabelem k měřicí ústředně.



*Obr. 20 Dva snímače zrychlení Brüel&Kjaer 8344 připevněné magnetem k ocelovému závaží při dynamické zatěžovací zkoušce*

Měřicí ústředna SIRIUS 6ACC – 2ACC+ je osmikanálová elektronická měřicí ústředna firmy DEWESoft, která je řízena pomocí osobního počítače přes USB port. Všechna elektronická zařízení pro obsluhu jednotlivých kanálů a provádění měření jsou zabudována v jediné skřínce a ovládat je lze pouze pomocí programu DEWESoft přes

počítač. Měřicí ústředna SIRIUS je především určena pro elektrická měření vibrací pomocí osmi napěťových vstupů. Všechny kanály mají svůj vlastní 2×24bitový A/D převodník, tzv. DualCore, který je schopen měřit s unikátním dynamickým rozsahem až 160 dB. Pro zajištění současného měření na všech aktivních kanálech jsou A/D převodníky navzájem synchronizovány.



*Obr. 21 Měřicí ústředna SIRIUS*

### **7.3 Experiment zaměřený na kmitání závěsů**

Cílem experimentu bylo zachytit kmitání závěsů způsobené větrem. Obyvatelé Lužce nad Vltavou zaregistrovali okem viditelné kmitání závěsů, které údajně nastávalo při „vánku“, což odpovídá rychlostem větru do 5 km/h. O této skutečnosti dostala informaci společnost Novák & Partner, s r. o., která byla autorem realizační dokumentace.

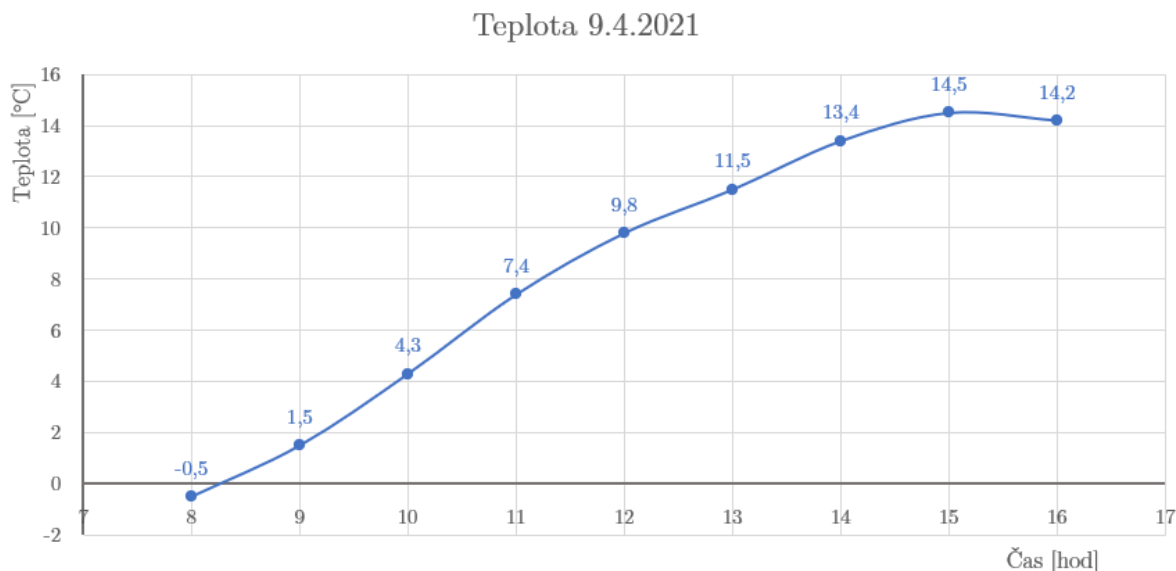
#### **7.3.1 Meteorologické podmínky**

Termín experimentu byl vybírán s ohledem na meteorologické podmínky. Protože se jednalo o experiment zaměřený na kmitání závěsů od větru, nejdůležitějším sledovaným parametrem předpovědi počasí byla očekávaná rychlost větru. Předpokládaná ideální rychlost větru pro zachycení jevu kmitání závěsů byla přibližně 5 km/h.

Údaje o teplotě byly převzaty z aplikace Aladin (oficiální aplikace Českého hydrometeorologického institutu). Teplota se v průběhu experimentu pohybovala mezi -0,5 °C a 14,5 °C (obr. 22). Bylo polojasno až zataženo. Teplota vzduchu při



experimentu byla v definovaném pracovním rozsahu snímačů, který udává výrobce, na nejistotu měření tedy neměla teplota žádný vliv. Rychlost větru byla měřena in situ anemometrem. Rychlost větru byla během měření značně proměnná a pohybovala se od 0 do přibližně 20 km/h.



Obr. 22 Průběh teploty vzduchu v průběhu dne 9. 4. 2021

### 7.3.2 Průběh a uspořádání experimentu

Termín experimentu byl s ohledem na meteorologické podmínky stanoven na 9. 4. 2021. Výběr termínu experimentu se zdařil, protože již při příjezdu do Lužce nad Vltavou k lávce pro chodce bylo pouhým okem pozorovatelné značné kmitání nejdelších závěsů. Pro měření bylo nutné osadit na závěsy snímače zrychlení. Osazením snímačů se kmitavý pohyb závěsů buď zmírnil, nebo zcela ustal. Příčinou této skutečnosti byl pravděpodobně fakt, že pro rozkmitání závěsu je potřeba více energie než pro jeho setrvání v klidu.

Na samotném začátku měření bylo stanoveno označení závěsů v podélném i příčném směru (viz obr. 23 a obr. 25). Označení „L“ a „P“ (podle stran levá a pravá) bylo zvoleno **proti** směru staničení.

Při pořizování záznamů č. 001 až 015 bylo cílem zachytit kmitání závěsů od větru. Snímače byly osazeny na nejdelší závěsy (podrobně viz tab. 6). Snímače byly upevněny na závěs ve dvou kolmých směrech, které byly kolmé k ose závěsu, pro měření kmitání závěsů v rovině svislé i vodorovné (viz obr. 24). Záznamy č. 016 až 024 byly změřeny pro následné stanovení vlastních frekvencí závěsů, ze kterých byla stanovována předpínací síla a ohybová tuhost. Při těchto záznamech byly snímače osazeny pouze v rovině svislé

kolmo k ose závěsu. Po dokončení měření záznamů č. 016 až 024 bylo znovu zaznamenáno okem viditelné kmitání nejdelších závěsů, proto byly ještě před ukončením experimentu pořízeny záznamy č. 025 a 026.

Přehled pořízených záznamů a umístění snímačů v jednotlivých záznamech je v následující tab. 6.

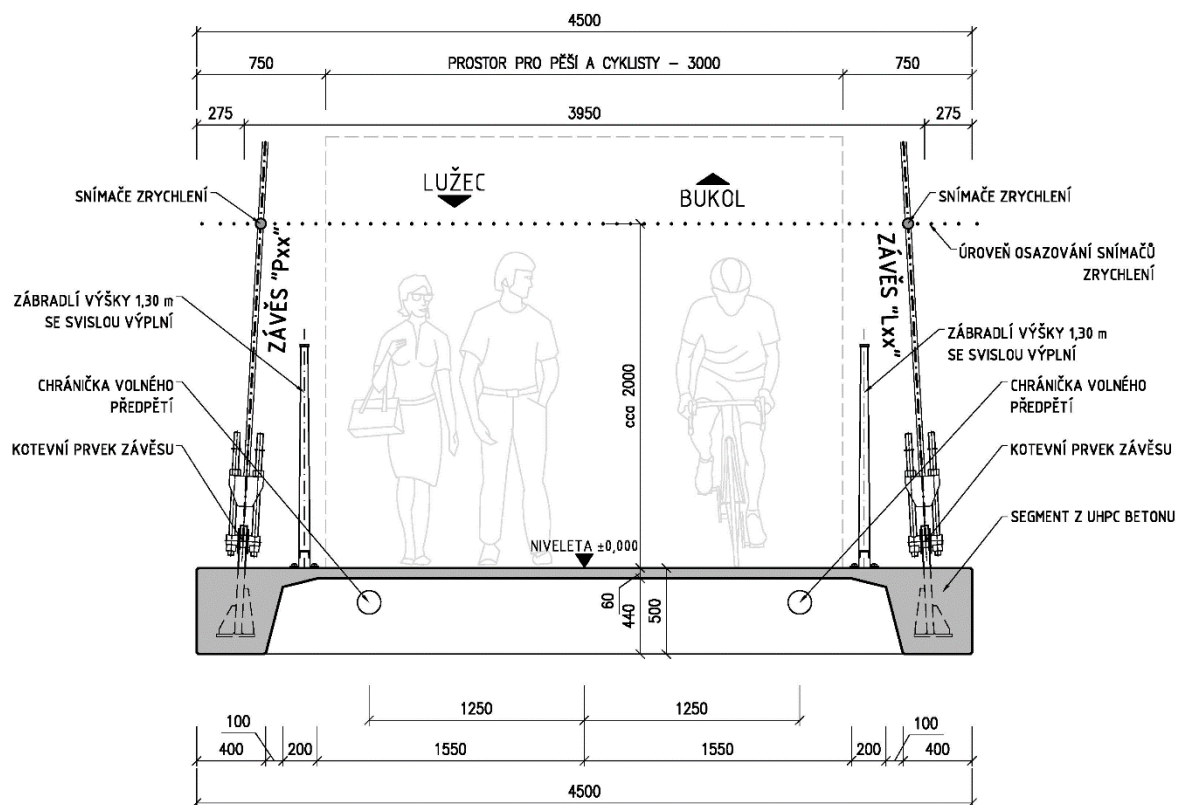
Tab. 6 Přehled pořízených záznamů

Záznam č.	Měřené závěsy							
001	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	L03y	L03z
002	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	L03y	L03z
003	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	L03y	L03z
004	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	L03y	L03z
005	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	L03y	L03z
006	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
007	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
008	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
009	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
010	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
011	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
012	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
013	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
014	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
015	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P03y	P03z
016	L04	P04	L05	P05	L06	P06	L07	P07
017	L04	P04	L05	P05	L06	P06	L07	P07
018	L08	P08	L09	P09	L10	P10	L11	P11
019	L08	P08	L09	P09	L10	P10	L11	P11
020	L12	P12	L13	P13	L14	P14	L15	P15
021	L12	P12	L13	P13	L14	P14	L15	P15
022	L12	P12	L13	P13	L14	P14	L15	P15
023	L16	P16	L17	P17	---	---	---	---
024	L16	P16	L17	P17	---	---	---	---
025	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P02y	P02z
026	L01y	L01z	P01y	P01z	L02y	L02z	P02y	P02z

V průběhu experimentu byly zapisovány údaje o konkrétních rychlostech větru během jednotlivých záznamů a další poznámky. Před koncem experimentu ale došlo k tomu, že papíry, na kterých byly poznámky zapsané, rozfoukal vítr. Některé z nich se zachytily o zábradlí a podařilo se je uchovat, některé z nich skončily v řece. Poznámky,

kteřé byly ztraceny, byly především k záznamům č. 10 až 18. Ihned po ztracení poznámek byly zapsány alespoň nejdůležitější informace, které si skupina experimentátorů pamatovala. Nejdůležitější poznámka byla taková, že při měření záznamů č. 016 a 017 došlo k výraznému kmitání nejen měřených závěsů (závěsy L04, P04, L05, P05, L06, P06, L07, P07), ale i ostatních závěsů, především těch nejdelších (závěsy L01, P01, L02, P02, L03, P03). Tento jev nastal při rychlosti větru 15–20 km/h.

## PŘÍČNÝ ŘEZ - SCHÉMA OZNAČENÍ ZÁVĚSŮ A UMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ



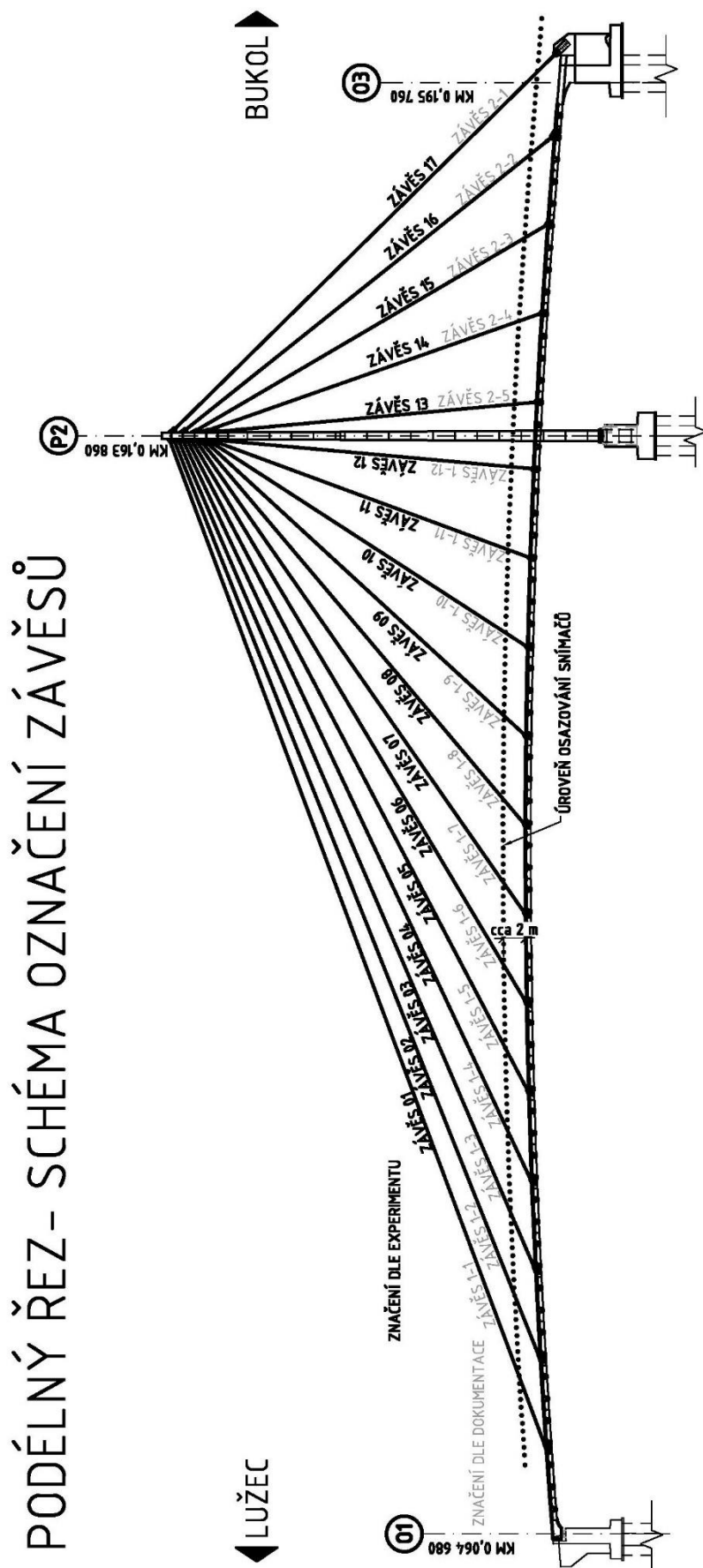
Obr. 23 Schéma označení závěsů a umístění snímačů v příčném řezu při experimentu 9. 4. 2021



Obr. 24 Umístění snímačů zrychlení na závěsech

**Vlevo:** pro měření kmitání závěsů v rovině svislé i vodorovné (záznamy č. 001 až 015, 025 a 026),

**vpravo:** pro měření kmitání závěsů v rovině svislé (záznamy č. 016 až 024).



Obr. 25 Schéma označení závěsů v podélném řezu při experimentu 9.4.2021 (upraveno z [32])

### 7.3.3 Vyhodnocení experimentu

Naměřené záznamy byly zpracovávány v programu Dyn\_anal, který byl vytvořen na katedře mechaniky Fakulty stavební ČVUT v Praze. Ze záznamů kmitání byly vyhodnoceny vlastní frekvence závěsů a maximální výkmity. Ze znalosti vlastních frekvencí závěsů byly frekvenční metodou určeny předpínací síly v závěsech (kapitola 7.3.3.2). Dále byla provedena identifikace předpínací síly a zároveň ohybové tuhosti závěsu (kapitola 7.3.3.3).

#### 7.3.3.1 Vlastní frekvence závěsů

Vlastní frekvence závěsů byly vyhodnoceny z časových záznamů jejich kmitání v měřítku zrychlení pomocí FFT analýzy. K vyhodnocení vlastních frekvencí byly využity záznamy ze snímačů zrychlení, které byly osazeny ve svislé rovině kolmo k ose závěsu (obr. 24 vpravo), a to z důvodu, že v tomto směru se vlastnosti uložení nejvíce blíží ideálnímu kloubu (na rozdíl od uložení v kolmém směru). Způsob připojení závěsu k mostovce je patrný z následujícího obr. 26.



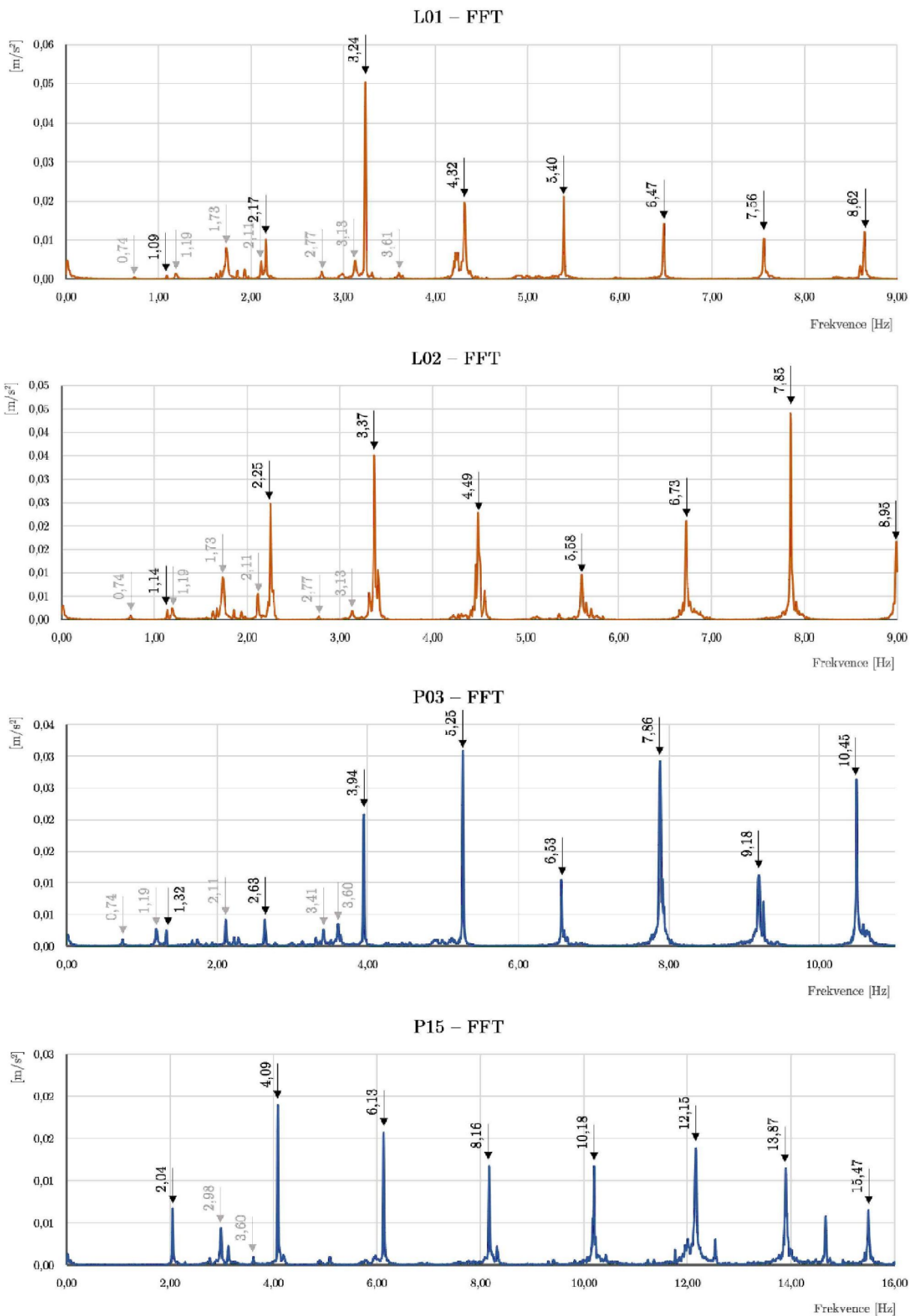
*Obr. 26 Kloubové připojení závěsu k mostovce*

V následující tab. 7 je uvedeno prvních osm vyhodnocených vlastních frekvencí jednotlivých závěsů. U některých závěsů nebyly některé z vyšších vlastních frekvencí spolehlivě určitelné, nebyly tedy do přehledu zahrnuty.

Tab. 7 Vyhodnocené vlastní frekvence závěsů

Kód závěsu	Změřené vlastní frekvence							
	$f_{(1)}$	$f_{(2)}$	$f_{(3)}$	$f_{(4)}$	$f_{(5)}$	$f_{(6)}$	$f_{(7)}$	$f_{(8)}$
	[Hz]							
L01	1,09	2,17	3,24	4,32	5,40	6,47	7,56	8,62
P01	1,12	2,22	3,32	4,43	5,53	6,63	7,75	8,95
L02	1,14	2,25	3,37	4,49	5,58	6,73	7,85	8,95
P02	1,13	2,22	3,33	4,43	5,53	6,64	7,76	8,88
L03	1,34	2,66	4,00	5,34	6,62	7,98	9,31	10,63
P03	1,32	2,63	3,94	5,25	6,53	7,86	9,18	10,45
L04	1,41	2,81	4,21	5,61	7,00	8,41	9,80	11,18
P04	1,44	2,84	4,27	5,69	7,12	8,53	9,94	11,35
L05	1,46	2,90	4,35	5,80	7,25	8,69	10,13	11,53
P05	1,43	2,84	4,26	5,67	7,08	8,50	9,90	11,30
L06	1,66	3,32	4,98	6,63	8,27	9,93	11,55	13,15
P06	1,66	3,34	4,98	6,63	8,29	9,94	11,56	13,18
L07	1,74	3,48	5,21	6,94	8,67	10,39	12,06	13,66
P07	1,77	3,51	5,26	7,00	8,75	10,48	12,17	13,78
L08	1,63	3,23	4,86	6,47	8,08	9,67	11,21	12,07
P08	1,66	3,29	4,95	6,59	8,22	9,86	11,43	12,95
L09	2,02	4,01	6,01	8,00	9,95	---	---	---
P09	1,98	3,93	5,88	7,86	9,77	---	---	---
L10	1,96	3,90	5,84	7,77	9,68	11,44	13,00	---
P10	1,86	3,70	5,54	7,38	9,20	10,89	12,42	---
L11	2,00	3,90	6,01	8,00	9,92	11,65	13,26	---
P11	1,89	3,77	5,64	7,50	9,29	10,94	12,49	---
L12	2,37	4,74	7,12	9,43	11,49	13,16	15,19	17,56
P12	2,41	4,85	7,25	9,61	11,69	13,34	15,44	17,88
L13	1,35	2,72	4,09	5,51	6,94	8,39	9,74	11,00
P13	1,24	2,49	3,76	5,06	6,39	7,73	9,01	10,28
L14	2,01	4,02	6,02	8,02	9,94	11,52	---	---
P14	1,93	3,84	5,77	7,69	9,54	11,17	---	---
L15	1,99	3,97	5,96	7,96	9,93	11,83	13,59	15,13
P15	2,04	4,09	6,13	8,16	10,18	12,15	13,87	15,47
L16	1,83	3,65	5,46	7,29	9,12	10,94	12,67	14,33
P16	1,85	3,68	5,52	7,35	9,20	11,03	12,79	14,46
L17	2,97	5,92	8,86	11,75	14,62	17,24	19,40	21,67
P17	2,95	5,89	8,83	11,75	14,59	17,22	19,27	21,47

Na následujícím obr. 27 jsou vybrané záznamy zpracované ve frekvenční oblasti. Černě jsou popsány vlastní frekvence závěsu, šedě jsou popsány vlastní frekvence mostovky, které se v záznamu kmitání závěsu projeví. Vlastní frekvence mostovky byly prvotně převzaty ze zprávy a vyhodnocení zkoušky, kterou provedli zaměstnanci ÚTAM AV ČR a byly následně ověřeny při experimentu, který je součástí této diplomové práce. Na obr. 27 je také patrné, že charakter FFT je odpovídající strunové teorii, jejíž vlastnosti jsou podrobně popsány v kapitole 6.1.



Obr. 27 Vybrané záznamy ve frekvenční oblasti s označením vlastních frekvencí příslušných závěšů



### 7.3.3.2 Předpínací síla v závěsech

Předpínací sílu v závěsu lze experimentálně určit několika způsoby. Jedním ze způsobů je frekvenční metoda, na kterou je tato kapitola zaměřena. Předpínací sílu lze v rámci frekvenční metody určit podle následujících teorií:

- Strunová teorie,
- Prutová teorie s uložením typu kloub – kloub,
- Prutová teorie s uložením typu vetknutí – vetknutí.

Do vyhodnocení experimentu zaměřeného na kmitání závěsů byla zahrnuta strunová teorie a prutová teorie s uložením typu kloub – kloub. Prutová teorie s uložením typu vetknutí – vetknutí nebyla do vyhodnocení zahrnuta z toho důvodu, že uložení závěsu neodpovídá tomuto typu uložení.

#### Určení předpínací síly podle strunové teorie

V této teorii je závěs modelován jako struna, jejíž vlastnosti byly podrobně popsány v kapitole 6.1. Výpočet předpínací síly  $N_{(j)}^S$  podle strunové teorie se provede podle vztahu (16), který byl již uveden v kapitole 6.1, ale pro větší přehlednost je zde uveden znovu:

$$N_{(j)}^S = \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(j)} \cdot L}{j} \right)^2, \quad (21)$$

kde  $\mu$  je konstantní hmotnost na metr délky struny, pro výpočet byly využity hodnoty uváděné výrobcem,

$j$  je pořadové číslo vlastní frekvence struny,

$f_{(j)}$  je  $j$ -tá změřená vlastní frekvence struny a

$L$  je délka struny, pro výpočet byla využita teoretická délka závěsu podle výkresové dokumentace.

Jak již bylo uvedeno výše, v případě ideální struny by měla být osová síla ve struně  $N_{(j)}^S$  shodná pro všechny změřené vlastní frekvence  $f_{(j)}$ . Toho však při experimentálním zkoumání nelze docílit. Síla byla vypočtena pro prvních 8 vlastních frekvencí (u některých závěsů pro méně vlastních frekvencí, důvod byl vysvětlen v kapitole 7.3.3.1). Poté byl z vypočtených sil podle (16) stanoven aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Všechny údaje vstupující do výpočtu a všechny vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Předpínací síly v závěsech určené podle strunové teorie

Kód závěsu	Hmot. kabelu $\mu$ [kg/m]	Délka kabelu L [m]	Pořadové číslo vlastní frekvence j								Průměr [kN]	Směrodatná odchylka
			1	2	3	4	5	6	7	8		
			Síly v závěsech [kN]									
L01	5,7	96,599	252,8	249,4	248,8	247,9	247,8	247,6	248,5	247,0	248,7	1,7
P01	5,7	96,599	267,2	261,8	261,1	260,4	259,9	259,8	261,0	266,0	262,1	2,7
L02	5,7	88,816	234,3	227,9	226,9	226,4	224,1	226,2	226,4	225,1	227,2	2,9
P02	5,7	88,816	228,3	222,3	221,2	220,3	219,7	220,5	220,8	221,6	221,8	2,6
L03	5,7	81,111	267,7	266,1	267,2	267,3	263,1	265,6	265,6	264,8	265,9	1,4
P03	5,7	81,111	263,1	259,2	258,6	258,4	256,0	257,7	257,7	255,8	258,3	2,1
L04	5,7	73,51	244,9	242,3	242,1	241,9	241,5	242,1	241,5	240,4	242,1	1,2
P04	5,7	73,51	255,5	248,4	249,6	249,3	249,8	249,0	248,4	248,0	249,8	2,2
L05	5,7	66,046	212,0	208,4	209,1	208,7	208,8	208,6	208,1	206,6	208,8	1,4
P05	5,7	66,046	203,4	199,8	200,1	199,5	199,4	199,6	198,9	198,4	199,9	1,4
L06	5,7	58,772	217,0	217,0	216,6	216,4	215,5	215,5	214,4	212,8	215,6	1,4
P06	5,7	58,772	217,0	219,6	217,0	216,4	216,2	215,9	214,6	213,8	216,3	1,6
L07	5,7	51,767	183,9	185,0	184,3	183,9	183,7	183,0	181,4	178,1	182,9	2,1
P07	5,7	51,767	190,3	188,2	187,8	187,1	186,9	186,2	184,7	181,2	186,6	2,5
L08	5,7	45,154	123,5	121,2	121,7	121,4	121,4	120,6	119,1	105,8	119,4	5,2
P08	5,7	45,154	128,1	125,4	126,6	126,0	125,6	125,5	123,8	121,8	125,4	1,7
L09	5,7	39,132	142,5	140,4	139,9	139,7	138,3	---	---	---	140,1	1,4
P09	5,7	39,132	136,9	134,5	134,1	134,8	133,2	---	---	---	134,7	1,2
L10	5,7	34,013	101,3	100,3	100,0	99,5	98,8	95,8	91,0	---	98,1	3,3
P10	5,7	34,013	91,3	90,0	90,0	89,7	89,3	86,8	83,0	---	88,6	2,6
L11	5,7	30,256	83,5	79,2	83,6	83,5	82,1	78,6	74,9	---	80,8	3,1
P11	5,7	30,256	74,6	74,0	73,8	73,3	72,0	69,3	66,4	---	71,9	2,8
L12	5,7	28,413	103,1	103,5	103,7	102,2	97,2	88,5	86,7	88,7	96,7	7,1
P12	5,7	28,413	107,2	108,1	107,6	106,3	100,6	91,0	89,6	91,9	100,3	7,7
L13	5,7	28,704	34,2	34,7	35,0	35,6	36,2	36,7	36,3	35,5	35,5	0,8
P13	5,7	28,704	28,9	29,0	29,5	30,1	30,7	31,2	31,1	31,0	30,2	0,9
L14	5,7	31,85	93,4	93,4	93,0	93,0	91,3	85,2	---	---	91,6	2,9
P14	5,7	31,85	85,9	85,1	85,6	85,5	84,3	80,2	---	---	84,4	2,0
L15	7,2	36,64	153,1	152,3	152,6	153,0	152,5	150,4	145,7	138,3	149,7	4,9
P15	7,2	36,64	161,4	161,4	161,4	160,9	160,3	158,5	151,8	144,6	157,5	5,8
L16	20,4	42,519	491,3	490,0	488,7	490,0	490,8	490,4	482,9	473,3	487,2	5,8
P16	20,4	42,519	502,2	498,1	498,5	497,4	499,4	498,5	492,1	482,0	496,0	5,9
L17	23,2	48,709	1935,6	1925,8	1918,2	1899,9	1881,2	1816,7	1691,1	1615,8	1835,5	39,7
P17	23,2	48,709	1909,6	1906,3	1905,3	1899,9	1873,4	1812,5	1667,7	1585,8	1820,1	34,3

Z nízkých hodnot směrodatných odchylek vyhodnocených sil lze usoudit, že se hodnoty předpínací síly vypočtené pro jednotlivé vlastní frekvence liší velmi málo. To platí především pro závěsy, které jsou typu FLC 32 (závěsy L01 až L14 a P01 až P14), tedy závěsy s nejmenší plochou průřezu. Tyto závěsy lze s dostatečnou přesností modelovat jako strunu (tedy zanedbat jejich ohybovou tuhost  $EI$ ).

#### Určení předpínací síly podle prutové teorie s uložením typu kloub – kloub

V této teorii je závěs modelován jako prut, jehož vlastnosti byly podrobně popsány v kapitole 6.2. Výpočet předpínací síly  $N_{(j)}^P$  podle prutové teorie se provede podle vztahu (17), který byl uveden v kapitole 6.2, ale pro větší přehlednost je zde uveden znovu:

$$N_{(j)}^P = \mu \left( \frac{2 \cdot f_{(j)} \cdot L}{j} \right)^2 - \left( \frac{j \cdot \pi}{L} \right)^2 EI, \quad (22)$$

kde  $\mu$  je konstantní hmotnost na metr délky prutu, pro výpočet byly využity hodnoty uváděné výrobcem,

$j$  je pořadové číslo vlastní frekvence prutu,

$f_{(j)}$  je  $j$ -tá vlastní frekvence prutu,

$L$  je délka prutu, pro výpočet byla využita teoretická délka závěsu podle výkresové dokumentace.

$EI$  je ohybová tuhost prutu. Hodnota Youngova modulu pružnosti závěsu  $E$  byla uvažována jako hodnota uváděná výrobcem. Moment setrvačnosti průřezu  $I$  byl uvažován jako hodnota odpovídající náhradnímu ocelovému průřezu (který byl vypočten z rovnosti ploch). Tato úvaha není zcela přesná, průřez je podle ní uvažován tužší, než je ve skutečnosti.

Podobně jako u výpočtu předpínacích sil pomocí strunové teorie, i zde jsou hodnoty směrodatných odchylek velmi malé, především u závěsů, které jsou typu FLC 32 (závěsy L01 až L14 a P01 až P14), tedy u závěsů s nejmenší plochou průřezu. Zahrnutím ohybové tuhosti  $EI$  závěsu, která byla určena výše popsaným způsobem, nebyly výsledky příliš ovlivněny. Lze tedy usoudit, že pro většinu závěsů je možné vliv ohybové tuhosti  $EI$  zanedbat. Hodnoty  $\mu$  a  $L$  jsou v následující tab. 9 uvažovány stejně jako v tab. 8, proto zde nejsou znovu uvedeny.

Tab. 9 Předpínací síly v závěsech určené podle prutové teorie s uložením typu kloub – kloub

Kód závěsu	E [GPa]	I $\times 10^{-8}$ [m <sup>4</sup> ]	Pořadové číslo vlastní frekvence j								Průměr [kN]	Směrodatná odchylka
			1	2	3	4	5	6	7	8		
L01	164,5	3,69	252,8	249,4	248,7	247,7	247,6	247,4	248,1	246,6	248,5	1,8
P01	164,5	3,69	267,2	261,8	261,0	260,3	259,7	259,6	260,7	265,6	262,0	2,7
L02	164,5	3,69	234,3	227,9	226,8	226,3	223,9	225,9	226,0	224,6	227,0	3,0
P02	164,5	3,69	228,3	222,2	221,1	220,1	219,5	220,2	220,5	221,1	221,6	2,6
L03	164,5	3,69	267,7	266,1	267,1	267,2	262,9	265,3	265,1	264,3	265,7	1,5
P03	164,5	3,69	263,1	259,2	258,5	258,3	255,8	257,4	257,3	255,3	258,1	2,3
L04	164,5	3,69	244,9	242,3	242,0	241,7	241,2	241,7	240,9	239,7	241,8	1,4
P04	164,5	3,69	255,5	248,4	249,5	249,1	249,6	248,6	247,9	247,3	249,5	2,4
L05	164,5	3,69	212,0	208,3	209,0	208,5	208,5	208,1	207,4	205,7	208,4	1,6
P05	164,5	3,69	203,4	199,8	199,9	199,3	199,1	199,1	198,3	197,5	199,5	1,6
L06	164,5	3,69	217,0	216,9	216,4	216,1	215,0	214,9	213,6	211,7	215,2	1,7
P06	164,5	3,69	217,0	219,6	216,9	216,1	215,8	215,3	213,7	212,7	215,9	2,0
L07	164,5	3,69	183,9	184,9	184,1	183,6	183,2	182,2	180,3	176,7	182,4	2,5
P07	164,5	3,69	190,3	188,1	187,6	186,8	186,3	185,4	183,6	179,7	186,0	3,0
L08	164,5	3,69	123,5	121,1	121,5	121,0	120,7	119,6	117,7	103,9	118,6	5,8
P08	164,5	3,69	128,1	125,3	126,3	125,5	124,9	124,5	122,4	119,9	124,6	2,3
L09	164,5	3,69	142,4	140,2	139,5	139,0	137,3	---	---	---	139,7	1,7
P09	164,5	3,69	136,8	134,3	133,8	134,2	132,2	---	---	---	134,3	1,5
L10	164,5	3,69	101,3	100,1	99,5	98,7	97,5	93,9	88,4	---	97,1	4,1
P10	164,5	3,69	91,2	89,8	89,5	88,8	88,0	84,9	80,5	---	87,5	3,4
L11	164,5	3,69	83,4	78,9	83,0	82,4	80,4	76,3	71,7	---	79,5	4,0
P11	164,5	3,69	74,5	73,7	73,2	72,2	70,3	67,0	63,2	---	70,6	3,8
L12	164,5	3,69	103,0	103,2	103,0	101,0	95,3	85,9	83,0	83,9	101,1	8,5
P12	164,5	3,69	107,1	107,8	106,9	105,1	98,7	88,3	85,9	87,2	105,1	9,1
L13	164,5	3,69	34,2	34,5	34,3	34,4	34,3	34,1	32,8	30,9	34,1	1,2
P13	164,5	3,69	28,8	28,7	28,9	28,9	28,9	28,5	27,5	26,4	28,6	0,9
L14	164,5	3,69	93,4	93,2	92,5	92,0	89,9	83,1	---	---	90,7	3,6
P14	164,5	3,69	85,8	84,9	85,0	84,5	82,8	78,0	---	---	83,5	2,6
L15	164,7	5,91	153,0	152,1	152,0	151,8	150,7	147,8	142,2	133,7	151,2	6,3
P15	164,7	5,91	161,4	161,1	160,8	159,8	158,5	155,9	148,3	140,0	159,6	7,2
L16	165,2	47,85	490,9	488,3	484,8	483,1	480,0	474,9	461,8	445,7	480,5	14,3
P16	165,2	47,85	501,7	496,4	494,7	490,5	488,7	483,0	471,0	454,4	489,4	14,5
L17	164,9	61,90	1935,2	1924,1	1914,4	1893,1	1870,5	1801,4	1670,3	1588,6	1858,4	120,9
P17	164,9	61,90	1909,2	1904,6	1901,4	1893,1	1862,8	1797,2	1646,9	1558,6	1845,0	125,9

## Porovnání výsledků podle strunové a prutové teorie s uložením typu kloub – kloub

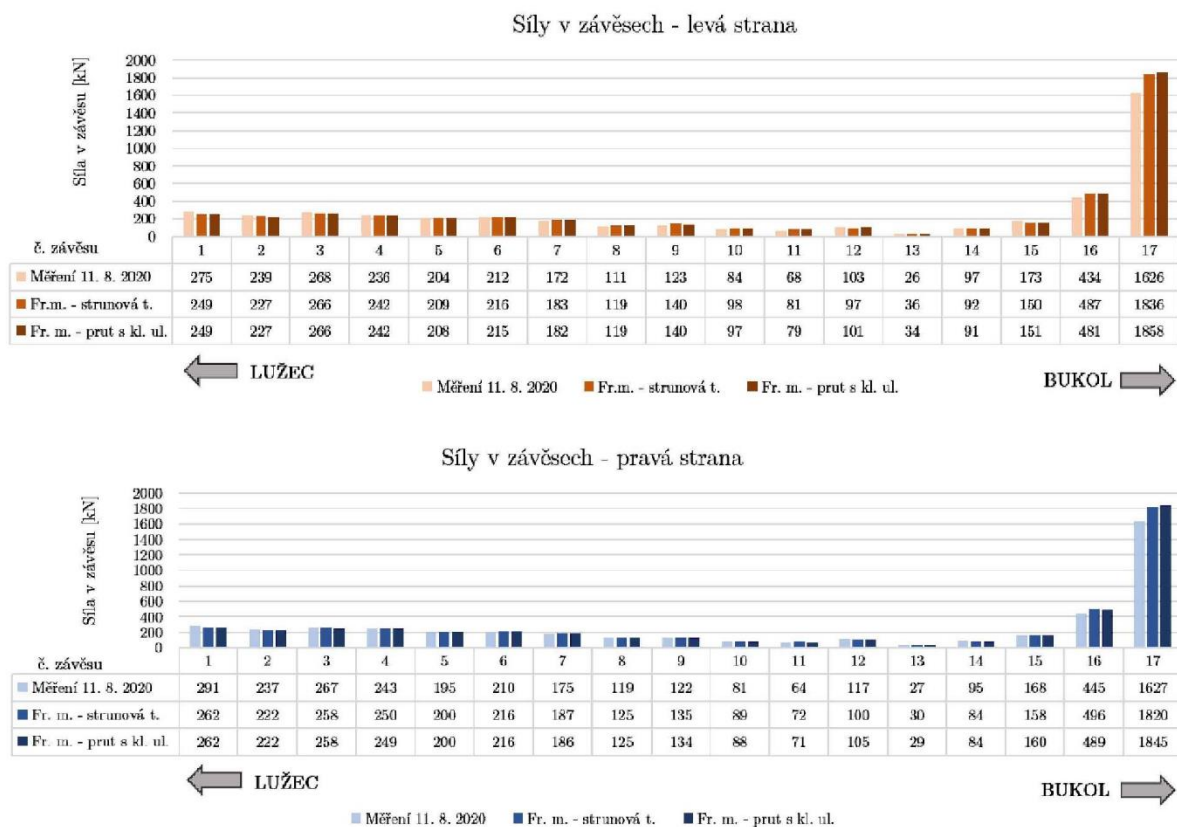
V následující tab. 10 jsou uvedeny síly, které byly vypočteny pomocí strunové teorie, prutové teorie s uložením typu kloub – kloub, příslušné směrodatné odchylky a variační koeficienty a rozdíl sil v absolutní hodnotě. Je vidět, že rozdíl je výraznější pouze u závěsů s větší průřezovou plochou, tedy u závěsů L16, P16 (typ FLC 60) a L17, P17 (typ FLC 64). Směrodatné odchylky a variační koeficienty vycházejí menší (příznivější) u všech závěsů pro strunovou teorii. Podle autorky výpočet podle strunové teorie přináší přesnější výsledky. Skutečnost, že zahrnutí ohybové tuhosti EI do výpočtu nepřineslo zpřesnění výsledků, může být způsobena nepřesným určením EI, především momentu setrvačnosti I, jak již bylo popsáno výše.

Tab. 10 Porovnání výsledků získaných výpočtem podle strunové a prutové teorie

Kód závěsu	Strunová teorie			Prutová teorie			Rozdíl sil [kN]
	Průměr [kN]	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Průměr [kN]	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	
L01	248,7	1,7	0,68 %	248,5	1,8	0,72 %	0,2
P01	262,1	2,7	1,01 %	262,0	2,7	1,01 %	0,2
L02	227,2	2,9	1,28 %	227,0	3,0	1,32 %	0,2
P02	221,8	2,6	1,15 %	221,6	2,6	1,19 %	0,2
L03	265,9	1,4	0,54 %	265,7	1,5	0,58 %	0,2
P03	258,3	2,1	0,82 %	258,1	2,3	0,88 %	0,2
L04	242,1	1,2	0,50 %	241,8	1,4	0,58 %	0,3
P04	249,8	2,2	0,90 %	249,5	2,4	0,95 %	0,3
L05	208,8	1,4	0,68 %	208,4	1,6	0,79 %	0,4
P05	199,9	1,4	0,70 %	199,5	1,6	0,81 %	0,4
L06	215,6	1,4	0,63 %	215,2	1,7	0,80 %	0,4
P06	216,3	1,6	0,76 %	215,9	2,0	0,91 %	0,4
L07	182,9	2,1	1,13 %	182,4	2,5	1,37 %	0,6
P07	186,6	2,5	1,36 %	186,0	3,0	1,61 %	0,6
L08	119,4	5,2	4,39 %	118,6	5,8	4,85 %	0,7
P08	125,4	1,7	1,39 %	124,6	2,3	1,86 %	0,7
L09	140,1	1,4	0,97 %	139,7	1,7	1,20 %	0,4
P09	134,7	1,2	0,91 %	134,3	1,5	1,11 %	0,4
L10	98,1	3,3	3,39 %	97,1	4,1	4,26 %	1,0
P10	88,6	2,6	2,92 %	87,5	3,4	3,88 %	1,0
L11	80,8	3,1	3,81 %	79,5	4,0	4,97 %	1,3
P11	71,9	2,8	3,85 %	70,6	3,8	5,41 %	1,3
L12	96,7	7,1	7,30 %	101,1	8,5	8,43 %	4,4

Pokračování tab. 10

Kód závěsu	Strunová teorie			Prutová teorie			Rozdíl sil [kN]
	Průměr [kN]	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Průměr [kN]	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	
P12	100,3	7,7	7,64 %	105,1	9,1	8,68 %	4,9
L13	35,5	0,8	2,23 %	34,1	1,2	3,46 %	1,5
P13	30,2	0,9	2,92 %	28,6	0,9	3,00 %	1,6
L14	91,6	2,9	3,20 %	90,7	3,6	3,95 %	0,9
P14	84,4	2,0	2,33 %	83,5	2,6	3,13 %	0,9
L15	149,7	4,9	3,27 %	151,2	6,3	4,16 %	1,5
P15	157,5	5,8	3,66 %	159,6	7,2	4,50 %	2,0
L16	487,2	5,8	1,19 %	480,5	14,3	2,98 %	6,7
P16	496,0	5,9	1,20 %	489,4	14,5	2,97 %	6,6
L17	1 835,5	39,7	2,16 %	1 858,4	120,9	6,51 %	22,9
P17	1 820,1	34,3	1,89 %	1 845,0	125,9	6,82 %	25,0



Obr. 28 Porovnání vypočtených sil v závěsech podle frekvenční metody s hodnotami naměřenými 11. 8. 2020

Na obr. 28 je vidět porovnání sil vypočtených podle frekvenční metody se silami naměřenými 11. 8. 2020 (hodnoty sil z měření jsou převzaty z dokumentace RDS od společnosti Novák & Partner, s r. o.).

### 7.3.3.3 Identifikace předpínací síly a ohybové tuhosti závěsu

Pro prizmatický<sup>3</sup>, kloubově uložený prut s předpínací silou  $N_P$  platí rovnice (20), která byla uvedena již v kapitole 6.2. Ze vztahu (20) lze určit předpínací sílu  $N_P$  a ohybovou tuhost  $EI$  ze znalosti vlastních frekvencí  $f_{(j)}$ , hmotnosti závěsu na metr běžný  $\mu$  a délky závěsu  $L$ . Pro přehlednost je zde vztah (20) uveden znovu:

$$\begin{pmatrix} 1 & (\frac{1\pi}{L})^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & (\frac{j\pi}{L})^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & (\frac{n\pi}{L})^2 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} 1 & (\frac{1\pi}{L})^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & (\frac{j\pi}{L})^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & (\frac{n\pi}{L})^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_P \\ EI \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & (\frac{1\pi}{L})^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & (\frac{j\pi}{L})^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & (\frac{n\pi}{L})^2 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \mu(\frac{2\cdot f_{(1)}\cdot L}{1})^2 \\ \vdots \\ \mu(\frac{2\cdot f_{(j)}\cdot L}{j})^2 \\ \vdots \\ \mu(\frac{2\cdot f_{(n)}\cdot L}{n})^2 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

V následující tab. 11 jsou uvedeny výsledky  $N_P$  a  $EI$  pro výpočet podle (20).

Tab. 11 Identifikace předpínací síly a ohybové tuhosti na základě vztahu (20)

Kód závěsu	Hmotnost kabelu $\mu$ [kg/m]	Délka kabelu $L$ [m]	$N_P$ [kN]	$EI$ [kNm <sup>2</sup> ]
L01	5,7	96,599	250,1	-50,5
P01	5,7	96,599	262,0	4,0
L02	5,7	88,816	229,2	-63,8
P02	5,7	88,816	223,2	-41,9
L03	5,7	81,111	266,9	-25,3
P03	5,7	81,111	260,2	-48,0
L04	5,7	73,510	243,2	-23,4
P04	5,7	73,510	251,3	-32,5
L05	5,7	66,046	210,1	-22,0
P05	5,7	66,046	201,1	-20,4
L06	5,7	58,772	217,3	-22,1
P06	5,7	58,772	218,1	-23,9
L07	5,7	51,767	185,2	-24,4
P07	5,7	51,767	189,5	-31,2
L08	5,7	45,154	124,5	-41,5
P08	5,7	45,154	127,3	-15,3

<sup>3</sup> Prizmatický prut je prut konstantního průřezu

Pokračování tab. 11

Kód závěsu	Hmotnost kabelu $\mu$ [kg/m]	Délka kabelu L [m]	$N_p$ [kN]	EI [kNm <sup>2</sup> ]
L09	5,7	39,132	141,7	-22,0
P09	5,7	39,132	135,9	-16,5
L10	5,7	34,013	102,0	-22,7
P10	5,7	34,013	91,6	-17,4
L11	5,7	30,256	83,6	-13,2
P11	5,7	30,256	75,2	-15,3
L12	5,7	28,413	104,6	-25,2
P12	5,7	28,413	108,8	-27,2
L13	5,7	28,704	34,9	2,1
P13	5,7	28,704	29,2	3,1
L14	5,7	31,850	94,8	-21,8
P14	5,7	31,850	86,5	-14,3
L15	7,2	36,640	155,1	-28,4
P15	7,2	36,640	164,0	-34,3
L16	20,4	42,519	493,0	-41,8
P16	20,4	42,519	502,2	-44,0
L17	23,2	48,709	1 967,3	-1 241,9
P17	23,2	48,709	1 955,2	-1 273,9

Z výsledků uvedených v tab. 11 je jasně vidět, že tato metoda výpočtu není v tomto případě vhodná, a to především kvůli skutečnosti, že u většiny závěsů vychází záporná ohybová tuhost, což není výsledek blížící se realitě. Příčina těchto výsledků je následující: u strunové teorie platí, že každá vyšší vlastní frekvence je **rovna** kladnému celočíselnému násobku základní (první) vlastní frekvence. Pro reálné pruty (které nejsou ideální strunou) by mělo platit, že každá vyšší vlastní frekvence je **větší nebo rovna** kladnému celočíselnému násobku základní (první) vlastní frekvence. V případě tohoto experimentu však byly vyhodnocené vyšší vlastní frekvence **menší nebo rovny** kladným celočíselným násobkům základní (první) vlastní frekvence, což způsobilo ve výpočtu zápornou hodnotu ohybové tuhosti prutu.

#### 7.3.3.4 Maximální výkmity a rozkmity

V následující tab. 12 jsou uvedeny maximální výkmity a rozkmity výchylek závěsů, které byly z měření 9. 4. 2021 vyhodnoceny. Hodnoty maximálních výkmitů výchylek ve sledovaných bodech závěsů byly určeny pomocí druhé integrace naměřených zrychlení v časové oblasti s využitím Simpsonova pravidla. Hodnota odpovídajícího



maximálního rozkmitu výchylky byla určena jako dvojnásobek hodnoty maximálního výkmitu výchylky. V tab. 12 jsou uvedeny maximální hodnoty výkmitů a rozkmitů výchylek pro závěsy L01 až L08 a P01 až P08, protože v záznamech kmitání zbývajících závěsů nebyly vyhodnoceny výkmity výchylky větší než 1 mm, popř. rozkmity výchylky větší než 2 mm. Výkmity výchylky větší než 1 cm, popř. rozkmity výchylky větší než 2 cm, jsou označeny tučně. Největší výkmit výchylky byl zaznamenán u závěsu L01, a to 1,4 cm, což odpovídá rozkmitu 2,8 cm.

Tab. 12 Maximální vyhodnocené výkmity výchylky ve sledovaných bodech závěsů a jim odpovídající rozkmity výchylky

Kód kabelu	Maximální výkmit výchylky [mm]	Odpovídající rozkmit výchylky [mm]
L01	14,0	28,0
P01	10,8	21,6
L02	11,9	23,8
P02	0,8	1,6
L03	2,3	4,6
P03	8,6	17,2
L04	6,7	13,4
P04	1,5	3,0
L05	1,1	2,2
P05	1,4	2,8
L06	1,0	2,0
P06	6,7	13,4
L07	1,1	2,2
P07	1,1	2,2
L08	1,2	2,4
P08	1,0	2,0

#### 7.3.4 Shrnutí a zhodnocení výsledků experimentu

Z naměřených záznamů kmitání závěsů byly pomocí FFT analýzy vyhodnoceny vlastní frekvence závěsů. Dále byla výpočtem určena předpínací síla v závěsu, a to třemi způsoby: podle strunové teorie, podle prutové teorie s uložením typu kloub – kloub a pomocí identifikace předpínací síly a ohybové tuhosti. Za nejpřesnější výsledky považuje autorka výsledky získané výpočtem podle strunové teorie, a to z důvodu, že při tomto způsobu výpočtu vycházely nejmenší směrodatné odchylky (viz tab. 8 a tab. 10). Výsledky získané výpočtem pomocí identifikace předpínací síly a ohybové tuhosti jsou zcela nereálné, a to především kvůli záporné ohybové tuhosti, která byla vypočtena

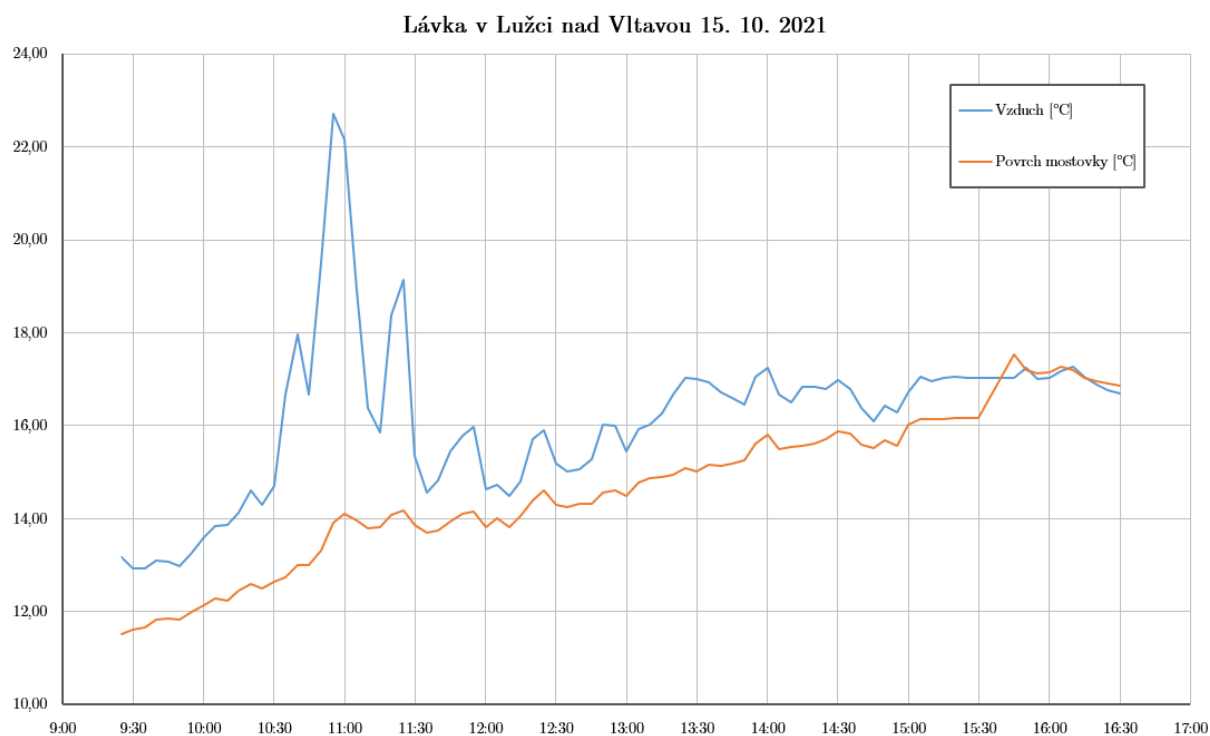
u většiny závěsů. Tento systematický jev ve výpočtu mohl být způsoben např. průvěsem lana.

## 7.4 Experimentální modální analýza a dynamická zkouška zatěžovací

Cílem experimentální modální analýzy (dynamické zkoušky informativní ve smyslu ČSN 73 6209 [6]) bylo zjištění vlastních frekvencí a vlastních tvarů vodorovné nosné konstrukce lávky. Cílem dynamické zkoušky zatěžovací bylo zjištění dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení způsobené chodci a její následné posouzení podle kritérií uvedených v normách, předpisech a doporučeních, která byla podrobně rozebrána v kapitole 4.2.

### 7.4.1 Meteorologické podmínky

Experiment se uskutečnil dne 15. 10. 2021, termín zkoušky byl vybírán s ohledem na počasí. Bylo polojasno. Rychlosti větru se pohybovaly většinu času měření do 20 km/h, maximální naměřená hodnota rychlosti větru byla 43 km/h. Průběh teplot vzduchu a povrchu mostovky jsou na následujícím obr. 29. Teploty byly měřeny odporovými teploměry N1ATG7 připojenými k záznamové ústředně MS5D od firmy COMET SYSTEM s. r. o.



Obr. 29 Průběh teplot vzduchu a povrchu mostovky během dne 15. 10. 2021

Velké výkyvy v průběhu teploty vzduchu mezi 10:30 a 11:30 byly způsobeny s největší pravděpodobností skutečností, že snímač byl v tomto úseku dne střídavě ve stínu a na slunci.

#### 7.4.2 Plán experimentu

Ještě před samotným experimentem byla k dispozici zpráva a vyhodnocení dynamické zkoušky [33], kterou provedli zaměstnanci ÚTAM AV ČR, a proto bylo možné plán zkoušky upravit. K nestandardnímu průběhu dynamické zkoušky bylo v plánu přistoupit z důvodu, že nebylo možné zajistit dostatečný počet figurantů pro dynamickou zkoušku zatěžovací v odpoledních hodinách. Standardní průběh dynamické zkoušky je následující:

- 1) provedení experimentální modální analýzy,
- 2) předběžné vyhodnocení vlastních frekvencí a vlastních tvarů pomocí FFT analýzy,
- 3) provedení dynamické zkoušky zatěžovací, zatěžovací stavy jsou zvoleny tak, že frekvence vynuceného kmitání (tj. krokové frekvence chodců přecházejících přes lávku) jsou rovny předběžně vyhodnoceným vlastním frekvencím konstrukce pro naměření co největší (nejnepříznivější) dynamické odezvy mostovky lávky na dynamické zatížení.

Provedení experimentu, který je součástí této diplomové práce, bylo naplánováno následujícím nestandardním způsobem:

- 1) provedení dynamické zkoušky zatěžovací tak, že frekvence vynuceného kmitání jsou rovny předběžně vyhodnoceným vlastním frekvencím konstrukce a podoba příslušných vlastních tvarů vodorovné nosné konstrukce byla převzata ze zprávy o provedení zkoušky [33], kterou zpracovali zaměstnanci ÚTAM AV ČR. Podle podoby vlastních tvarů vodorovné nosné konstrukce byla umístěna měřicí linka tak, aby bylo možné naměřit co největší (nejnepříznivější) dynamickou odezvu mostovky lávky na dynamické zatížení.
- 2) provedení experimentální modální analýzy.

Nestandardní plán dynamické zkoušky se podařilo splnit. Ještě před začátkem dynamické zatěžovací zkoušky bylo zpozorováno výrazné kmitání několika závěsů způsobené větrem, a tak byl pořízen jeden záznam kmitání závěsů L03 a P03. Průběh a vyhodnocení dynamické zkoušky zatěžovací a experimentální modální analýzy budou podrobně popsány v následujících kapitolách.

### 7.4.3 Experimentální modální analýza

Jak již bylo popsáno v kapitole 4.1.1, experimentální modální analýza je zkouška zaměřená na zjištění charakteristik vlastního kmitání konstrukce. V následujících kapitolách je podrobně popsáno uspořádání zkoušky, její průběh a vyhodnocení charakteristik vlastního kmitání konstrukce.

#### 7.4.3.1 Uspořádání experimentální modální analýzy

Pro provedení experimentální modální analýzy byla zvolena metoda AVT (Ambient Vibration Testing), a to z důvodu, že předmětem experimentu byla konstrukce, u které se předpokládal nízký útlum. Jak bylo již podrobněji popsáno v kapitole 7.2, měřicí linka se skládala z osmi snímačů zrychlení (včetně dvou referenčních snímačů, jeden byl orientován ve svislém směru, druhý ve vodorovném směru kolmém k podélné ose lávky), měřicí ústředny a počítače s řídicím softwarem, který umožnil provést FFT analýzu naměřeného kmitání lávky v režimu on-line.

Referenční snímač je při experimentu nutné umístit do takového bodu, ve kterém všechny vyšetřované vlastní tvary mají nenulovou pořadnici, referenční snímač zůstává během celého měření v tomto bodě.

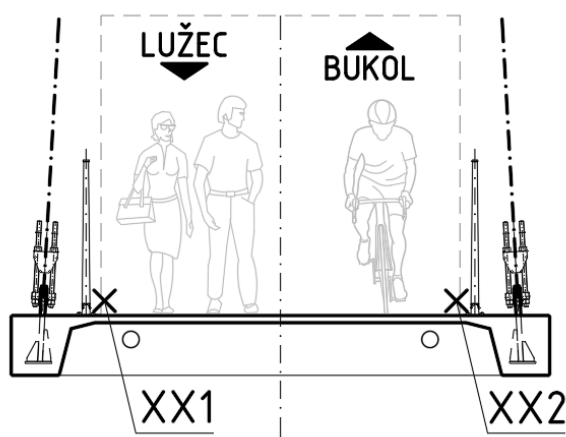
Pro vyšetření podoby vlastních tvarů lávky byla na její mostovce zvolena síť bodů (obr. 31). Řezy č. **01Y** až **35Y** (kde **Y** označuje číslo bodu v příčném řezu, viz obr. 30) byly zvoleny v místech spár mezi prefabrikovanými díly. Aby bylo možné stihnout experiment během jednoho dne, byly k měření vybrány pouze liché spáry. V místě blízko vetknutí nosné konstrukce do opěry O3 bylo měření provedeno výjimečně i v místě sudé spáry (řez č. **34Y**), a to kvůli přesnějšímu stanovení vlivu vetknutí na podobu vlastních tvarů konstrukce. Na pylon nebylo možné z mostovky snímače osadit.

V příčném řezu nosné konstrukce lávky byly umístěny dva body (body **XX1** a **XX2**, kde **XX** je číslo příčného řezu, viz obr. 30 a obr. 31) tak, aby bylo možné rozlišit, zda nosná konstrukce lávky v zachycených vlastních tvarech kmitá svislým ohybovým kmitáním, torzním kmitáním nebo vodorovným kmitáním.

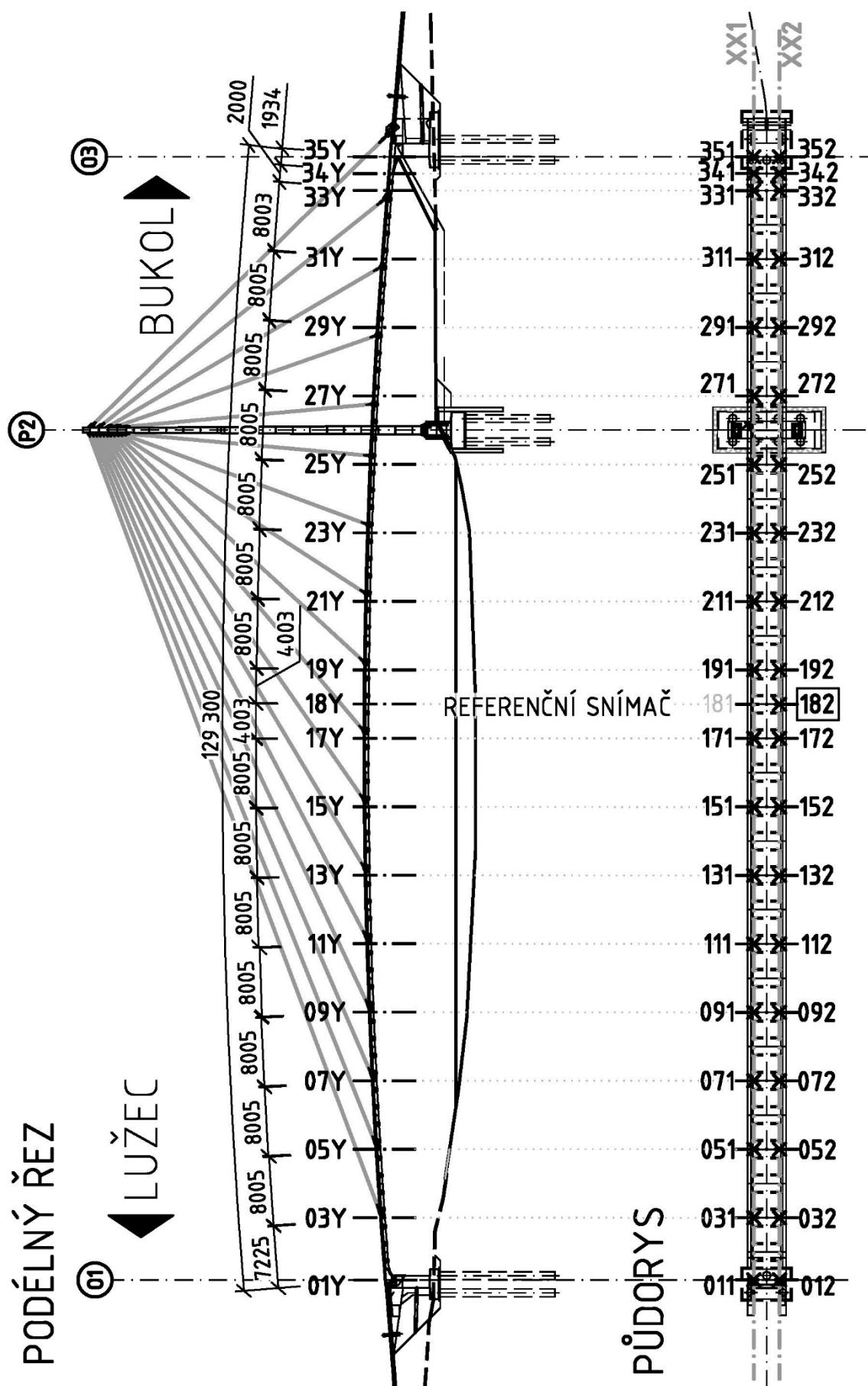
Za tvary svislého ohybového kmitání byly označeny *ty*, u kterých vyšla zhruba stejná pořadnice ve svislém směru pro body **XX1** a **XX2**. Mezi tvary vodorovného kmitání byly zahrnuty tvary s přibližně stejnou pořadnicí ve vodorovném směru pro body **XX1** až **XX2**. Za tvary kmitání torzního byly považovány tvary s pořadnicemi v bodech **XX1** a **XX2** s opačnými znaménky.

Při experimentu byly použity dva referenční snímače, jeden měřil kmitání ve svislém směru (182z) a druhý ve vodorovném směru kolmém k podélné ose lávky (182y). Oba referenční snímače byly při experimentu umístěny do referenčního bodu č. 182, kde se předpokládala nenulová pořadnice u všech důležitých vlastních tvarů nosné konstrukce lávky.

## PŘÍČNÝ ŘEZ ŘEZ Č. XXY



Obr. 30 Schéma uspořádání modální analýzy v příčném řezu (upraveno z [32])

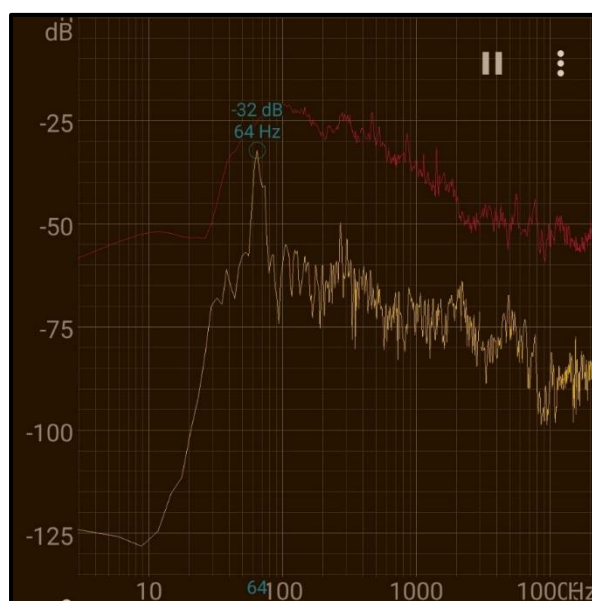


Obr. 31 Schéma uspořádání experimentální modální analýzy v podélném řezu a půdorysu (upraveno z [32])

## 7.4.3.2 Průběh experimentální modální analýzy

Jak již bylo uvedeno v kapitole 7.4.2, experimentální modální analýza byla provedena po dynamické zkoušce zatěžovací. Bylo využito kmitání lávky buzené větrem, které bylo dostatečné ke splnění účelu experimentu. Rychlost větru se pohybovala většinu času měření do 20 km/h, výjimečně až přes 30 km/h, maximální naměřená rychlost větru byla 43 km/h. Postupovalo se postupně po řezech, a to od řezu č. 01Y do řezu č. 35Y. V každém řezu byly sledovány dva body mostovky (XX1 a XX2, kde XX je číslo řezu, viz obr. 30 a obr. 31), do kterých byla umístěna ocelová závaží se snímači (viz obr. 20). Měření bylo realizováno pomocí šesti snímačů zrychlení. Na každém závaží byly upevněny 3 snímače, a to ve svislém směru (označen jako XXYz), ve vodorovném směru kolmo k podélné ose lávky (označen jako XXYy) a ve vodorovném směru rovnoběžném s podélnou osou lávky (označen jako XXYx). Dva referenční snímače byly umístěny v bodě 182 a měřily vibrace ve svislém směru (182z) a ve směru vodorovném kolmo k podélné ose lávky (182y). V tomto bodě byly referenční snímače umístěny po celou dobu měření.

Při měření v řezu č. 15Y bylo slyšet dunění. Rychlost větru dosahovala v těchto okamžicích až 43 km/h. Frekvence tohoto slyšitelného dunění byla zjištěna v aplikaci Spectroid. Pohybovala se v intervalu přibližně od 60 do 100 Hz (obr. 32), byla značně proměnná. Příčinou tohoto jevu bylo s vysokou pravděpodobností to, že kmitání závěsů způsobené větrem se přeneslo na desku prefabrikovaného dílce mostovky a ta kmitala v některé ze svých vlastních frekvencí. Energie kmitavého pohybu se šířila prostředím jako strukturální hluk.



Obr. 32 Zjištěná frekvence dunění pomocí aplikace Spectroid

### 7.4.3.3 Vyhodnocení experimentální modální analýzy

Pro vyhodnocení vlastních frekvencí a vlastních tvarů bylo pořízeno celkem 19 záznamů kmitání konstrukce. Každý záznam byl dlouhý přibližně 5 minut. K vyhodnocení vlastních frekvencí a vlastních tvarů byl použit profesionální program ME'scopeVES firmy Vibrant Technology, Inc.

Naměřené záznamy kmitání lávky byly pomocí FFT převedeny z časové do frekvenční oblasti. Vzhledem k tomu, že velikosti budících sil rozkmitávajících lávku nebyly měřeny, byly z frekvenčních spekter odezvy v jednotlivých bodech lávky  $\mathbf{k}$  vyhodnoceny tzv. frekvenční přenosové funkce pro vyhodnocení pracovních tvarů kmitání  $ODSH_{kR}(if)$ . Funkce  $ODSH_{kR}(if)$  je komplexní skládající se z reálné a imaginární složky a většinou se udává v goniometrickém vyjádření pomocí velikosti (magnitudy) a fáze. Magnituda  $ODSH_{kR}(if)$  je vyjádřena čistě jako magnituda frekvenční funkce kmitání konstrukce  $rk(if)$  (výchylky, rychlosti kmitání, zrychlení) naměřeného v bodě  $\mathbf{k}$ . Při vyhodnocení fázového úhlu  $\varphi_k$  funkce  $ODSH_{kR}(if)$  je fáze frekvenčního spektra odezvy v bodě  $\mathbf{k}$  vztažena k fázi frekvenčního spektra odezvy v referenčním bodě  $\mathbf{R}$ .

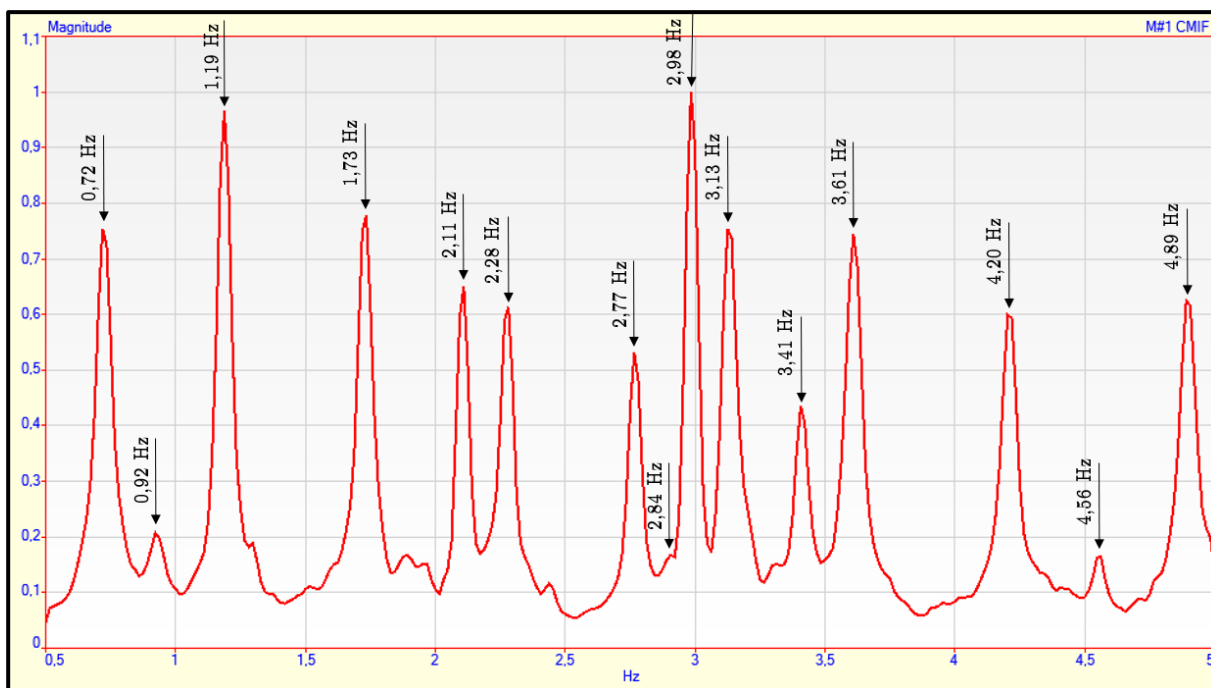
Protože všechny měřené body nosné konstrukce nebyly při experimentu osazeny ve shodném časovém okamžiku, ale měření bylo rozděleno na 19 měřicích sestav, a tedy úroveň budících sil v jednotlivých měřicích sestavách nebyla shodná, byly pro přesnější stanovení tvarů vlastního kmitání stanoveny i funkce Transmisibility  $T_{kR}(if)$ . Tato funkce se stanoví obdobně jako klasická přenosová funkce  $H_{kR}(if)$  (v měřítku inertance) pouze funkce budící síly je nahrazena funkcí odezvy v referenčním bodě

$$T_{kR}(if) = \frac{\ddot{w}_k(if)}{\ddot{w}_R(if)}, \quad (24)$$

kde  $i$  je imaginární jednotka,  $\ddot{w}_k(if)$  je odezva konstrukce v měřítku zrychlení v bodě  $\mathbf{k}$  zobrazená ve frekvenční oblasti a  $\ddot{w}_R(if)$  je odezva konstrukce v měřítku zrychlení ve referenčním bodě  $\mathbf{R}$ . Při takto sestavených funkcích jsou odezvy konstrukce v jednotlivých měřicích sestavách vzájemně vždy ve stejném poměru bez ohledu na velikost budících sil a pokud jsou známy vlastní frekvence konstrukce, mohou být z těchto funkcí zpřesněny tvary vlastního kmitání.

Na obr. 33 je vykreslena integrální funkce vyhodnocovacího programu, ve které jsou vyznačeny vyhodnocené vlastní frekvence lávky. Vyhodnocené vlastní frekvence a charakter příslušný vlastních tvarů jsou uvedeny v následující tab. 13. Vlastní tvary jsou vykresleny na následujících obr. 34 až obr. 48.





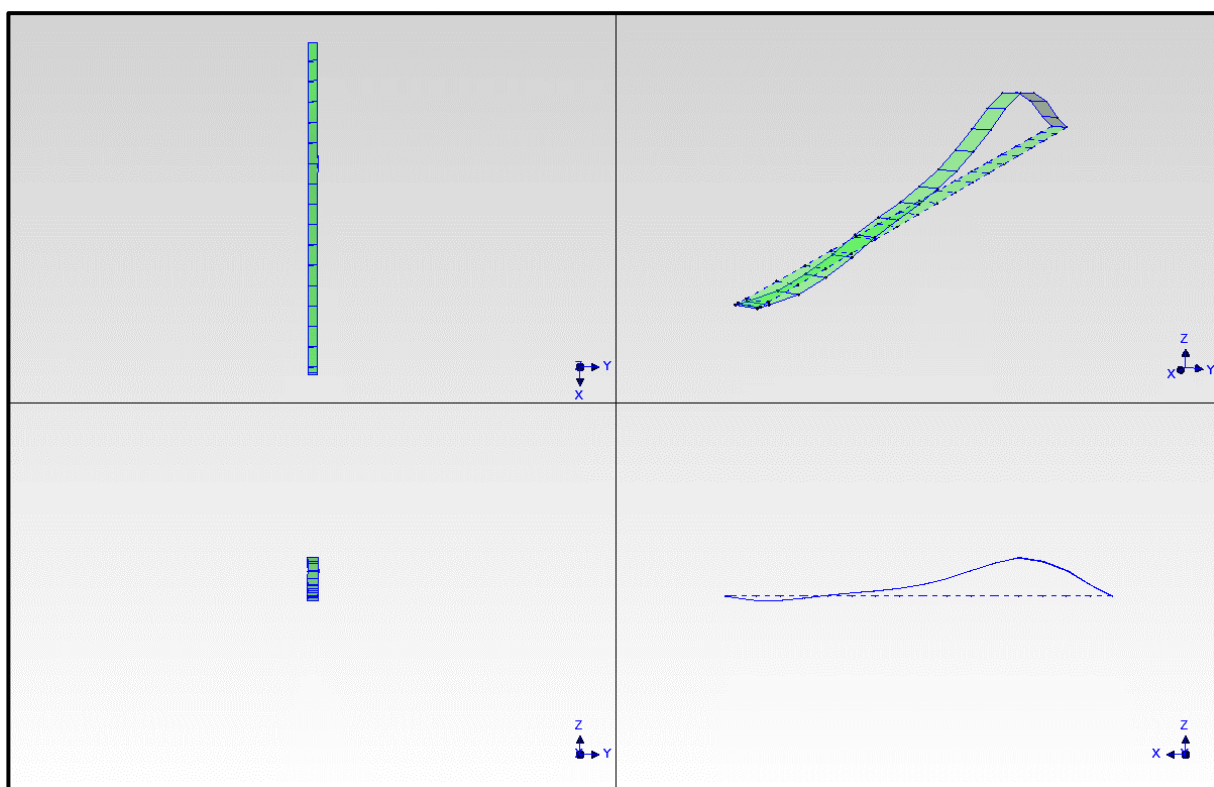
Obr. 33 „Complex Mode Indicator Function“ s vyznačenými vyhodnocenými vlastními frekvencemi

Tab. 13 Přehled vyhodnocených vlastních frekvencí a popis charakteru odpovídajících vlastních tvarů

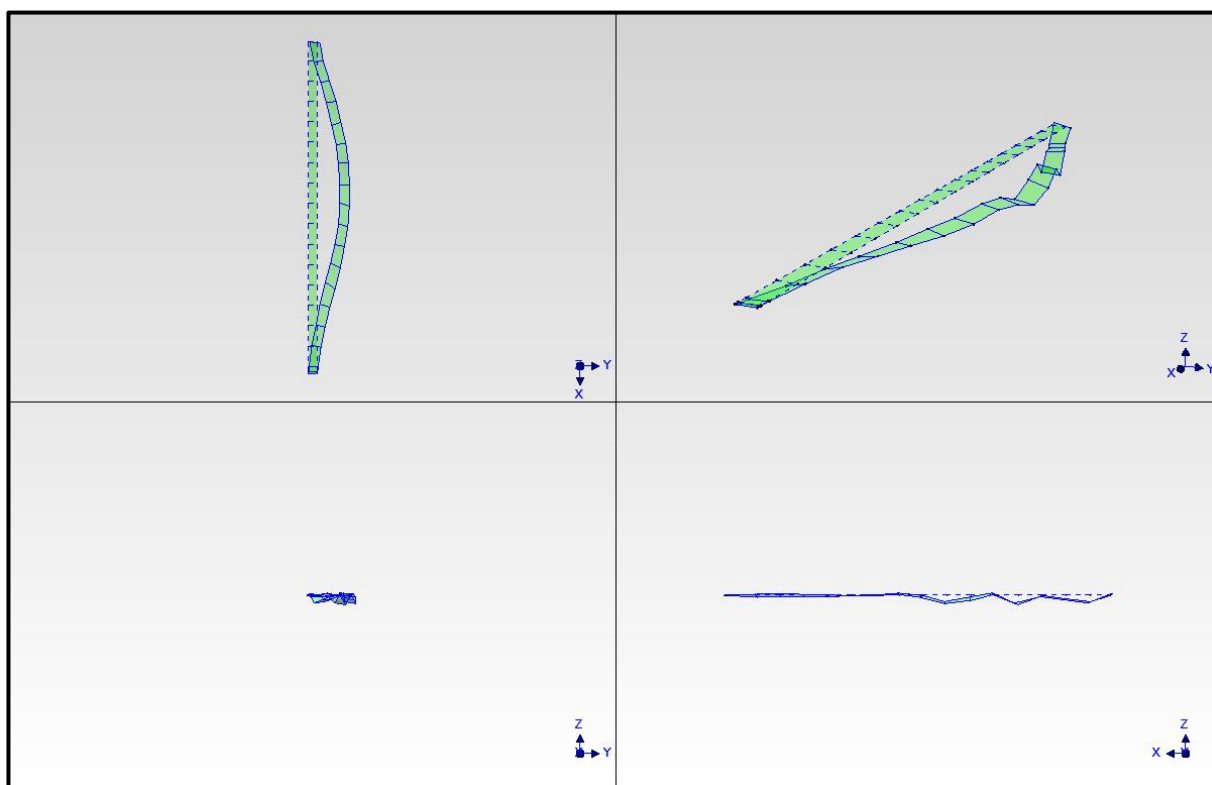
Pořadové číslo frekvence k	Vlastní frekvence $f_{(k)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru
1	0,72	Svislý ohybový
2	0,92	Vodorovný
3	1,19	Svislý ohybový
4	1,73	Svislý ohybový
5	2,11	Torzní
6	2,28	Svislý ohybový
7	2,77	Svislý ohybový
8	2,84	Vodorovný
9	2,98	Svislý ohybový
10	3,13	Svislý ohybový
11	3,41	Torzní
12	3,61	Svislý ohybový
13	4,20	Svislý ohybový
14	4,56	Torzní
15	4,89	Svislý ohybový

Na obr. 41 je vidět, že charakter vlastního tvaru spjatého s vlastní frekvencí  $f_{(8)} = 2,84$  Hz je spíše vodorovný, ale dochází ke zkreslení svislými pořadnicemi. To může být způsobeno faktem, že v blízkosti této frekvence se nacházejí další vlastní frekvence ( $f_{(7)} = 2,77$  Hz a  $f_{(9)} = 2,98$  Hz) spjaté se svislým ohybovým vlastním tvarem kmitání vodorovné nosné konstrukce a při vyhodnocení se tyto svislé ohybové tvary nepodařilo zcela ideálně oddělit.

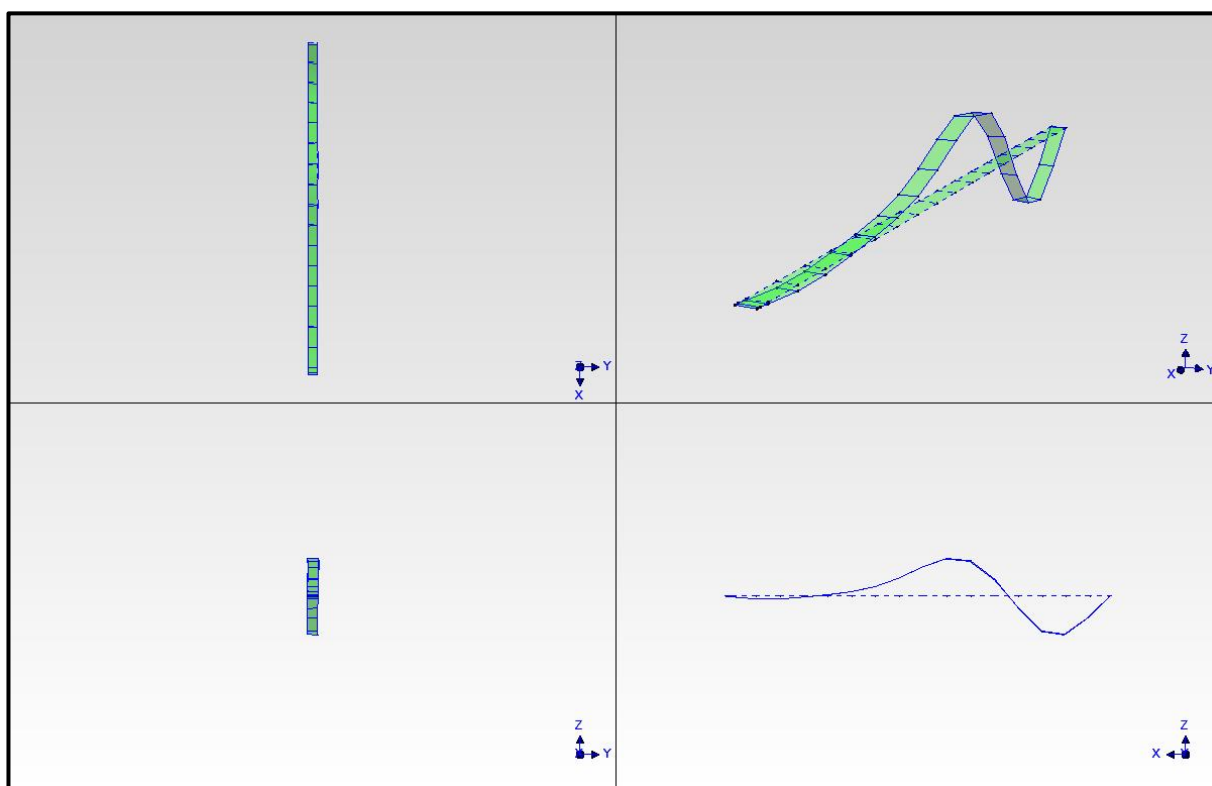
Při experimentu nebylo možné osadit snímače zrychlení na pylon, proto nebyly zachyceny vlastní tvary s dominantními pořadnicemi kmitání na pylonu.



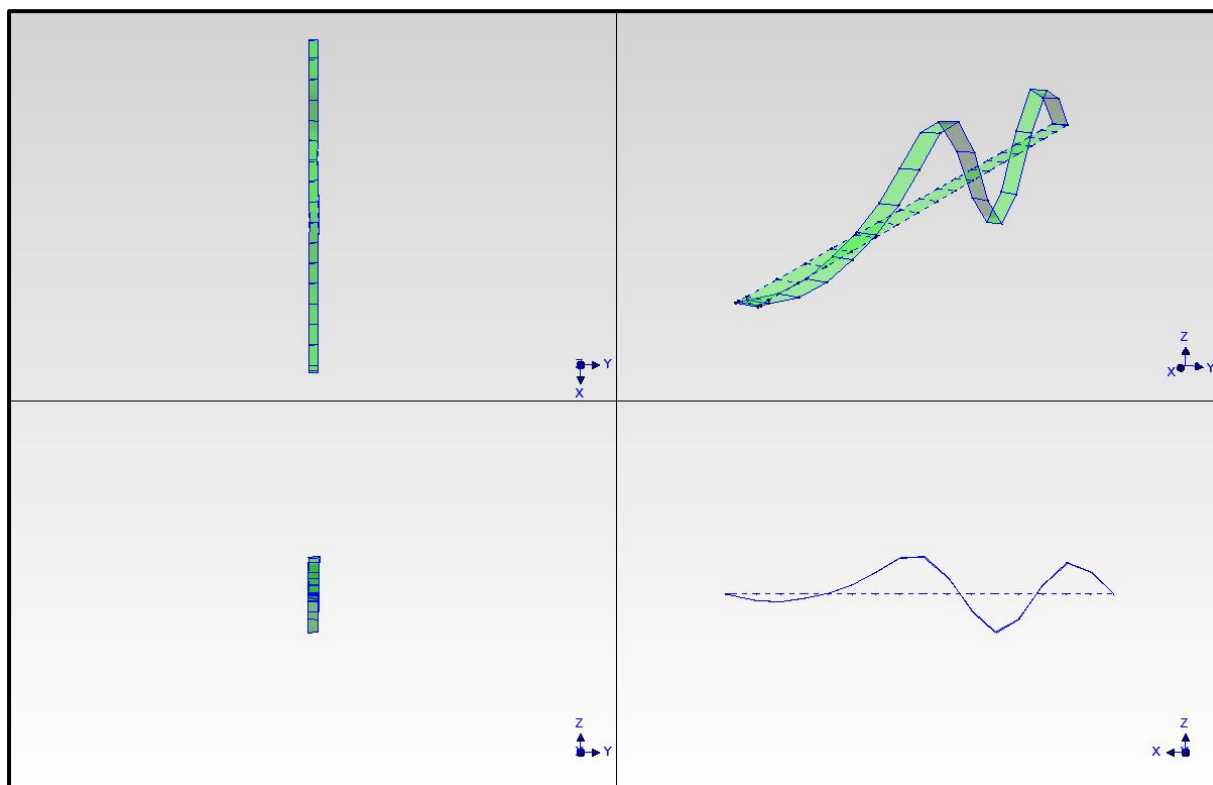
Obr. 34 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(1)} = 0,72$  Hz



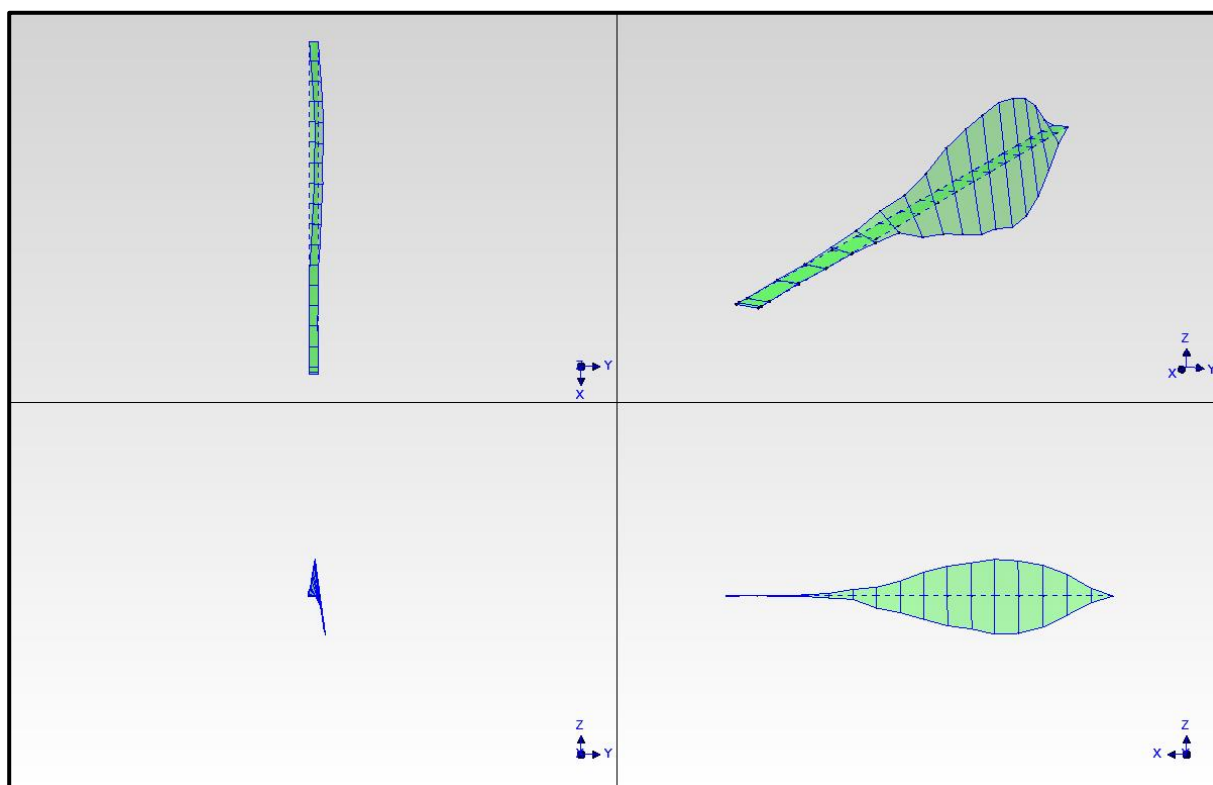
Obr. 35 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(2)} = 0,92$  Hz



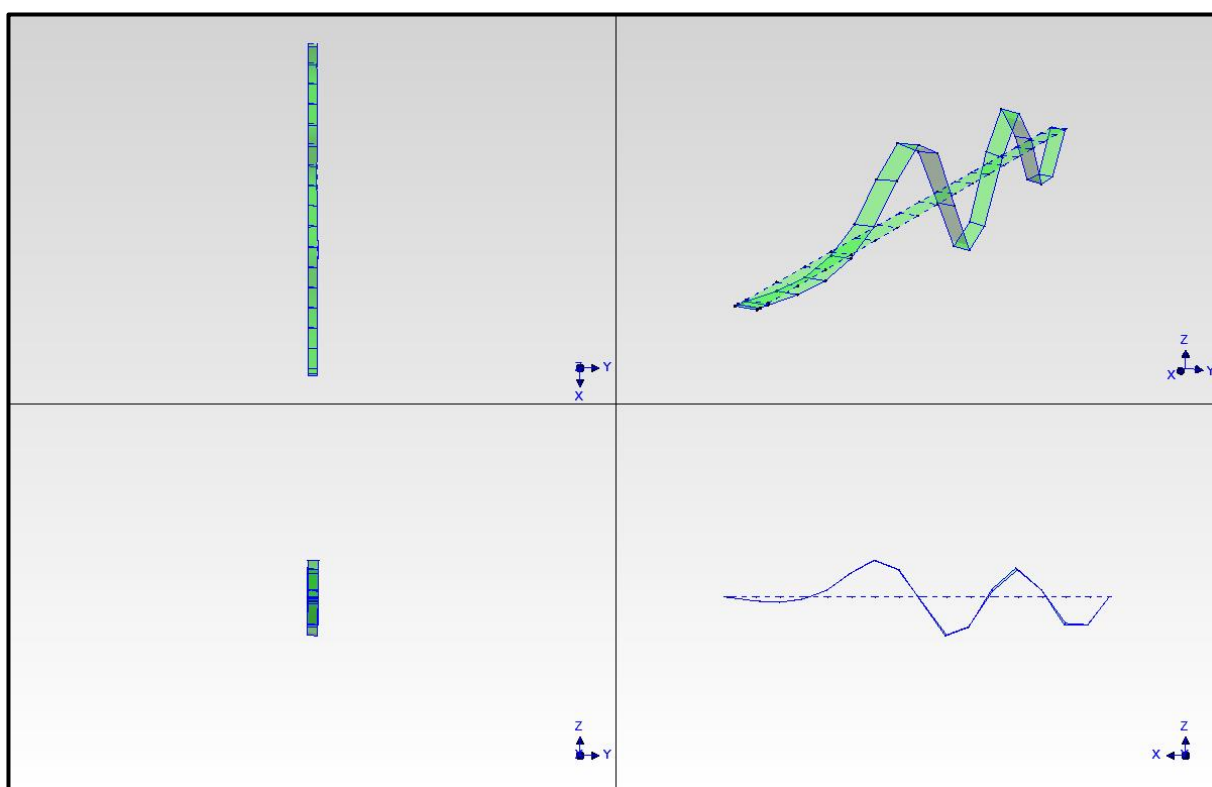
Obr. 36 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(3)} = 1,19$  Hz



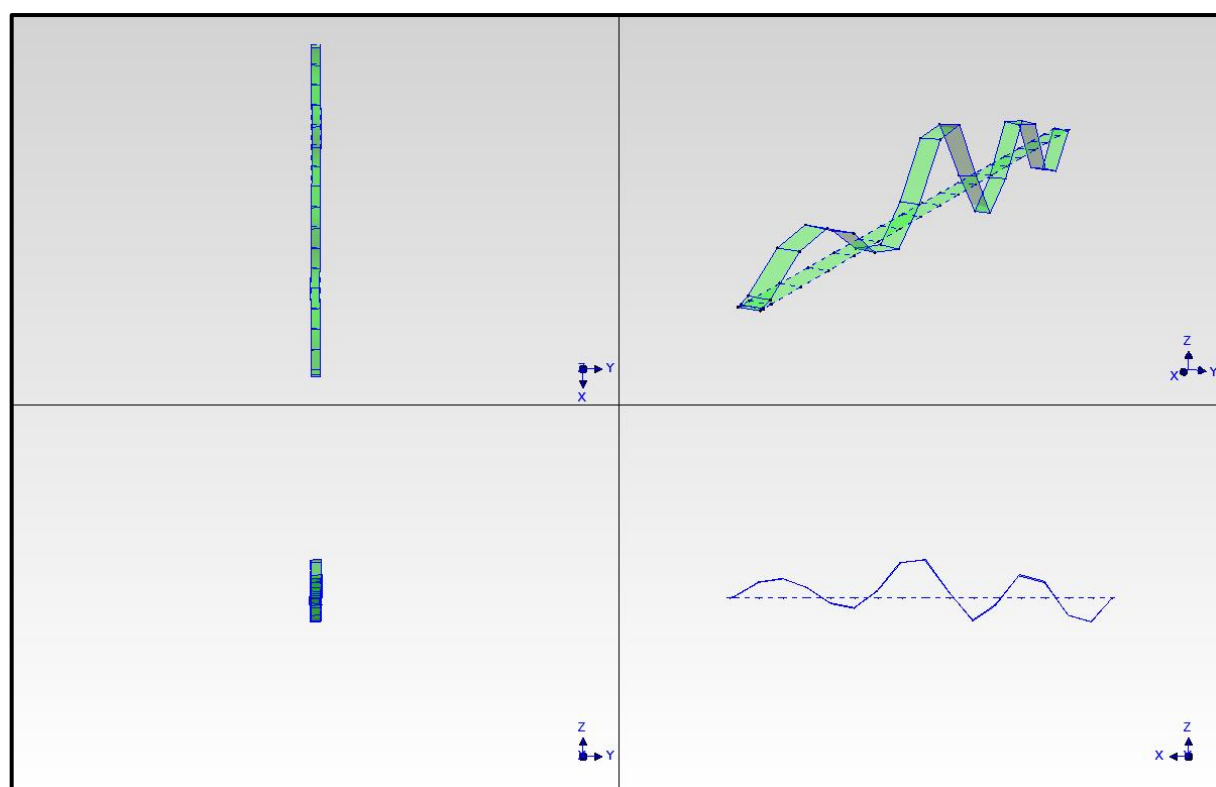
Obr. 37 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(4)} = 1,73$  Hz



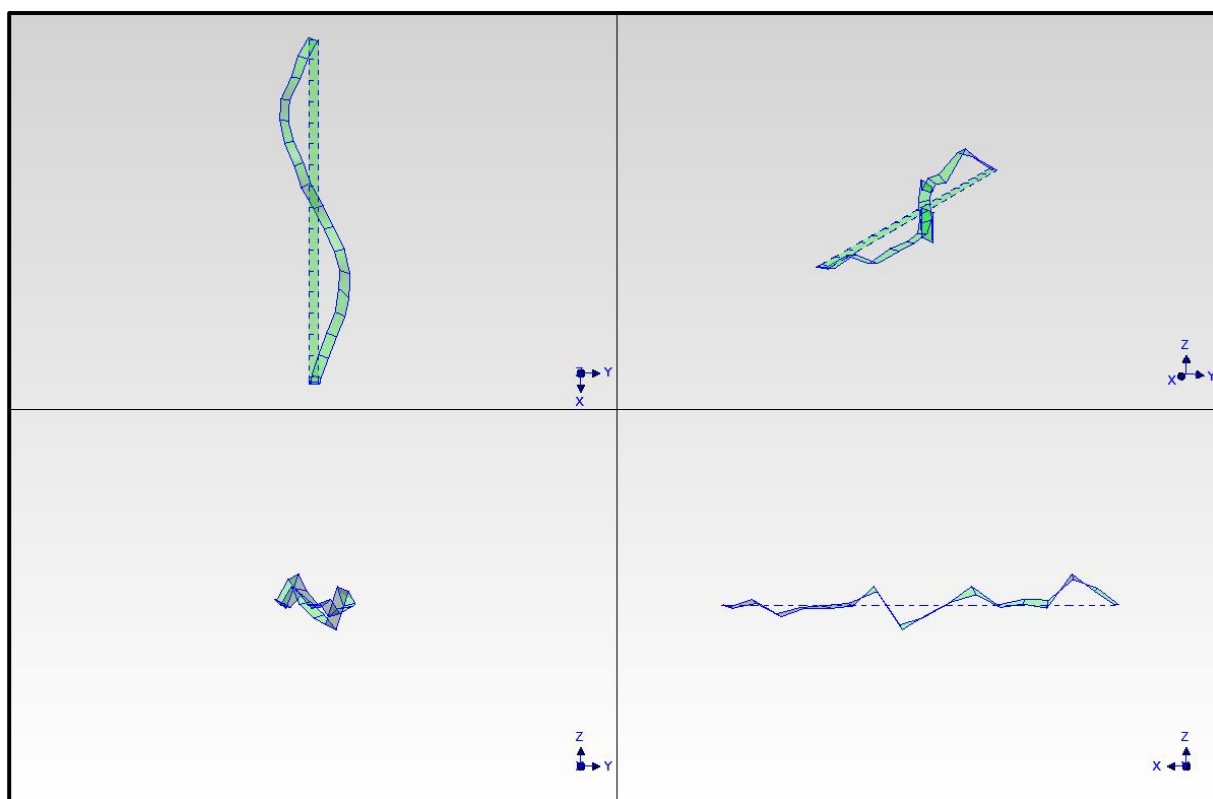
Obr. 38 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(5)} = 2,11$  Hz



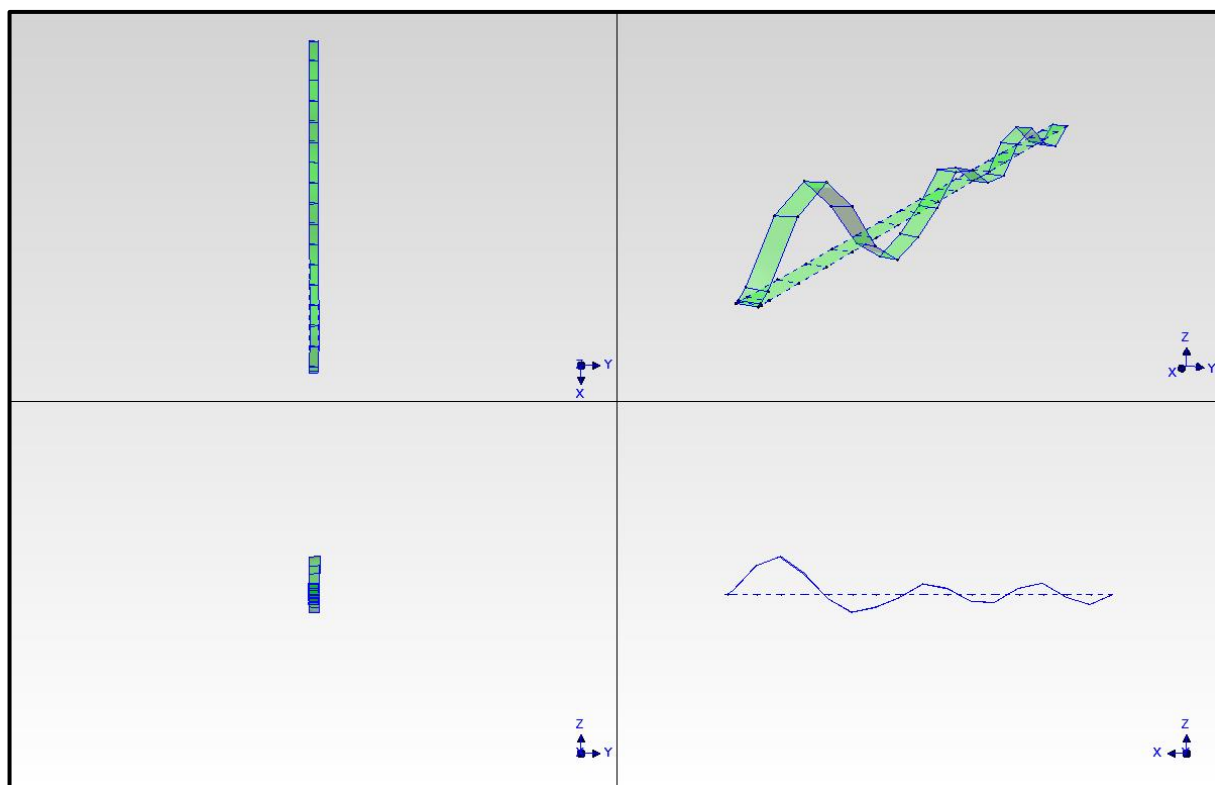
Obr. 39 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(6)} = 2,28$  Hz



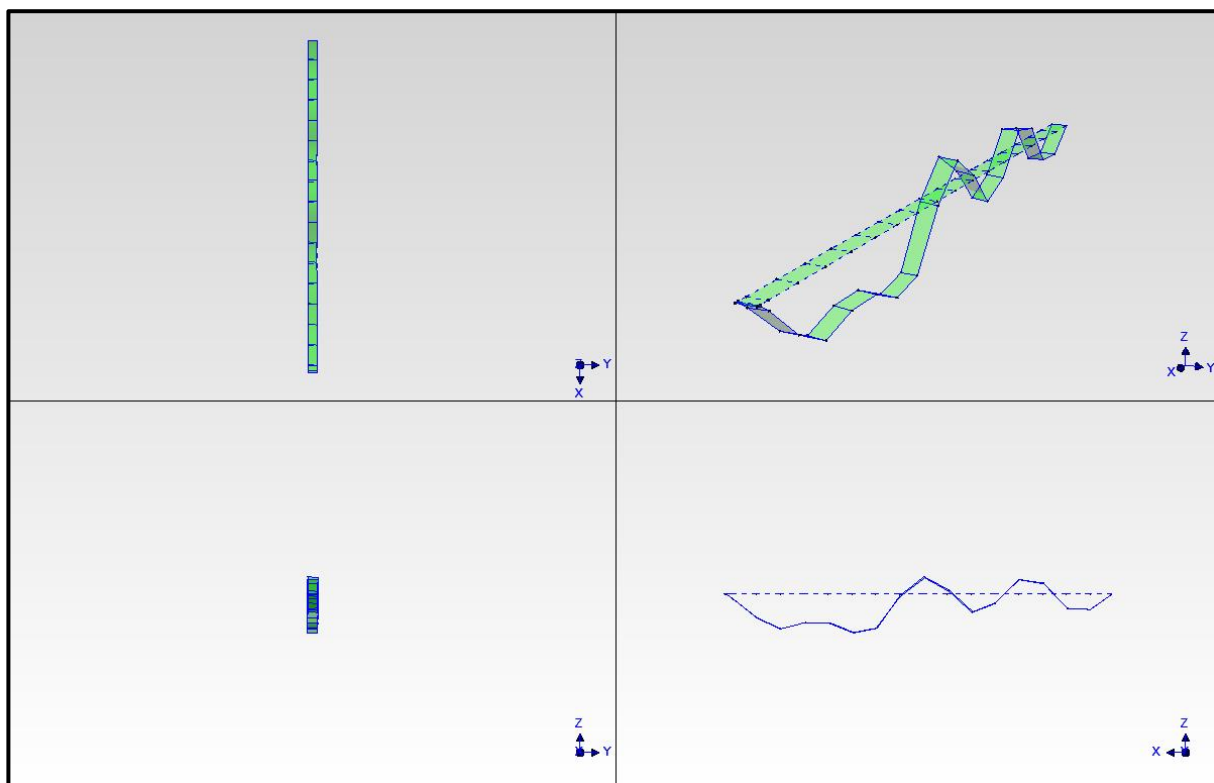
Obr. 40 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(7)} = 2,77$  Hz



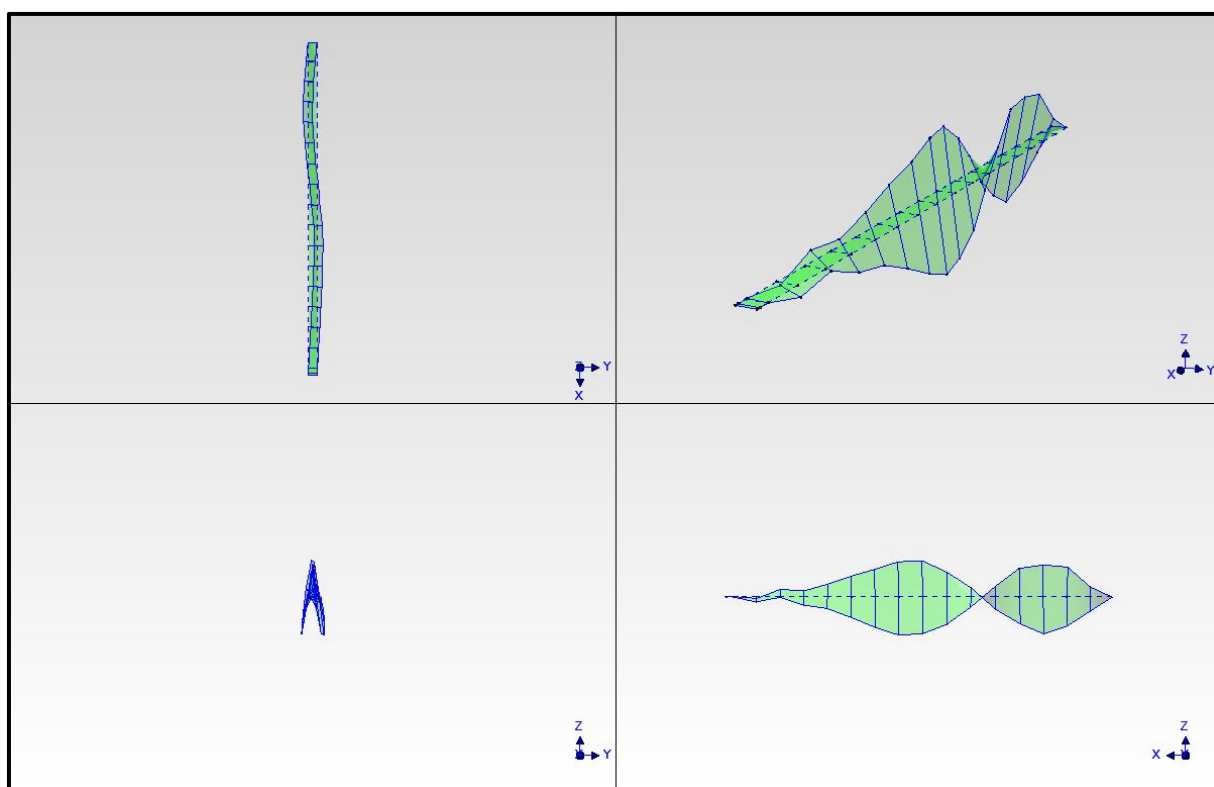
Obr. 41 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(8)} = 2,84$  Hz



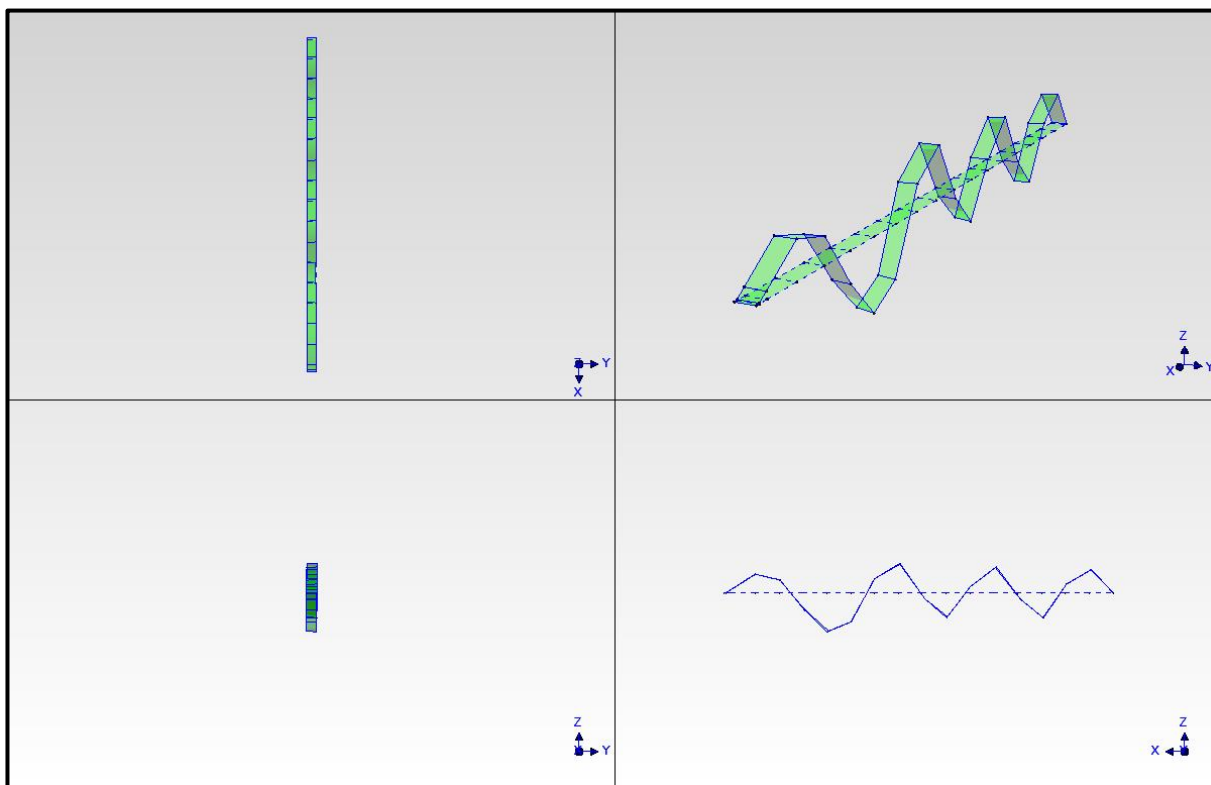
Obr. 42 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(9)} = 2,98$  Hz



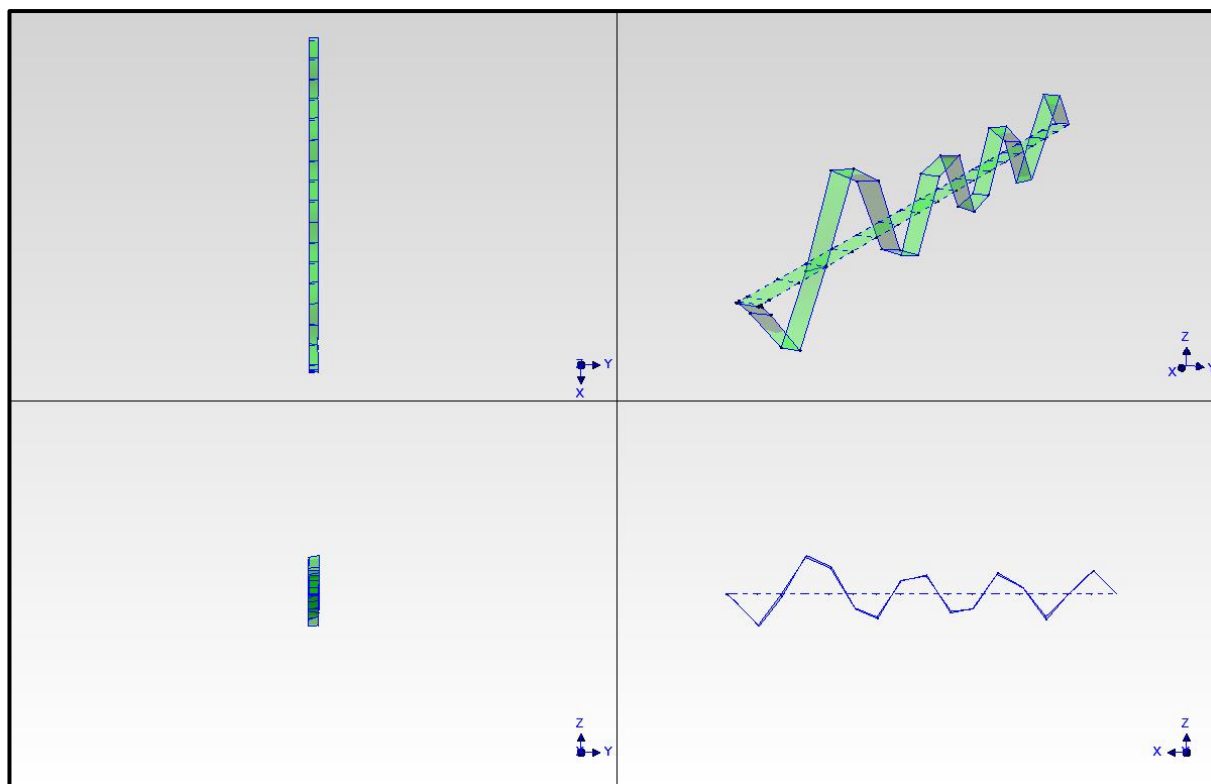
Obr. 43 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(10)} = 3,13$  Hz



Obr. 44 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(11)} = 3,41$  Hz

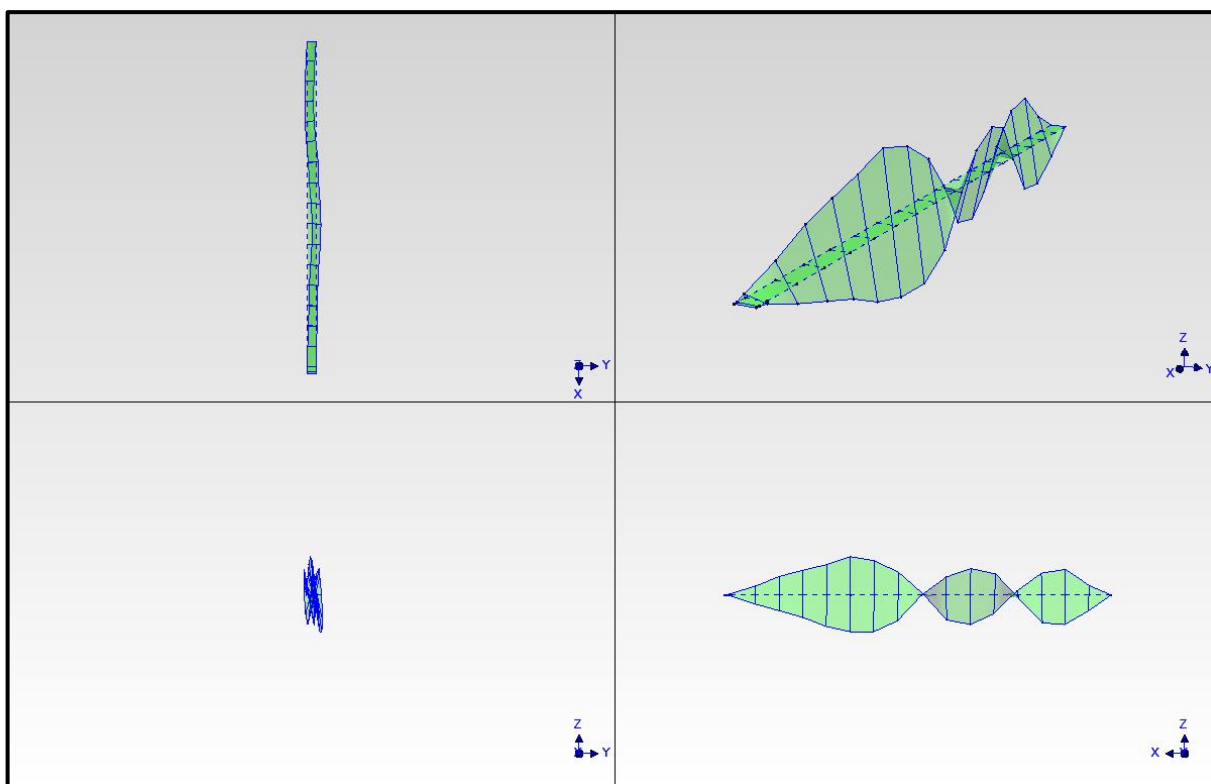


Obr. 45 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(12)} = 3,61$  Hz

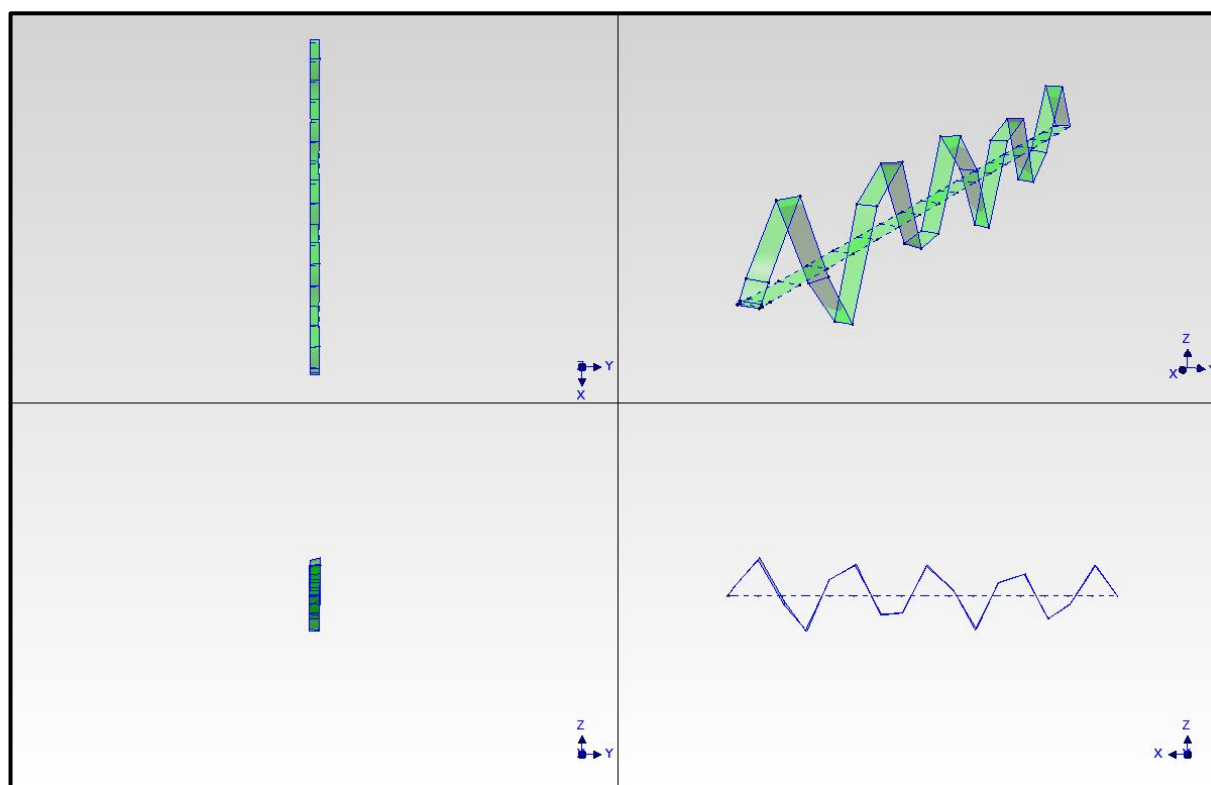


Obr. 46 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(13)} = 4,20$  Hz





Obr. 47 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(14)} = 4,56$  Hz

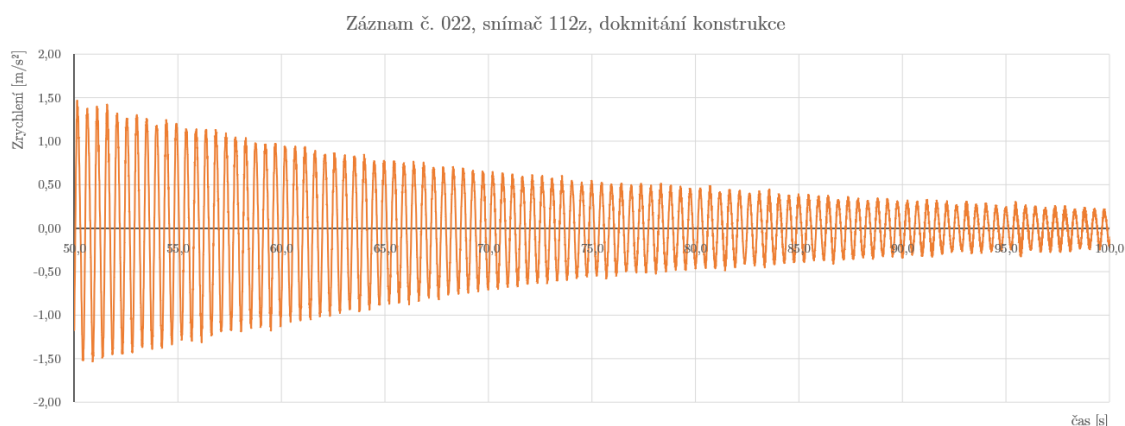


Obr. 48 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(15)} = 4,89$  Hz

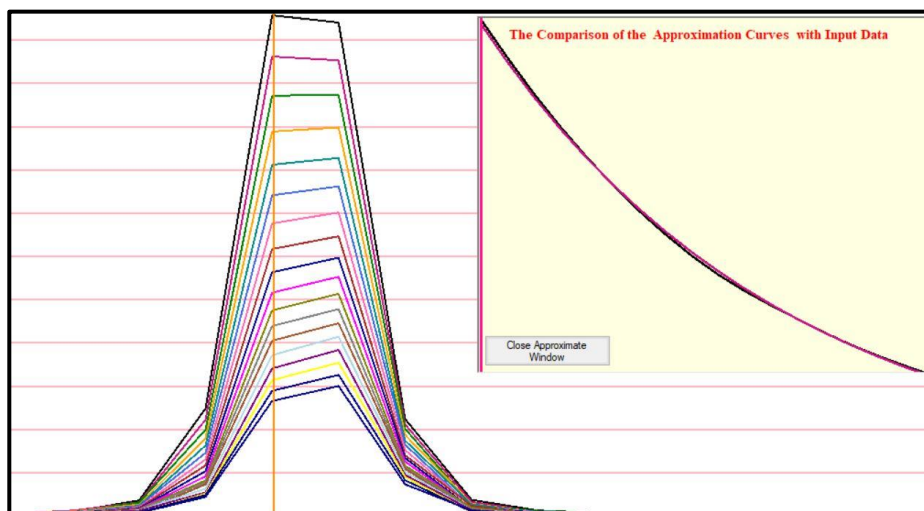
## Vyhodnocení logaritmického dekrementu útlumu

Vyhodnocení logaritmického dekrementu útlumu bylo zahrnuto do kapitoly Experimentální modální analýza (kapitola 7.4.3), ačkoliv byl pro vyhodnocení použit záznam pořízený v rámci dynamické zkoušky zatěžovací (kapitola 7.4.4), a to z důvodu, že útlum je jednou z charakteristik vlastního kmitání konstrukce. Existuje více možností, jak vyhodnotit útlum konstrukce, v této práci byla využita metoda vyhodnocení obalové křivky dokmitání konstrukce pomocí FFT Multispekter. Byl využit záznam dokmitání č. 022 (podrobný popis pořízených záznamů a zatěžovacích stavů následuje v kapitole 7.4.4.2) ze zatěžovacího stavu „4 vandalové“ (obr. 49). Záznam ze zatěžovacího stavu „vandalismus“ je pro vyhodnocení útlumu mnohdy vhodný, protože konstrukce je vybuzena do vysoké úrovně kmitání a buzení je zastaveno v jediném okamžiku.

Logaritmický dekrement útlumu spjatý s vlastní frekvencí 2,11 Hz byl vyhodnocen  $\vartheta = 0,021$ , což přibližně odpovídá poměrnému útlumu  $\xi=0,33 \%$  (s využitím vztahu (12)).



Obr. 49 Záznam č. 022, snímač 112z, dokmitání konstrukce



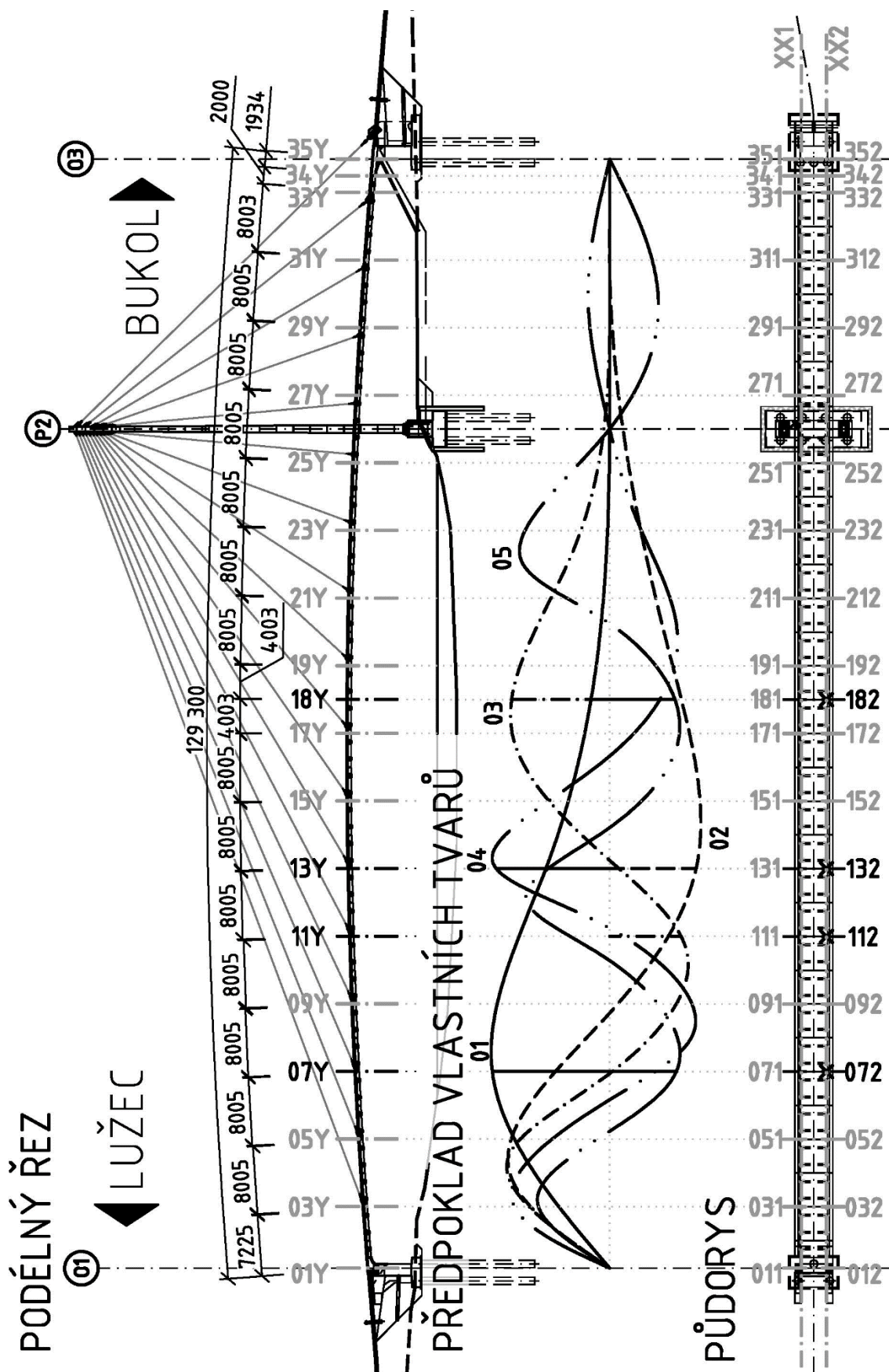
Obr. 50 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce, záznam č. 022, snímač 112z

#### **7.4.4 Dynamická zkouška zatěžovací**

Jak již bylo popsáno v kapitole 4.1.2, dynamická zkouška zatěžovací je zkouška zaměřená na vynucené kmitání a slouží ke zjištění dynamické odezvy na dynamické zatížení. V následujících kapitolách je podrobně popsáno uspořádání zkoušky, zatěžovací stavy, naměřená dynamická odezva konstrukce na dynamické zatížení způsobené chodci a její posouzení podle norem, předpisů a doporučení, které byly zahrnuty do kapitoly 4.2.

##### **7.4.4.1 Uspořádání dynamické zkoušky zatěžovací**

Při dynamické zkoušce zatěžovací byly snímače zrychlení umístěny do bodů 072, 112, 132 a 182, a to z důvodu, že právě v těchto bodech konstrukce byla očekávána největší dynamická odezva na dynamické zatížení na základě charakteru změřených vlastních tvarů konstrukce uvedených v [33]. V každém bodě byly umístěny dva snímače. Jeden ze snímačů měřil svislé vibrace (označen jako  $XXYz$ , kde  $XX$  značí číslo řezu,  $Y$  značí umístění v příčném řezu a  $z$  značí směr měřených vibrací, v tomto případě svislý směr). Druhý ze snímačů měřil vodorovné vibrace ve směru kolmém k podélné ose lávky (označen jako  $XXYy$ ). Popis zvolených bodů na konstrukci je patrný z následujícího obr. 51. Na obr. 51 jsou schematicky nakresleny mj. i průběhy svislých ohybových vlastních tvarů kmitání konstrukce včetně označení jejich největších pořadnic v místech řezů zvolených na konstrukci, ve kterých byly umístěny body sledované v průběhu dynamické zatěžovací zkoušky. Vlastní tvary kmitání konstrukce byly převzaty z [33].



Obr. 51 Uspořádání dynamické zkoušky zatěžovací (zdroj: upraveno z [32])

## 7.4.4.2 Zatěžovací stavy

Zatěžovací stavy, které byly při dynamické zkoušce zatěžovací provedeny, jsou uvedeny v následující tab. 14. Zatěžovací stavy na záznamech č. 001 až 012 byly zvoleny podle normy ČSN 73 6209 „Zatěžovací zkoušky mostních objektů“ [6] jako simulace běžného provozu na lávce. V normě [6] není stanoveno, zda mají chodci jít vedle sebe, nebo za sebou. Poloha chodců „za sebou“ je účinnější pro vybuzení torzního kmitání konstrukce, proto byla použita při popisovaném experimentu. Bylo také prověřeno kmitání lávky způsobené dvěma běžci (záznamy č. 013 až 016) Zatěžovací stav „vandalismus“ na záznamech č. 017 až 032 v normě [6] není veden mezi způsoby, kterými se zpravidla simuluje provoz na lávce, byl ale do zatěžovacích stavů zahrnut, protože záznamy pořízené při tomto zatěžovacím stavu jsou často vhodné k vyhodnocení útlumu.

Tab. 14 Seznam pořízených záznamů při dynamické zkoušce zatěžovací

Č. záznamu	Záznam	Frekvence [Hz]	Umístění - řez č.
000	Závěsy	---	---
001	Náhodné přechody chodců po lávce	---	---
002	Náhodné přechody chodců po lávce	---	---
003	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	0,97	---
004	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	0,97	---
005	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	1,73	---
006	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	1,73	---
007	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	2,11	---
008	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	2,11	---
009	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	2,11	---
010	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	2,11	---
011	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	2,28	---
012	Synchronizovaná chůze 2 chodců za sebou	2,28	---
013	Synchronizovaný běh 2 běžců za sebou	3,00	---
014	Synchronizovaný běh 2 běžců za sebou	3,00	---
015	Synchronizovaný běh 2 běžců za sebou	3,42	---
016	Synchronizovaný běh 2 běžců za sebou	3,42	---
017	4 vandalové	1,19	13
018	4 vandalové	1,19	13
019	4 vandalové	1,73	18
020	4 vandalové	1,73	18
021	4 vandalové	1,73	11
022	4 vandalové	2,11	11

Pokračování tab. 14

Č. záznamu	Záznam	Frekvence [Hz]	Umístění - řez č.
023	4 vandalové	2,11	11
024	4 vandalové	2,11	13
025	4 vandalové	2,28	13
026	4 vandalové	0,97	11
027	4 vandalové	0,97	11
028	4 vandalové	3,00	07
029	4 vandalové	3,00	07
030	4 vandalové	3,42	07
031	4 vandalové	3,42	18
032	4 vandalové	3,42	18

Dodržení přesné krokové frekvence bylo zajištěno chůzí synchronizovanou podle metronomu. Metronom udává počet úderů za minutu (bpm; beats per minute), pro převedení frekvence (počet kmitů za sekundu) na počet úderů za minutu je tedy nutné frekvenci vynásobit šedesáti. Pro vybudování vodorovného kmitání je nutné zvolit krokovou frekvenci jako dvojnásobek vlastní frekvence konstrukce svázané s vodorovným vlastním tvarem. Zatěžovací stav „vandalismus“ byl proveden pohupováním vandalů v kolenou v požadované frekvenci.

Krokové frekvence byly při jednotlivých záznamech zvoleny podle předběžného určení vlastních frekvencí konstrukce pomocí FFT analýzy, které bylo provedeno bezprostředně před dynamickou zkouškou zatěžovací. Cílem provedení předběžné FFT analýzy bylo ověření vlastních frekvencí konstrukce, které byly naměřeny a vyhodnoceny zaměstnanci ÚTAM AV ČR [33]. Některé vlastní frekvence konstrukce byly předběžně vyhodnoceny jako totožné s vlastními frekvencemi konstrukce naměřenými a vyhodnocenými zaměstnanci ÚTAM AV ČR, některé se mírně lišily, což je patrné z tab. 15. Krokové frekvence byly zvoleny podle předběžné FFT analýzy, a to z důvodu, že lépe odpovídaly aktuálním dynamickým vlastnostem lávky.

Tab. 15 Vlastní frekvence konstrukce podle předběžné FFT analýzy v porovnání s vlastními frekvencemi konstrukce naměřenými zaměstnanci ÚTAM AV ČR a charaktery vlastních tvarů kmitání konstrukce

Pořadové číslo vlastní frekvence $j$	Vlastní frekvence předběžně vyhodnocené 15. 10. 2021 $f_{(j)}$ [Hz]	Vlastní frekvence naměřené ÚTAM AV ČR 30. 9. 2020 $f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru
1	0,73	0,74	Svislý ohybový
2	0,97	0,94	Vodorovný
3	1,19	1,19	Svislý ohybový
4	1,73	1,73	Svislý ohybový
5	2,11	2,11	Torzní
6	2,28	2,23	Svislý ohybový
7	3,00	2,98	Svislý ohybový
8	3,42	3,37	Torzní
9	3,61	3,60	Svislý ohybový

#### 7.4.4.3 Vyhodnocení dynamické zkoušky zatěžovací

Naměřené záznamy byly zpracovávány v programu Dyn\_anal, který byl vytvořen na katedře mechaniky Fakulty stavební ČVUT v Praze. Byly vyhodnoceny maximální výkmity zrychlení, maximální RMS hodnoty zrychlení a logaritmický dekrement útlumu. RMS hodnoty zrychlení byly vyhodnoceny podle vzorce (9) z časového intervalu o délce 5 s. Byly vyhodnoceny vibrace ve svislém směru (XXYz, kde XX značí číslo řezu, Y značí umístění v příčném řezu) a ve vodorovném směru kolmo k podélné ose lávky (XXYy). V následující tab. 16 jsou uvedeny vyhodnocené maximální hodnoty výkmitů zrychlení. V tab. 17 jsou uvedeny vyhodnocené maximální RMS hodnoty zrychlení.

Tab. 16 Vyhodnocené maximální hodnoty výkmitů zrychlení naměřené ve sledovaných bodech mostovky

Záznam č.	Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení naměřené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
001	0,034	-0,218	0,039	0,249	0,034	0,270	-0,030	0,266
002	0,026	-0,137	0,032	-0,164	0,031	-0,150	0,025	-0,192
003	0,023	-0,110	-0,027	0,128	-0,026	0,115	-0,021	0,125
004	0,035	-0,148	-0,031	0,145	-0,032	0,159	-0,028	-0,140
005	-0,081	0,451	0,063	-0,432	0,058	0,296	0,052	0,447
006	-0,025	0,188	-0,019	0,210	-0,019	0,160	-0,024	0,217
007	-0,069	-0,425	-0,090	-0,475	-0,082	0,521	-0,068	-0,295
008	-0,079	0,492	-0,092	-0,517	-0,090	-0,523	0,075	-0,333
009	-0,065	-0,410	0,083	-0,469	0,077	-0,520	-0,057	0,294
010	-0,094	-0,602	<b>-0,124</b>	0,634	-0,115	<b>-0,688</b>	0,081	-0,456
011	0,055	0,246	0,061	-0,224	-0,063	-0,318	-0,032	-0,224
012	-0,056	0,323	0,055	-0,267	-0,055	-0,397	0,047	0,353
013	0,141	0,698	-0,125	-0,701	-0,122	-0,762	0,094	0,566
014	0,136	0,435	-0,142	0,435	0,146	0,412	0,072	-0,418
015	-0,192	0,796	-0,182	-0,791	-0,140	0,478	-0,172	0,918
016	-0,084	-0,579	-0,078	-0,361	-0,061	0,333	0,094	-0,587
017	-0,032	-0,312	-0,027	-0,216	0,022	0,396	0,032	-0,251
018	-0,093	-0,451	0,077	0,375	0,088	-0,586	0,055	-0,423
019	0,235	0,659	0,194	-0,710	-0,161	-0,609	0,122	0,926
020	-0,105	0,603	-0,119	-0,690	0,114	-0,508	0,101	0,786
021	-0,094	0,480	-0,099	-0,666	0,091	-0,443	-0,067	-0,645
022	-0,212	1,383	<b>0,283</b>	-1,546	-0,258	<b>1,568</b>	-0,158	-0,921
023	0,214	1,353	-0,281	-1,542	-0,250	1,483	0,160	-0,956
024	0,160	-0,962	-0,217	1,138	0,190	1,208	-0,127	0,712
025	0,114	-0,716	-0,109	0,634	0,092	0,913	-0,094	-0,654
026	-0,073	0,202	-0,086	0,218	0,085	-0,189	0,067	0,116
027	-0,070	0,380	-0,090	-0,236	-0,088	-0,209	0,067	0,188
028	-0,059	0,663	-0,044	0,457	0,047	0,469	-0,043	-0,403
029	-0,083	0,639	-0,073	0,502	0,064	0,541	-0,052	-0,420
030	-0,120	-1,072	0,105	-0,472	-0,051	-0,356	-0,180	1,117
031	-0,124	1,151	-0,109	-0,435	0,075	0,555	0,167	-1,005
032	0,145	-1,073	-0,119	-0,513	-0,093	0,559	-0,181	1,110

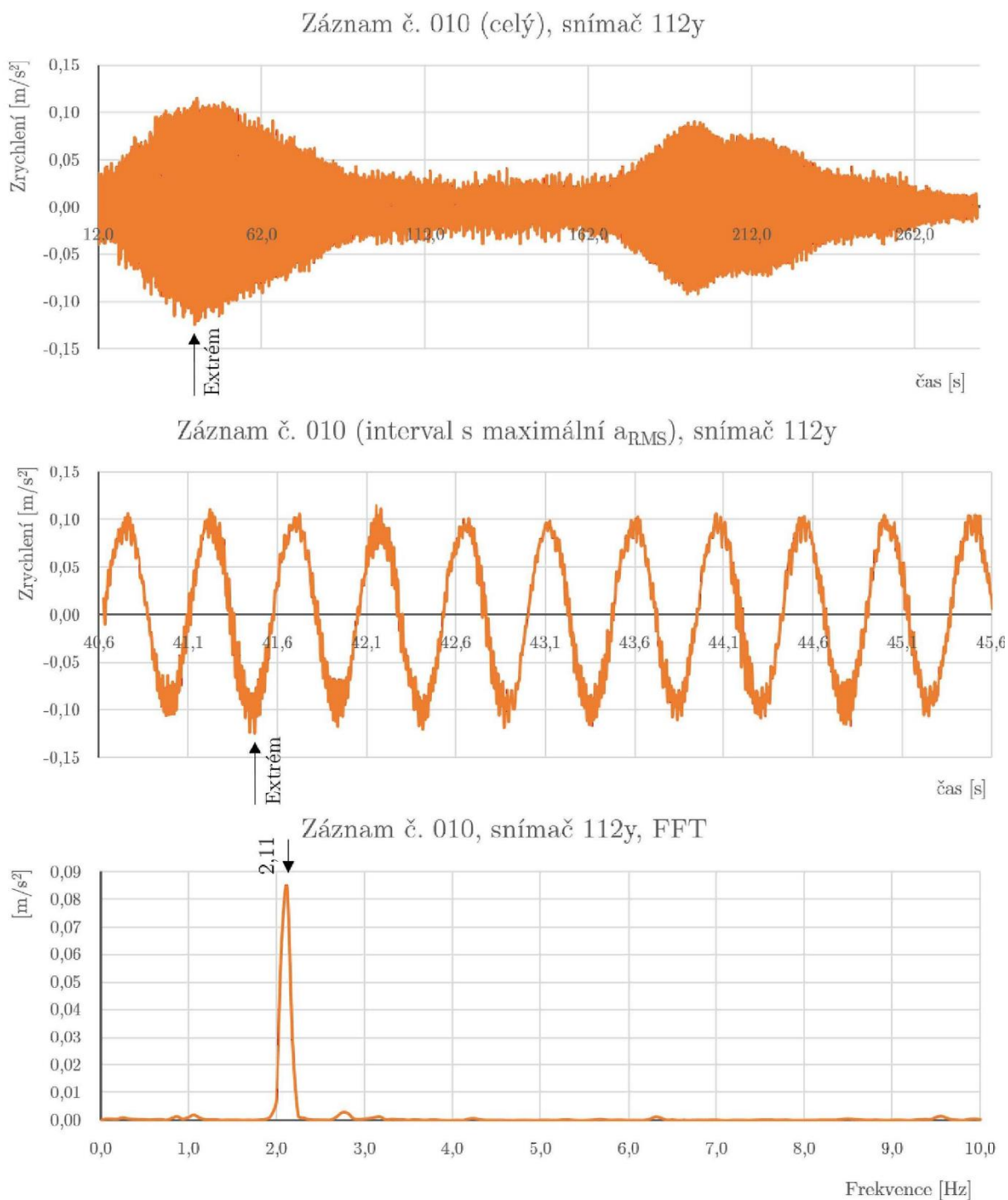


Tab. 17 Vyhodnocené maximální RMS hodnoty zrychlení v jednotlivých sledovaných bodech mostovky

Záznam č.	RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
001	0,014	0,094	0,017	0,104	0,016	0,104	0,012	0,123
002	0,010	0,048	0,012	0,061	0,012	0,052	0,011	0,064
003	0,009	0,035	0,010	0,041	0,010	0,042	0,009	0,040
004	0,010	0,043	0,010	0,049	0,010	0,052	0,010	0,049
005	0,024	0,140	0,022	0,144	0,018	0,113	0,018	0,142
006	0,007	0,046	0,007	0,100	0,008	0,054	0,008	0,104
007	0,037	0,237	0,054	0,292	0,050	0,293	0,032	0,145
008	0,034	0,213	0,048	0,267	0,045	0,271	0,031	0,132
009	0,036	0,235	0,054	0,295	0,049	0,298	0,031	0,146
010	0,048	0,303	<b>0,069</b>	0,360	0,063	<b>0,376</b>	0,039	0,192
011	0,017	0,073	0,021	0,068	0,020	0,149	0,009	0,078
012	0,017	0,108	0,015	0,088	0,018	0,177	0,012	0,100
013	0,048	0,327	0,039	0,256	0,034	0,260	0,027	0,216
014	0,046	0,198	0,044	0,154	0,036	0,154	0,026	0,151
015	0,059	0,371	0,055	0,246	0,042	0,168	0,069	0,397
016	0,035	0,264	0,031	0,142	0,020	0,107	0,050	0,301
017	0,009	0,145	0,009	0,103	0,008	0,186	0,007	0,117
018	0,029	0,197	0,027	0,152	0,027	0,250	0,019	0,158
019	0,073	0,304	0,062	0,231	0,055	0,171	0,048	0,376
020	0,029	0,218	0,038	0,228	0,036	0,146	0,031	0,288
021	0,028	0,150	0,029	0,247	0,026	0,152	0,021	0,229
022	0,133	0,821	<b>0,188</b>	<b>0,994</b>	0,168	0,969	0,097	0,522
023	0,127	0,782	0,179	0,943	0,161	0,927	0,093	0,498
024	0,082	0,492	0,115	0,580	0,103	0,660	0,059	0,304
025	0,029	0,245	0,029	0,196	0,029	0,419	0,033	0,245
026	0,027	0,070	0,037	0,094	0,041	0,080	0,041	0,040
027	0,025	0,110	0,034	0,088	0,037	0,074	0,037	0,052
028	0,024	0,327	0,016	0,206	0,013	0,243	0,014	0,173
029	0,028	0,296	0,025	0,191	0,020	0,222	0,018	0,167
030	0,070	0,662	0,061	0,202	0,019	0,145	0,115	0,731
031	0,061	0,650	0,053	0,176	0,020	0,223	0,102	0,593
032	0,066	0,675	0,056	0,202	0,029	0,233	0,109	0,634

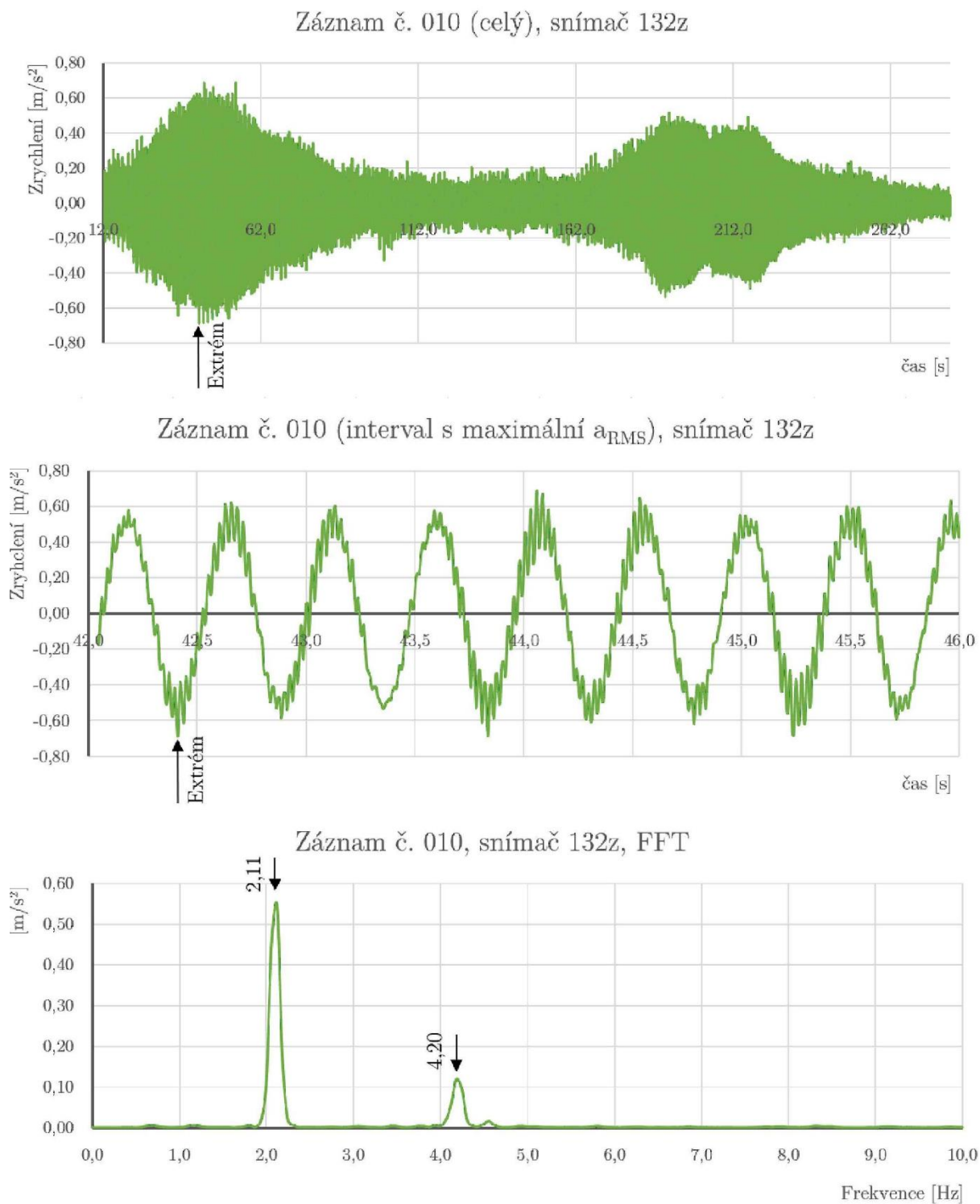
Ze záznamů č. 001 až 012, které lze podle článku 8.3.6 normy [6] považovat za „běžný provoz“, byl naměřen maximální výkmit zrychlení na záznamu č. 010, a to jak ve svislém směru (na snímači 132z;  $0,688 \text{ m/s}^2$ ), tak i ve vodorovném směru (na snímači 112y;  $0,124 \text{ m/s}^2$ ). Maximální RMS hodnota zrychlení byla vyhodnocena ve shodném záznamu (č. 010) na shodných snímačích (112y a 132z), a to v takovém časovém intervalu, kde byl zároveň naměřen extrém výkmitu zrychlení. Maximální RMS hodnota ve svislém směru byla vyhodnocena jako  $0,376 \text{ m/s}^2$  a ve vodorovném směru  $0,069 \text{ m/s}^2$ . Ze záznamu kmitání č. 010 v měřítku zrychlení v čase byl pomocí druhé integrace s využitím Simpsonova pravidla vyhodnocen průběh kmitání v měřítku výchylky v čase. Maximální výkmit výchylky ve svislém směru byl vyhodnocen na snímači 072z jako  $3,6 \text{ mm}$ , což odpovídá teoretickému rozkmitu výchylky  $7,2 \text{ mm}$ . Maximální výkmit výchylky ve vodorovném směru byl vyhodnocen na snímači 112y jako  $1,4 \text{ mm}$ , což odpovídá teoretickému rozkmitu výchylky  $2,8 \text{ mm}$ .

Ze záznamů č. 013 až 032, které nelze podle článku 8.3.6 normy [6] považovat za „běžný provoz“, byl naměřen maximální výkmit zrychlení na záznamu č. 022, a to jak ve svislém směru (na snímači 132z;  $1,568 \text{ m/s}^2$ ), tak i ve vodorovném směru (na snímači 112y;  $0,283 \text{ m/s}^2$ ). Maximální RMS hodnota zrychlení byla vyhodnocena ve shodném záznamu (č. 022) na snímačích 112y a 112z, a to v takovém časovém intervalu, kde byl zároveň naměřen extrém výkmitu zrychlení. Maximální RMS hodnota ve svislém směru byla vyhodnocena jako  $0,994 \text{ m/s}^2$  (na snímači 112y) a ve vodorovném směru  $0,188 \text{ m/s}^2$  (na snímači 112z). Maximální RMS hodnota zrychlení na záznamu č. 022 na snímači 132z (tam, kde byl naměřen maximální výkmit zrychlení) byla vyhodnocena jako  $0,969 \text{ m/s}^2$ . Ze záznamu kmitání č. 022 v měřítku zrychlení v čase byl pomocí druhé integrace s využitím Simpsonova pravidla vyhodnocen průběh kmitání v měřítku výchylky v čase. Maximální výkmit výchylky ve svislém směru byl vyhodnocen na snímači 112z jako  $8,4 \text{ mm}$ , což odpovídá teoretickému rozkmitu výchylky  $16,8 \text{ mm}$ . Maximální výkmit výchylky ve vodorovném směru byl vyhodnocen na snímači 112y jako  $2,5 \text{ mm}$ , což odpovídá teoretickému rozkmitu výchylky  $5,0 \text{ mm}$ .



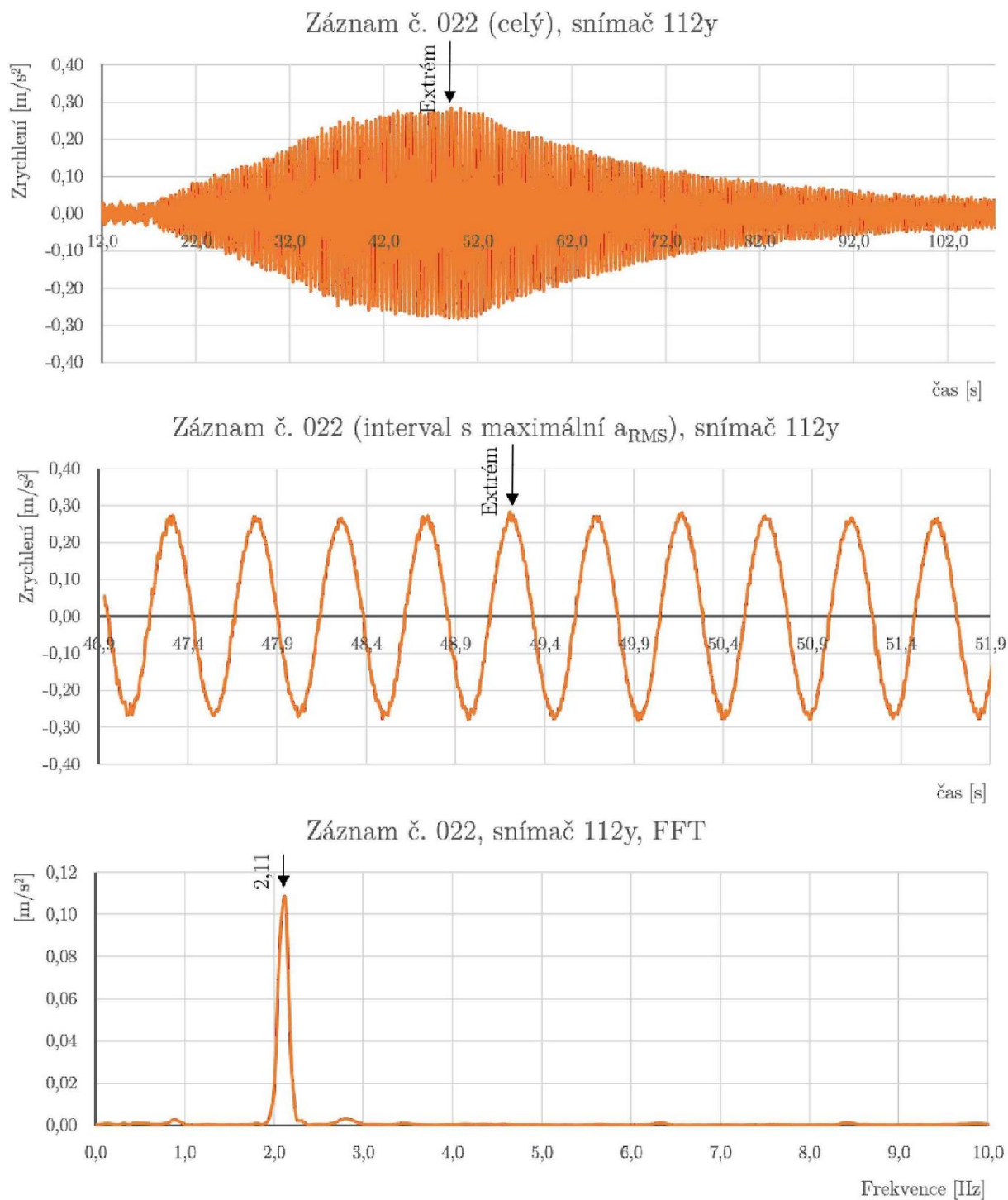
Obr. 52 Záznam č. 010, snímač 112y

*Nahoře: celý záznam,  
uprostřed: interval, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení,  
dole: záznam č. 010 ve frekvenční oblasti*



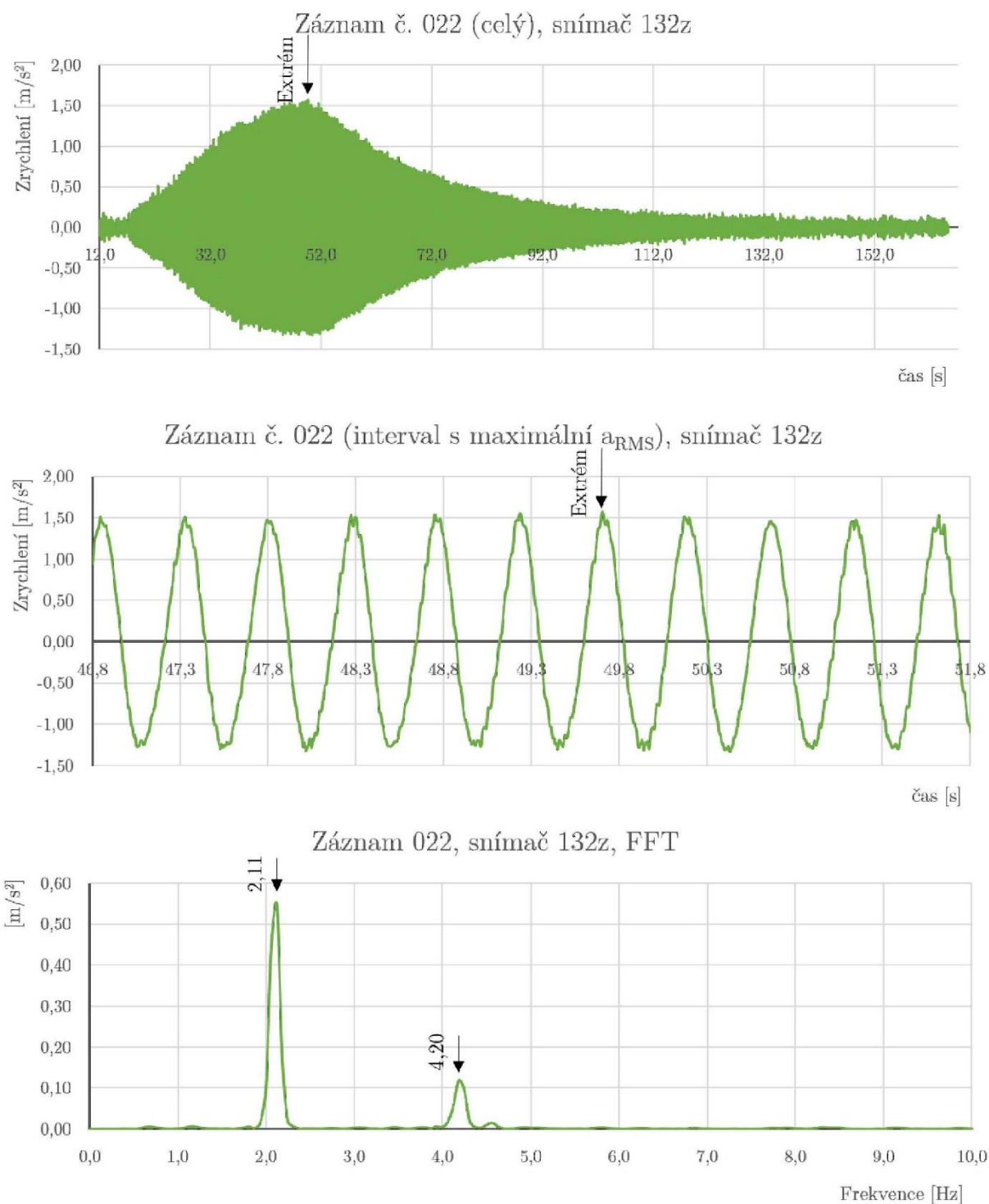
Obr. 53 Záznam č. 010, snímač 132z

*Nahoře:* celý záznam,  
*uprostřed:* interval, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení,  
*dole:* záznam č. 010 ve frekvenční oblasti



Obr. 54 Záznam č. 022, snímač 112y

*Nahoře:* celý záznam,  
*uprostřed:* interval, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení,  
*dole:* záznam č. 010 ve frekvenční oblasti



Obr. 55 Záznam č. 022, snímač 132z

*Nahoře:* celý záznam,  
*uprostřed:* interval, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení,  
*dole:* záznam č. 010 ve frekvenční oblasti

#### 7.4.4.4 Posouzení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení způsobené chodci

Posouzení dynamické odezvy na dynamické zatížení chodci bylo provedeno podle norem, předpisů a doporučení, které byly podrobně popsány v této práci v kapitole 4.2. Posouzení se pro jednotlivé normy, předpisy a doporučení liší, v každém z dokumentů jsou stanovena jiná kritéria pro komfort chodců. Kritériem jsou špičkové hodnoty zrychlení nebo vážené RMS hodnoty zrychlení. Některé normy, předpisy a doporučení míří na navrhování konstrukcí, a to konkrétně [1], [11], [13] a národní aplikační dokument normy [12]. Přesto budou zmíněné normy, předpisy a doporučení do posouzení zahrnuty, a to ze studijních důvodů.

##### Posouzení podle ČSN 73 6209 „Zatěžovací zkoušky mostních objektů“ [6]

Norma [6] stanovuje jako kritérium použitelnosti z hlediska účinků vibrací na lidský organismus váženou RMS hodnotu zrychlení (stanovenou nezávisle pro svislý a vodorovný směr) s použitím váhové funkce  $W_m$ , která je definována v [34]. RMS hodnoty zrychlení uvedené v tab. 20 byly stanoveny podle vzorce (9) a nejsou vážené. Hodnoty váhové funkce  $W_m$  jsou vždy menší než 1. Pokud tedy nevážené RMS hodnoty zrychlení vyhoví bez použití váhové funkce  $W_m$ , jednoznačně by vyhověly i s jejím použitím. V normě [6] je ohledně časového intervalu pro výpočet RMS hodnoty zrychlení odkaz na [13], kde je doporučen časový interval 1 s. V této diplomové práci byl použit časový interval 5 s.

Mezní hodnoty přípustných vážených RMS hodnot zrychlení ve svislém a vodorovném směru uvedené v tab. 1 musí být podle [6] splněny při běžném provozu, nevztahují se tedy na záznamy č. 013 až 032. U záznamů č. 013 až 016 se jedná o zatěžovací stav „synchronizovaný běh 2 běžců za sebou“, což podle [6] není „běžný provoz“. U záznamů č. 017 až 032 se jedná o zatěžovací stav „4 vandalové“, což podle [6] také není „běžný provoz“, nýbrž „vandalismus“.

Zhodnocení výsledků je rozděleno do dvou tabulek, v tab. 18 je shrnutí posouzených hodnot, které lze podle článku 8.3.6 normy [6] považovat za „běžný provoz“, tedy výsledky vyhodnocené ze záznamů č. 001 až 012. V tab. 19 je pak shrnutí posouzených hodnot, kam jsou zahrnuty výsledky ze všech záznamů, tedy i z těch, které podle článku 8.3.6 normy [6] nelze považovat za „běžný provoz“. V tab. 20 jsou všechny RMS hodnoty zrychlení posouzené podle příslušných kritérií.

Tab. 18 Shrnutí posouzených RMS hodnot zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžný provoz“, podle [6]

Kritérium $a_{w,RMS}$ [m/s <sup>2</sup> ]	Druh kmitání	% vyhovujících hodnot	% nevyhovujících hodnot
$a_{w,RMS} < 0,50$	Svislá kmitání	100,00 %	0,00 %
$a_{w,RMS} < 0,14$	Vodorovná kmitání od běžné dopravy	100,00 %	0,00 %
$0,14 \leq a_{w,RMS} < 0,28$	Vodorovné vibrace od výjimečného zatížení davem lidí	100,00 %	0,00 % *)

\*) Jako nevyhovující vážená RMS hodnota zrychlení se zde rozumí  $a_{w,RMS} \geq 0,28$  m/s<sup>2</sup>.

Tab. 19 Shrnutí posouzených RMS hodnot zrychlení ze všech záznamů podle [6]

Kritérium $a_{w,RMS}$ [m/s <sup>2</sup> ]	Druh kmitání	% vyhovujících hodnot	% nevyhovujících hodnot
$a_{w,RMS} < 0,50$	Svislá kmitání	87,50 %	12,50 %
$a_{w,RMS} < 0,14$	Vodorovná kmitání od běžné dopravy	94,53 %	5,47 %
$0,14 \leq a_{w,RMS} < 0,28$	Vodorovné vibrace od výjimečného zatížení davem lidí	5,47 %	0,00 % *)

\*) Jako nevyhovující vážená RMS hodnota zrychlení se zde rozumí  $a_{w,RMS} \geq 0,28$  m/s<sup>2</sup>.

Tab. 20 RMS hodnoty zrychlení posouzené podle [6]

Záznam č.	RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
001	0,014	0,094	0,017	0,104	0,016	0,104	0,012	0,123
002	0,010	0,048	0,012	0,061	0,012	0,052	0,011	0,064
003	0,009	0,035	0,010	0,041	0,010	0,042	0,009	0,040
004	0,010	0,043	0,010	0,049	0,010	0,052	0,010	0,049
005	0,024	0,140	0,022	0,144	0,018	0,113	0,018	0,142
006	0,007	0,046	0,007	0,100	0,008	0,054	0,008	0,104
007	0,037	0,237	0,054	0,292	0,050	0,293	0,032	0,145
008	0,034	0,213	0,048	0,267	0,045	0,271	0,031	0,132
009	0,036	0,235	0,054	0,295	0,049	0,298	0,031	0,146
010	0,048	0,303	0,069	0,360	0,063	0,376	0,039	0,192
011	0,017	0,073	0,021	0,068	0,020	0,149	0,009	0,078
012	0,017	0,108	0,015	0,088	0,018	0,177	0,012	0,100
013	0,048	0,327	0,039	0,256	0,034	0,260	0,027	0,216
014	0,046	0,198	0,044	0,154	0,036	0,154	0,026	0,151
015	0,059	0,371	0,055	0,246	0,042	0,168	0,069	0,397
016	0,035	0,264	0,031	0,142	0,020	0,107	0,050	0,301
017	0,009	0,145	0,009	0,103	0,008	0,186	0,007	0,117



Pokračování tab. 20

Záznam č.	RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
018	0,029	0,197	0,027	0,152	0,027	0,250	0,019	0,158
019	0,073	0,304	0,062	0,231	0,055	0,171	0,048	0,376
020	0,029	0,218	0,038	0,228	0,036	0,146	0,031	0,288
021	0,028	0,150	0,029	0,247	0,026	0,152	0,021	0,229
022	0,133	0,821	0,188	0,994	0,168	0,969	0,097	0,522
023	0,127	0,782	0,179	0,943	0,161	0,927	0,093	0,498
024	0,082	0,492	0,115	0,580	0,103	0,660	0,059	0,304
025	0,029	0,245	0,029	0,196	0,029	0,419	0,033	0,245
026	0,027	0,070	0,037	0,094	0,041	0,080	0,041	0,040
027	0,025	0,110	0,034	0,088	0,037	0,074	0,037	0,052
028	0,024	0,327	0,016	0,206	0,013	0,243	0,014	0,173
029	0,028	0,296	0,025	0,191	0,020	0,222	0,018	0,167
030	0,070	0,662	0,061	0,202	0,019	0,145	0,115	0,731
031	0,061	0,650	0,053	0,176	0,020	0,223	0,102	0,593
032	0,066	0,675	0,056	0,202	0,029	0,233	0,109	0,634

Ze shrnutí posouzených RMS hodnot zrychlení v tab. 18 vyplývá, že 100 % RMS hodnot zrychlení splňuje příslušné kritérium při „běžném provozu“ (podle článku 8.3.6 normy [6]), a tedy lze usoudit, že konstrukce „vyhovuje“ ve smyslu 2. mezního stavu (mezního stavu použitelnosti).

#### Posouzení podle ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [11]

Norma [11] stanovuje kritéria pohody chodců prostřednictvím nejvýše přijatelných špičkových hodnot zrychlení libovolné části nosné konstrukce, které již byly zmíněny v kapitole 4.2. Zhodnocení výsledků je rozděleno do dvou tabulek, v tab. 21 je shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, které lze podle článku 8.3.6 normy [6] považovat za „běžný provoz“, tedy výsledky ze záznamů č. 001 až 012. V tab. 22 je pak shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, kam jsou zahrnuty výsledky ze všech záznamů, tedy i z těch, které podle článku 8.3.6 normy [6] nelze považovat za „běžný provoz“. V tab. 23 jsou všechny špičkové hodnoty výkmitů zrychlení z experimentu posouzené podle příslušných kritérií.

Tab. 21 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžný provoz“, podle [11]

Kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	Druh kmitání	% vyhovujících hodnot	% nevyhovujících hodnot
<0,7	Svislá kmitání	100,00 %	0,00 %
<0,2	Vodorovná kmitání od běžné dopravy	100,00 %	0,00 %
0,2≤ $a$ <0,4	Vodorovné vibrace od výjimečného zatížení davem lidí	0,00 %	0,00 % *)

\*) Jako nevyhovující špičková hodnota výkmitu zrychlení se zde rozumí  $a \geq 0,4$  m/s<sup>2</sup>.

Tab. 22 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení ze všech záznamů podle [11]

Kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	Druh kmitání	% vyhovujících hodnot	% nevyhovujících hodnot
$a < 0,7$	Svislá kmitání	78,13 %	21,88 %
$a < 0,2$	Vodorovná kmitání od běžné dopravy	93,75 %	6,25 %
0,2≤ $a$ <0,4	Vodorovné vibrace od výjimečného zatížení davem lidí	6,25 %	0,00 % *)

\*) Jako nevyhovující špičková hodnota výkmitu zrychlení se zde rozumí  $a \geq 0,4$  m/s<sup>2</sup>.

Tab. 23 Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení posouzené podle [11]

Záznam č.	Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení naměřené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
001	0,034	-0,218	0,039	0,249	0,034	0,270	-0,030	0,266
002	0,026	-0,137	0,032	-0,164	0,031	-0,150	0,025	-0,192
003	0,023	-0,110	-0,027	0,128	-0,026	0,115	-0,021	0,125
004	0,035	-0,148	-0,031	0,145	-0,032	0,159	-0,028	-0,140
005	-0,081	0,451	0,063	-0,432	0,058	0,296	0,052	0,447
006	-0,025	0,188	-0,019	0,210	-0,019	0,160	-0,024	0,217
007	-0,069	-0,425	-0,090	-0,475	-0,082	0,521	-0,068	-0,295
008	-0,079	0,492	-0,092	-0,517	-0,090	-0,523	0,075	-0,333
009	-0,065	-0,410	0,083	-0,469	0,077	-0,520	-0,057	0,294
010	-0,094	-0,602	-0,124	0,634	-0,115	-0,688	0,081	-0,456
011	0,055	0,246	0,061	-0,224	-0,063	-0,318	-0,032	-0,224
012	-0,056	0,323	0,055	-0,267	-0,055	-0,397	0,047	0,353
013	0,141	0,698	-0,125	-0,701	-0,122	-0,762	0,094	0,566
014	0,136	0,435	-0,142	0,435	0,146	0,412	0,072	-0,418
015	-0,192	0,796	-0,182	-0,791	-0,140	0,478	-0,172	0,918
016	-0,084	-0,579	-0,078	-0,361	-0,061	0,333	0,094	-0,587

Pokračování tab. 23

Záznam č.	Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení naměřené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
017	-0,032	-0,312	-0,027	-0,216	0,022	0,396	0,032	-0,251
018	-0,093	-0,451	0,077	0,375	0,088	-0,586	0,055	-0,423
019	0,235	0,659	0,194	-0,710	-0,161	-0,609	0,122	0,926
020	-0,105	0,603	-0,119	-0,690	0,114	-0,508	0,101	0,786
021	-0,094	0,480	-0,099	-0,666	0,091	-0,443	-0,067	-0,645
022	-0,212	1,383	0,283	-1,546	-0,258	1,568	-0,158	-0,921
023	0,214	1,353	-0,281	-1,542	-0,250	1,483	0,160	-0,956
024	0,160	-0,962	-0,217	1,138	0,190	1,208	-0,127	0,712
025	0,114	-0,716	-0,109	0,634	0,092	0,913	-0,094	-0,654
026	-0,073	0,202	-0,086	0,218	0,085	-0,189	0,067	0,116
027	-0,070	0,380	-0,090	-0,236	-0,088	-0,209	0,067	0,188
028	-0,059	0,663	-0,044	0,457	0,047	0,469	-0,043	-0,403
029	-0,083	0,639	-0,073	0,502	0,064	0,541	-0,052	-0,420
030	-0,120	-1,072	0,105	-0,472	-0,051	-0,356	-0,180	1,117
031	-0,124	1,151	-0,109	-0,435	0,075	0,555	0,167	-1,005
032	0,145	-1,073	-0,119	-0,513	-0,093	0,559	-0,181	1,110

Ze shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení v tab. 21 vyplývá, že 100 % špičkových hodnot výkmitů zrychlení splňuje příslušné kritérium při „běžném provozu“ (podle článku 8.3.6 normy [6]), a tedy lze usoudit, že konstrukce „vyhovuje“ ve smyslu 2. mezního stavu (mezního stavu použitelnosti).

Posouzení podle Národního aplikačního dokumentu ČSN EN 1991-2 NA ed. A normy [12]

Komfort chodců je v národním aplikačním dokumentu normy [12] popsán pomocí třech úrovní pohodlí chodců – maximální, průměrná a minimální. Kritériem pohody chodců jsou podle národního aplikačního dokumentu normy [12] špičkové hodnoty výkmitů zrychlení. Zhodnocení výsledků je rozděleno do dvou tabulek, v tab. 24 je shrnutí posouzených hodnot, které lze podle článku 8.3.6 normy [6] považovat za „běžný provoz“, tedy výsledky ze záznamů č. 001 až 012. V tab. 25 je pak shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, kam jsou zahrnuty výsledky ze všech záznamů, tedy i z těch, které podle článku 8.3.6 normy [6] nelze považovat za „běžný provoz“. V tab. 26 jsou všechny špičkové hodnoty výkmitů zrychlení z experimentu posouzené podle příslušných kritérií.

Tab. 24 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžnou úroveň dynamického zatížení“, podle NAD normy [12]

Úroveň pohodlí chodců	Svislé zrychlení: kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	% hodnot splňující kritérium	Vodorovné zrychlení: kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	% hodnot splňující kritérium
Maximální	$a \leq 0,50$	85,42 %	$a \leq 0,10$	95,83 %
Průměrná	$0,50 < a \leq 0,70$	14,58 %	$0,10 < a \leq 0,20$	4,17 %
Minimální	$0,70 < a \leq 1,00$	0,00 %	$0,20 < a \leq 0,40$	0,00 %
Nevyhovující	$a > 1,00$	0,00 %	$a > 0,40$	0,00 %

Tab. 25 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení ze všech záznamů podle NAD [12]

Úroveň pohodlí chodců	Svislé zrychlení: kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	% hodnot splňující kritérium	Vodorovné zrychlení: kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	% hodnot splňující kritérium
Maximální	$a \leq 0,50$	56,25 %	$a \leq 0,10$	66,41 %
Průměrná	$0,50 < a \leq 0,70$	21,88 %	$0,10 < a \leq 0,20$	27,34 %
Minimální	$0,70 < a \leq 1,00$	10,94 %	$0,20 < a \leq 0,40$	6,25 %
Nevyhovující	$a > 1,00$	10,94 %	$a > 0,40$	0,00 %

Tab. 26 Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení posouzené podle NAD [12]

Záznam č.	Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení naměřené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
001	0,034	-0,218	0,039	0,249	0,034	0,270	-0,030	0,266
002	0,026	-0,137	0,032	-0,164	0,031	-0,150	0,025	-0,192
003	0,023	-0,110	-0,027	0,128	-0,026	0,115	-0,021	0,125
004	0,035	-0,148	-0,031	0,145	-0,032	0,159	-0,028	-0,140
005	-0,081	0,451	0,063	-0,432	0,058	0,296	0,052	0,447
006	-0,025	0,188	-0,019	0,210	-0,019	0,160	-0,024	0,217
007	-0,069	-0,425	-0,090	-0,475	-0,082	0,521	-0,068	-0,295
008	-0,079	0,492	-0,092	-0,517	-0,090	-0,523	0,075	-0,333
009	-0,065	-0,410	0,083	-0,469	0,077	-0,520	-0,057	0,294
010	-0,094	-0,602	-0,124	0,634	-0,115	-0,688	0,081	-0,456
011	0,055	0,246	0,061	-0,224	-0,063	-0,318	-0,032	-0,224
012	-0,056	0,323	0,055	-0,267	-0,055	-0,397	0,047	0,353
013	0,141	0,698	-0,125	-0,701	-0,122	-0,762	0,094	0,566
014	0,136	0,435	-0,142	0,435	0,146	0,412	0,072	-0,418

Pokračování tab. 26

Záznam č.	Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení naměřené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
015	-0,192	0,796	-0,182	-0,791	-0,140	0,478	-0,172	0,918
016	-0,084	-0,579	-0,078	-0,361	-0,061	0,333	0,094	-0,587
017	-0,032	-0,312	-0,027	-0,216	0,022	0,396	0,032	-0,251
018	-0,093	-0,451	0,077	0,375	0,088	-0,586	0,055	-0,423
019	0,235	0,659	0,194	-0,710	-0,161	-0,609	0,122	0,926
020	-0,105	0,603	-0,119	-0,690	0,114	-0,508	0,101	0,786
021	-0,094	0,480	-0,099	-0,666	0,091	-0,443	-0,067	-0,645
022	-0,212	1,383	0,283	-1,546	-0,258	1,568	-0,158	-0,921
023	0,214	1,353	-0,281	-1,542	-0,250	1,483	0,160	-0,956
024	0,160	-0,962	-0,217	1,138	0,190	1,208	-0,127	0,712
025	0,114	-0,716	-0,109	0,634	0,092	0,913	-0,094	-0,654
026	-0,073	0,202	-0,086	0,218	0,085	-0,189	0,067	0,116
027	-0,070	0,380	-0,090	-0,236	-0,088	-0,209	0,067	0,188
028	-0,059	0,663	-0,044	0,457	0,047	0,469	-0,043	-0,403
029	-0,083	0,639	-0,073	0,502	0,064	0,541	-0,052	-0,420
030	-0,120	-1,072	0,105	-0,472	-0,051	-0,356	-0,180	1,117
031	-0,124	1,151	-0,109	-0,435	0,075	0,555	0,167	-1,005
032	0,145	-1,073	-0,119	-0,513	-0,093	0,559	-0,181	1,110

Ze shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení v tab. 24 vyplývá, že 100 % špičkových hodnot výkmitů zrychlení splňuje horní hranici kritéria odpovídající úrovni pohodlí chodců „průměrná“ při „běžném provozu“ (podle článku 8.3.6 normy [6]).

Posouzení podle Sétora: *Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading* [1]

Komfort chodců je v [1] popsán pomocí třech úrovní pohodlí chodců – maximální, průměrná a minimální. Kritériem pohody chodců jsou podle [1] špičkové hodnoty zrychlení. Zhodnocení výsledků je rozděleno do dvou tabulek, v tab. 27 je shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, které lze podle článku 8.3.6 normy [6] považovat za „běžný provoz“, tedy výsledky ze záznamů č. 001 až 012. V tab. 28 je pak shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, kam jsou zahrnuty výsledky ze všech záznamů, tedy i z těch, které podle článku 8.3.6 normy [6] nelze považovat za „běžný provoz“. V tab. 29 jsou všechny špičkové hodnoty výkmitů zrychlení z experimentu posouzené podle příslušných kritérií.

Tab. 27 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžnou úroveň dynamického zatížení“, podle [1]

Úroveň pohodlí chodců	Svislé zrychlení: kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	% hodnot splňující kritérium	Vodorovné zrychlení: kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	% hodnot splňující kritérium
Maximální	$a \leq 0,50$	85,42 %	$a \leq 0,15$	100,00 %
Průměrná	$0,50 < a \leq 1,00$	14,58 %	$0,15 < a \leq 0,30$	0,00 %
Minimální	$1,00 < a \leq 2,50$	0,00 %	$0,30 < a \leq 0,80$	0,00 %
Nevyhovující	$a > 2,50$	0,00 %	$a > 0,80$	0,00 %

Tab. 28 Shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení ze všech záznamů podle [1]

Úroveň pohodlí chodců	Svislé zrychlení: kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	% hodnot splňující kritérium	Vodorovné zrychlení: kritérium $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	% hodnot splňující kritérium
Maximální	$a \leq 0,50$	56,25 %	$a \leq 0,15$	84,38 %
Průměrná	$0,50 < a \leq 1,00$	32,81 %	$0,15 < a \leq 0,30$	15,63 %
Minimální	$1,00 < a \leq 2,50$	10,94 %	$0,30 < a \leq 0,80$	0,00 %
Nevyhovující	$a > 2,50$	0,00 %	$a > 0,80$	0,00 %

Tab. 29 Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení posouzené podle [1]

Záznam č.	Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení naměřené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
001	0,034	-0,218	0,039	0,249	0,034	0,270	-0,030	0,266
002	0,026	-0,137	0,032	-0,164	0,031	-0,150	0,025	-0,192
003	0,023	-0,110	-0,027	0,128	-0,026	0,115	-0,021	0,125
004	0,035	-0,148	-0,031	0,145	-0,032	0,159	-0,028	-0,140
005	-0,081	0,451	0,063	-0,432	0,058	0,296	0,052	0,447
006	-0,025	0,188	-0,019	0,210	-0,019	0,160	-0,024	0,217
007	-0,069	-0,425	-0,090	-0,475	-0,082	0,521	-0,068	-0,295
008	-0,079	0,492	-0,092	-0,517	-0,090	-0,523	0,075	-0,333
009	-0,065	-0,410	0,083	-0,469	0,077	-0,520	-0,057	0,294
010	-0,094	-0,602	-0,124	0,634	-0,115	-0,688	0,081	-0,456
011	0,055	0,246	0,061	-0,224	-0,063	-0,318	-0,032	-0,224
012	-0,056	0,323	0,055	-0,267	-0,055	-0,397	0,047	0,353
013	0,141	0,698	-0,125	-0,701	-0,122	-0,762	0,094	0,566
014	0,136	0,435	-0,142	0,435	0,146	0,412	0,072	-0,418
015	-0,192	0,796	-0,182	-0,791	-0,140	0,478	-0,172	0,918

Pokračování tab. 29

Záznam č.	Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení naměřené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
016	-0,084	-0,579	-0,078	-0,361	-0,061	0,333	0,094	-0,587
017	-0,032	-0,312	-0,027	-0,216	0,022	0,396	0,032	-0,251
018	-0,093	-0,451	0,077	0,375	0,088	-0,586	0,055	-0,423
019	0,235	0,659	0,194	-0,710	-0,161	-0,609	0,122	0,926
020	-0,105	0,603	-0,119	-0,690	0,114	-0,508	0,101	0,786
021	-0,094	0,480	-0,099	-0,666	0,091	-0,443	-0,067	-0,645
022	-0,212	1,383	0,283	-1,546	-0,258	1,568	-0,158	-0,921
023	0,214	1,353	-0,281	-1,542	-0,250	1,483	0,160	-0,956
024	0,160	-0,962	-0,217	1,138	0,190	1,208	-0,127	0,712
025	0,114	-0,716	-0,109	0,634	0,092	0,913	-0,094	-0,654
026	-0,073	0,202	-0,086	0,218	0,085	-0,189	0,067	0,116
027	-0,070	0,380	-0,090	-0,236	-0,088	-0,209	0,067	0,188
028	-0,059	0,663	-0,044	0,457	0,047	0,469	-0,043	-0,403
029	-0,083	0,639	-0,073	0,502	0,064	0,541	-0,052	-0,420
030	-0,120	-1,072	0,105	-0,472	-0,051	-0,356	-0,180	1,117
031	-0,124	1,151	-0,109	-0,435	0,075	0,555	0,167	-1,005
032	0,145	-1,073	-0,119	-0,513	-0,093	0,559	-0,181	1,110

V následující tab. 30 jsou oranžově zvýrazněny špičkové hodnoty výkmitů zrychlení ve vodorovném směru, které překračují kritérium pro nebezpečí vzniku „lock-in“ efektu. Kritérium je patrné z obr. 3, ale pro lepší přehlednost je zde uvedeno znovu: nebezpečí vzniku „lock-in“ efektu vzniká při překročení špičkové hodnoty výkmitu zrychlení 0,1 m/s<sup>2</sup>. Ze špičkových hodnot výkmitů zrychlení naměřených při experimentu bylo toto kritérium překročeno u 4,17 % hodnot z ze záznamů č. 001 až 012, tedy těch záznamů, které lze podle článku 8.3.6 normy [6] považovat za „běžný provoz“. Ze všech záznamů bylo překročeno kritérium pro nebezpečí vzniku „lock-in“ efektu u 33,59 % hodnot.

Tab. 30 Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení ve vodorovném směru posouzené na nebezpečí vzniku „lock-in“ efektu podle kritérií uvedených v [1]

Záznam č.	Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení naměřené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]			
	72y	112y	132y	182y
001	0,034	0,039	0,034	-0,030
002	0,026	0,032	0,031	0,025
003	0,023	-0,027	-0,026	-0,021

Pokračování tab. 30

Záznam č.	Špičkové hodnoty výkmitů zrychlení naměřené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]			
	72y	112y	132y	182y
004	0,035	-0,031	-0,032	-0,028
005	-0,081	0,063	0,058	0,052
006	-0,025	-0,019	-0,019	-0,024
007	-0,069	-0,090	-0,082	-0,068
008	-0,079	-0,092	-0,090	0,075
009	-0,065	0,083	0,077	-0,057
010	-0,094	-0,124	-0,115	0,081
011	0,055	0,061	-0,063	-0,032
012	-0,056	0,055	-0,055	0,047
013	0,141	-0,125	-0,122	0,094
014	0,136	-0,142	0,146	0,072
015	-0,192	-0,182	-0,140	-0,172
016	-0,084	-0,078	-0,061	0,094
017	-0,032	-0,027	0,022	0,032
018	-0,093	0,077	0,088	0,055
019	0,235	0,194	-0,161	0,122
020	-0,105	-0,119	0,114	0,101
021	-0,094	-0,099	0,091	-0,067
022	-0,212	0,283	-0,258	-0,158
023	0,214	-0,281	-0,250	0,160
024	0,160	-0,217	0,190	-0,127
025	0,114	-0,109	0,092	-0,094
026	-0,073	-0,086	0,085	0,067
027	-0,070	-0,090	-0,088	0,067
028	-0,059	-0,044	0,047	-0,043
029	-0,083	-0,073	0,064	-0,052
030	-0,120	0,105	-0,051	-0,180
031	-0,124	-0,109	0,075	0,167
032	0,145	-0,119	-0,093	-0,181

Ze shrnutí posouzených špičkových hodnot výkmitů zrychlení v tab. 27 vyplývá, že 100 % špičkových hodnot výkmitů zrychlení splňuje horní hranici kritéria odpovídající úrovni pohodlí chodců „průměrná“ při „běžném provozu“ (podle článku 8.3.6 normy [6]). Při „běžném provozu“ je nebezpečí vzniku „lock-in“ efektu zanedbatelné. Podle autorky však zanedbatelné není při úrovni dynamického zatížení, které neodpovídá „běžnému



provozu“ podle článku 8.3.6 normy [6], což může být např. organizovaný pěší pochod větší skupiny chodců.

Posouzení podle ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations [13]

Kritériem pohody chodců jsou podle [13] vážené RMS hodnoty zrychlení. Jak již bylo podrobněji popsáno v kapitole 4.2, maximální přípustné RMS hodnoty zrychlení jsou v [13] dány pomocí grafů (viz obr. 4 a obr. 5). RMS hodnoty zrychlení uvedené v tab. 33 nejsou vážené. Hodnoty váhové funkce  $W_m$  jsou vždy menší než 1. Když tedy RMS hodnoty zrychlení vyhoví bez použití váhové funkce  $W_m$ , jednoznačně by vyhověly i s jejím použitím. Posouzení bylo provedeno následujícím způsobem: nejdříve byly vyhodnocené RMS hodnoty zrychlení porovnány s nejnižší hodnotou přípustné RMS hodnoty zrychlení, která se v celém grafu nachází. Pokud vyhodnocená RMS hodnota vyhověla, byla v tab. 33 označena sytě zelenou barvou. Pokud tomuto kritériu nevyhověla, bylo nutné v záznamu zjistit dominantní frekvenci, poté odečíst z grafu příslušnou maximální přípustnou RMS hodnotu zrychlení a tu porovnat s vyhodnocenou RMS hodnotou zrychlení. Pokud vyhověla, byla v tab. 33 označena bledší zelenou barvou, pokud nevyhověla, byla v tab. 33 označena červenou barvou.

Zhodnocení výsledků je rozděleno do dvou tabulek, v tab. 31 je shrnutí posouzených RMS hodnot, které lze podle článku 8.3.6 normy [6] považovat za „běžný provoz“, tedy výsledky ze záznamů č. 001 až 012. V tab. 32 je pak shrnutí posouzených RMS hodnot, kam jsou zahrnuty výsledky všech záznamů, tedy z těch, které podle článku 8.3.6 normy [6] nelze považovat za „běžný provoz“. V tab. 33 jsou všechny RMS hodnoty zrychlení posouzené podle příslušných kritérií.

*Tab. 31 Shrnutí posouzených RMS hodnot zrychlení, které lze podle [6] považovat za „běžný provoz“, podle [13]*

Druh kmitání	% vyhovujících hodnot	% nevyhovujících hodnot
Svislé kmitání	100 %	0 %
Vodorovné kmitání	100 %	0 %

*Tab. 32 Shrnutí posouzení všech RMS hodnot zrychlení ze všech záznamů podle [13]*

Druh kmitání	% vyhovujících hodnot	% nevyhovujících hodnot
Svislé kmitání	63 %	38 %
Vodorovné kmitání	100 %	0 %

Tab. 33 RMS hodnoty zrychlení posouzené podle [13]

Záznam č.	RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích [m/s <sup>2</sup> ]							
	72y	72z	112y	112z	132y	132z	182y	182z
001	0,014	0,094	0,017	0,104	0,016	0,104	0,012	0,123
002	0,010	0,048	0,012	0,061	0,012	0,052	0,011	0,064
003	0,009	0,035	0,010	0,041	0,010	0,042	0,009	0,040
004	0,010	0,043	0,010	0,049	0,010	0,052	0,010	0,049
005	0,024	0,140	0,022	0,144	0,018	0,113	0,018	0,142
006	0,007	0,046	0,007	0,100	0,008	0,054	0,008	0,104
007	0,037	0,237	0,054	0,292	0,050	0,293	0,032	0,145
008	0,034	0,213	0,048	0,267	0,045	0,271	0,031	0,132
009	0,036	0,235	0,054	0,295	0,049	0,298	0,031	0,146
010	0,048	0,303	0,069	0,360	0,063	0,376	0,039	0,192
011	0,017	0,073	0,021	0,068	0,020	0,149	0,009	0,078
012	0,017	0,108	0,015	0,088	0,018	0,177	0,012	0,100
013	0,048	0,327	0,039	0,256	0,034	0,260	0,027	0,216
014	0,046	0,198	0,044	0,154	0,036	0,154	0,026	0,151
015	0,059	0,371	0,055	0,246	0,042	0,168	0,069	0,397
016	0,035	0,264	0,031	0,142	0,020	0,107	0,050	0,301
017	0,009	0,145	0,009	0,103	0,008	0,186	0,007	0,117
018	0,029	0,197	0,027	0,152	0,027	0,250	0,019	0,158
019	0,073	0,304	0,062	0,231	0,055	0,171	0,048	0,376
020	0,029	0,218	0,038	0,228	0,036	0,146	0,031	0,288
021	0,028	0,150	0,029	0,247	0,026	0,152	0,021	0,229
022	0,133	0,821	0,188	0,994	0,168	0,969	0,097	0,522
023	0,127	0,782	0,179	0,943	0,161	0,927	0,093	0,498
024	0,082	0,492	0,115	0,580	0,103	0,660	0,059	0,304
025	0,029	0,245	0,029	0,196	0,029	0,419	0,033	0,245
026	0,027	0,070	0,037	0,094	0,041	0,080	0,041	0,040
027	0,025	0,110	0,034	0,088	0,037	0,074	0,037	0,052
028	0,024	0,327	0,016	0,206	0,013	0,243	0,014	0,173
029	0,028	0,296	0,025	0,191	0,020	0,222	0,018	0,167
030	0,070	0,662	0,061	0,202	0,019	0,145	0,115	0,731
031	0,061	0,650	0,053	0,176	0,020	0,223	0,102	0,593
032	0,066	0,675	0,056	0,202	0,029	0,233	0,109	0,634

Ze shrnutí posouzených RMS hodnot zrychlení v tab. 31 vyplývá, že 100 % RMS hodnot zrychlení splňuje příslušné kritérium při „běžném provozu“ (podle článku 8.3.6

normy [6]), a tedy lze usoudit, že konstrukce „vyhovuje“ ve smyslu 2. mezního stavu (mezního stavu použitelnosti).

#### **7.4.5 Shrnutí a zhodnocení výsledků experimentální modální analýzy a dynamické zkoušky zatěžovací**

Experimentální modální analýza byla provedena metodou AVT (Ambient Vibration Testing) a k buzení konstrukce bylo využito buzení větrem. Z naměřených záznamů kmitání mostovky byly vyhodnoceny vlastní frekvence mostovky a jim příslušící tvary vlastního kmitání mostovky. Dále byl vyhodnocen útlum z vhodných záznamů dokmitání konstrukce, které byly pořízeny v rámci dynamické zkoušky zatěžovací.

V rámci dynamické zkoušky zatěžovací bylo pořízeno celkem 32 záznamů vynuceného kmitání mostovky. Záznamy č. 001 až 012 odpovídají „běžnému provozu“ dle článku 8.3.6 normy [6], záznamy č. 013 až 032 neodpovídají „běžnému provozu“ dle článku 8.3.6 normy [6]. Ze záznamů kmitání mostovky byla vyhodnocena maximální špičková zrychlení naměřená v jednotlivých sledovaných bodech konstrukce a RMS hodnoty zrychlení. Tyto vyhodnocené výsledky pak byly posouzeny podle jednotlivých kritérií pohody chodců tak, jak jsou stanoveny v různých normách, předpisech a doporučeních.

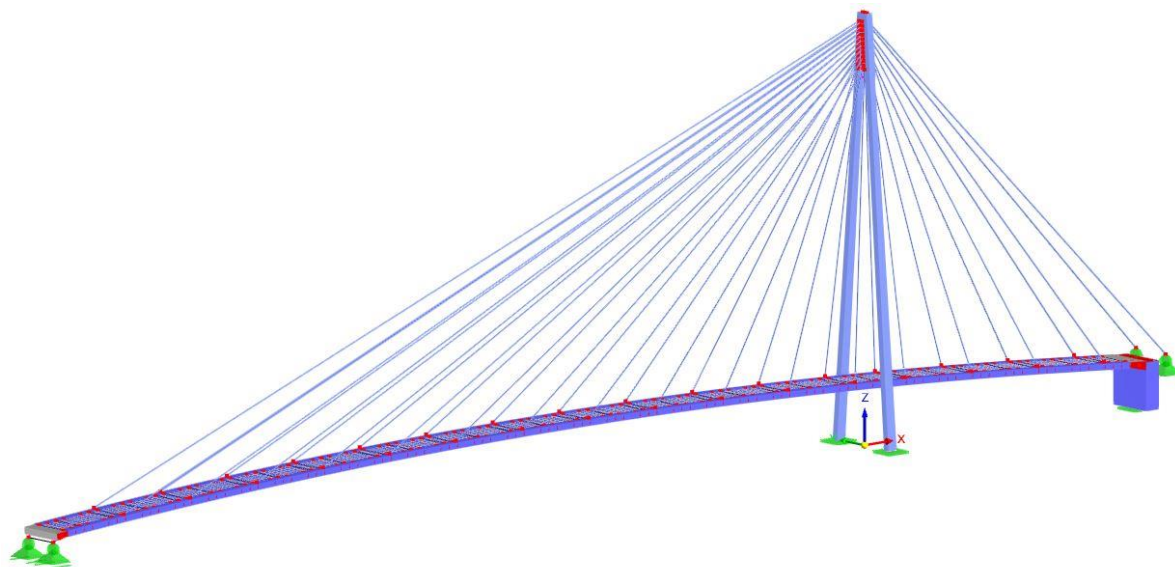
Z posouzení podle [6], [11] a [13] vyplývá, že konstrukce „vyhovuje“ ve smyslu 2. mezního stavu (mezního stavu použitelnosti). Z posouzení podle [1] a NAD [12] lze usoudit, že úroveň pohodlí chodců na lávce odpovídá „průměrné“ úrovni. Podle autorky jsou výstižnější pro posouzení pohody chodců při experimentu taková kritéria pohody chodců, která jsou stanovena pomocí vážených RMS hodnot zrychlení, tedy kritéria stanovená v [6] a [13]. Kritéria pohody chodců, která jsou stanovena pomocí maximálních špičkových hodnot zrychlení, tedy kritéria stanovená v [1], [11] a NAD [12], jsou vhodnější pro posuzování vypočtených hodnot při návrhu konstrukce, nicméně tak je to i v příslušných normách uvedeno. V rámci této diplomové práce byla do posouzení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci kritéria pohody chodců stanovená v těchto dokumentech nicméně také zahrnuta, a to ze studijních důvodů.

## 8 Teoretická analýza dynamického chování lávky pro chodce v Lužci nad Vltavou

Předmětem této diplomové práce je kromě experimentálního zkoumání dynamického chování lávky pro chodce v Lužci nad Vltavou také tvorba 3D výpočetního modelu této konstrukce a jeho verifikace<sup>4</sup>. Při verifikaci modelu výpočet odpovídá uspořádání experimentu in situ, výsledky experimentu a výpočtu se následně porovnají a posuzuje se míra shody mezi výsledky výpočtu a experimentu [5].

### 8.1 Tvorba 3D modelu konstrukce

Výpočetní 3D model konstrukce byl vytvořen v programu Dlubal RFEM 6.01 s využitím studentské licence. K jeho sestavení byly využity informace z realizační dokumentace [32], jejíž autorem je společnost Novák & Partner, s r. o. Geometrie konstrukce byla převzata z přehledných výkresů z [32] a importována z programu AutoCAD 2019 do programu Dlubal RFEM 6.01. Byla tedy zachována geometrie konstrukce, včetně výškového oblouku. Konstrukce byla modelována prutovými prvky, některé prvky (např. deska mostovky) byly modelovány jako stěnodeskové prvky.



Obr. 56 Teoretický 3D model konstrukce v programu Dlubal RFEM 6.01

---

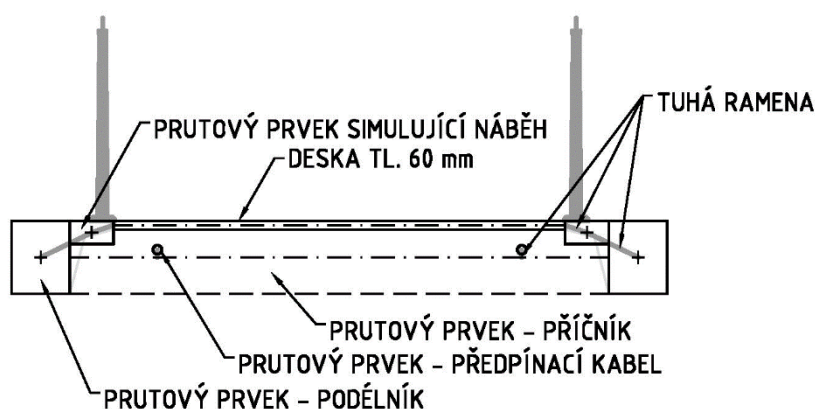
<sup>4</sup> verifikace je ověření výstižnosti modelu

### 8.1.1 Vodorovná nosná konstrukce

Vodorovná nosná konstrukce lávky je tvořena UHPC segmenty mostovky, dvojicí vnějších předpínacích kabelů, monolitickým příčným nad opěrou O1 a monolitickým náběhem, kterým je provedeno vetknutí mostovky do opěry O3.

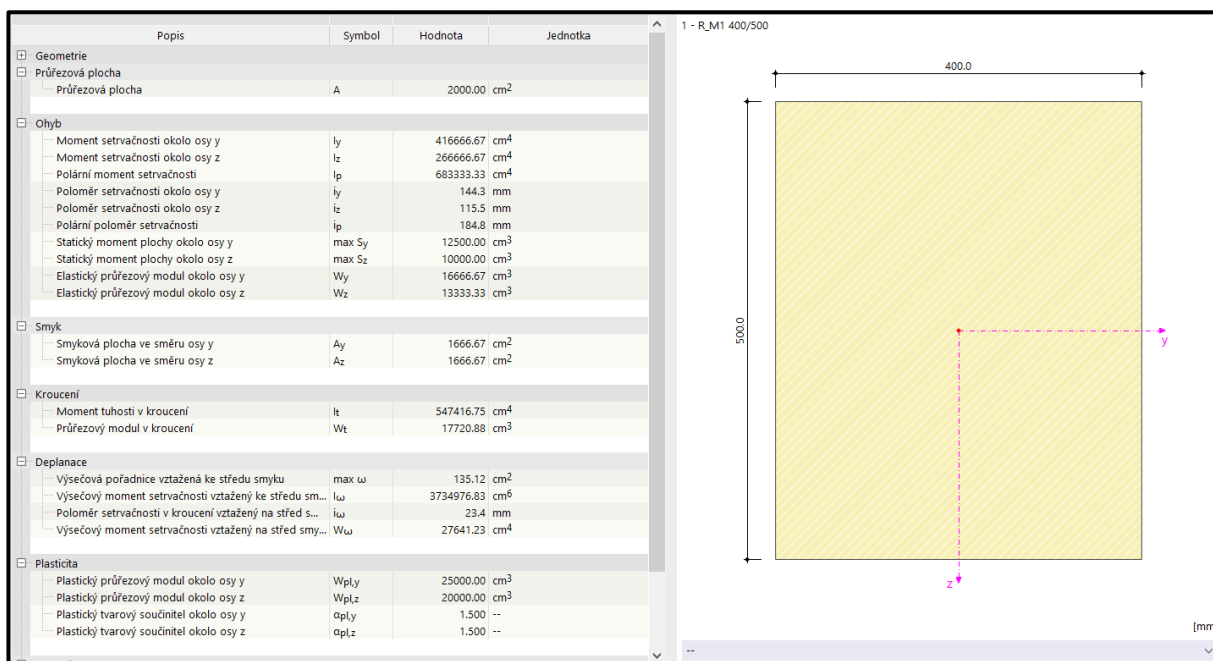
Prefabrikované UHPC segmenty mostovky byly modelovány jako systém podélníků, příčníků a desky mostovky. Podélníky a příčníky byly modelovány jako prutové prvky, deska mostovky byla modelována jako stěnodeskový prvek. Předpínací kabely byly modelovány jako prutové prvky. Vzájemné propojení prvků v mostovce bylo zajištěno tuhými rameny. Pokud bylo u jednotlivých modelovaných průřezů přistoupeno ke zjednodušení oproti projektovanému tvaru, byly rozměry náhradních průřezů voleny vždy tak, aby byla zachována plocha původního průřezu.

## PŘÍČNÝ ŘEZ MOSTOVKOU: ZPŮSOB MODELOVÁNÍ

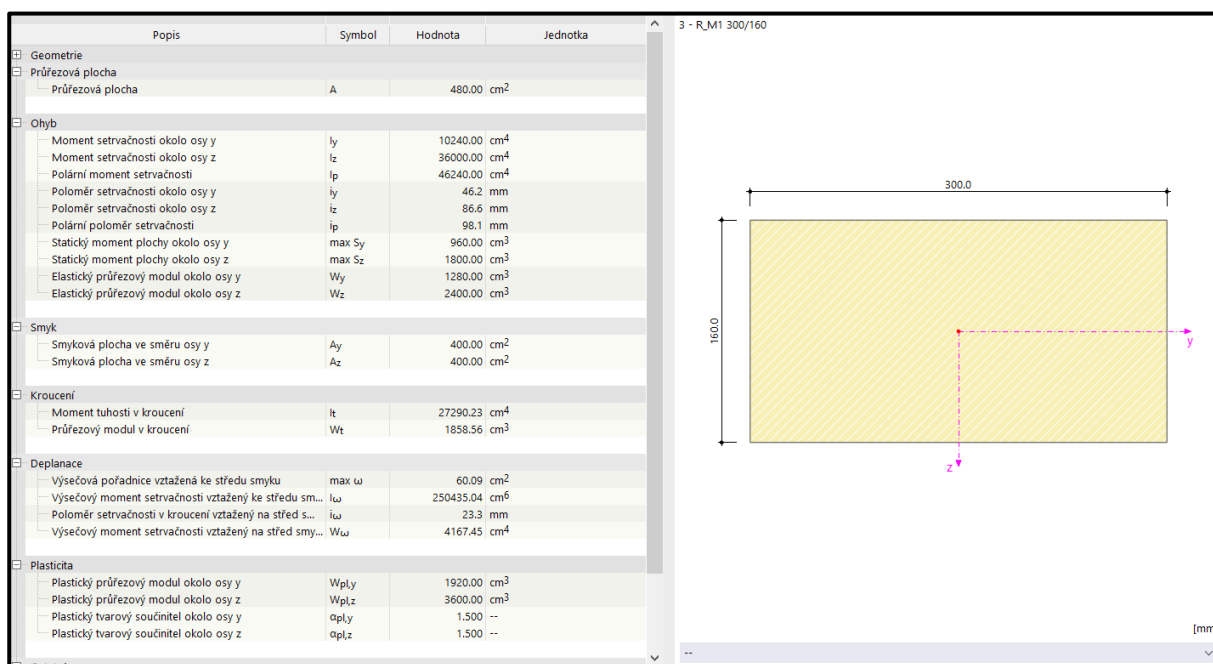


Obr. 57 Příčný řez mostovkou – způsob modelování ve výpočetním programu

Podélníky byly modelovány jako dvojice prutových prvků. Oběma prutovým prvkům byl přiřazen obdélníkový průřez. První prutový prvek (na vnějších stranách průřezu mostovky na obr. 57) má rozměr  $400 \times 500$  mm (obr. 58). Druhý prutový prvek zjednodušeně simuluje lineární náběh mezi deskou mostovky a podélníkem, má rozměr  $300 \times 160$  mm (obr. 59). Beton, který byl použit při výrobě UHPC segmentů, byl třídy C110/130. V programu byl z knihovny vybrán beton třídy C100/115, protože vyšší třída betonu už v knihovně materiálů nebyla k dispozici.

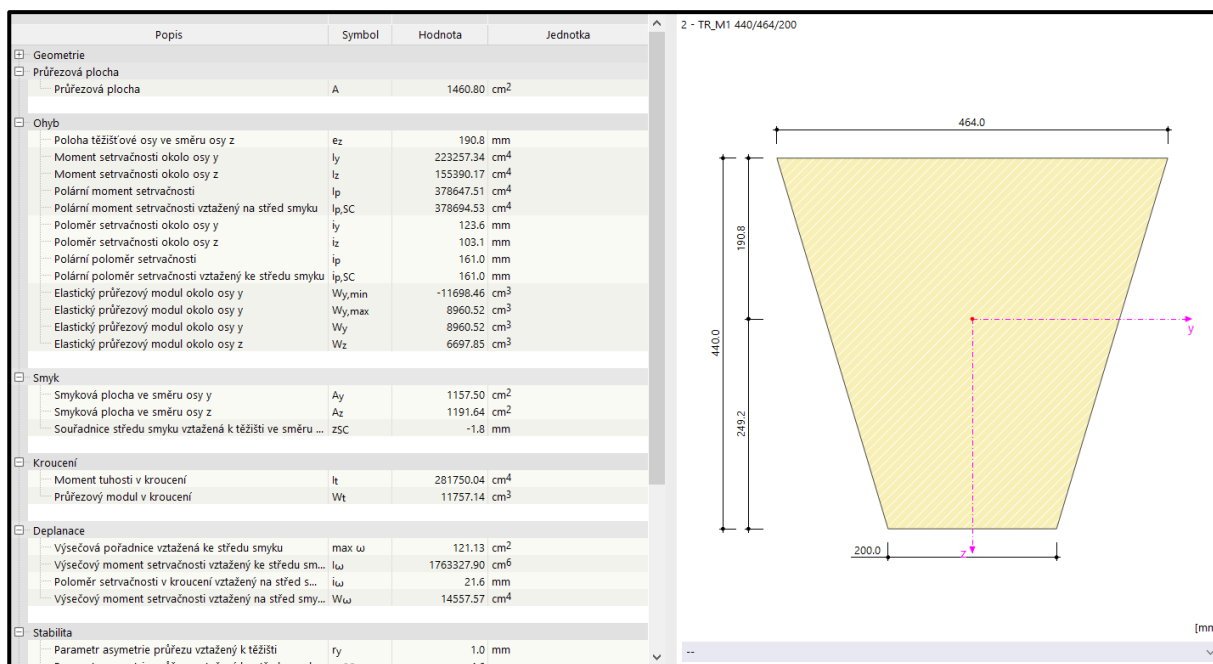


Obr. 58 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – podélník



Obr. 59 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – zjednodušení náběhu

Příčnický byly modelovány jako prutové prvky, kterým byl přiřazen lichoběžníkový průřez (obr. 60). Stejně jako u modelovaných podélníků, i zde byl použit beton třídy C100/115.



Obr. 60 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – příčník

Deska mostovky byla modelována jako stěnodeskový prvek tloušťky 60 mm, což odpovídá projektované tloušťce desky mostovky. Stejně jako u modelovaných podélníků a příčníků, i zde byl použit beton třídy C100/115.

Předpínací kabely byly modelovány jako prutové prvky s kruhovým průřezem o průměru 60,2 mm. Předpínací kabely jsou tvořeny z 19 lan. Plocha jednoho lana je rovna 150 mm<sup>2</sup>. Pro výpočet průměru  $d$  náhradního kruhového průřezu byla využita následující úvaha o rovnosti ploch:

$$A_{NKP} = A_{kabelu}, \quad (25)$$

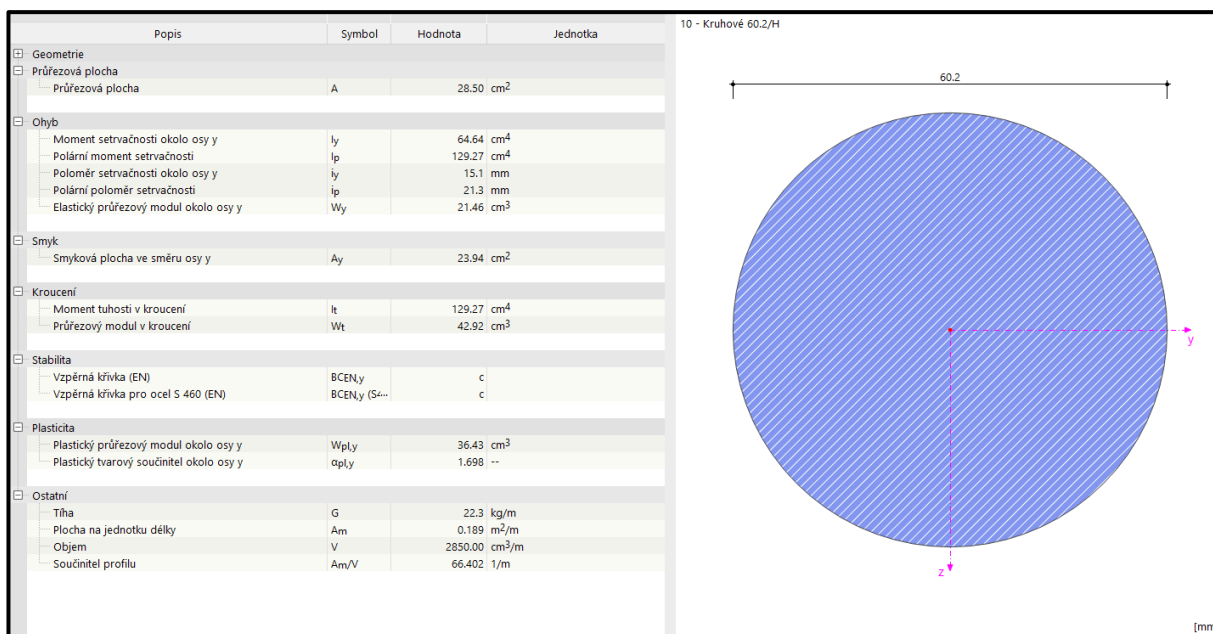
kde  $A_{NKP}$  je plocha náhradního kruhového průřezu a

$A_{kabelu}$  je plocha kabelu, tedy plocha jednoho lana vynásobená počtem lan.

$$\pi \cdot \frac{d^2}{4} = 150 \cdot 19 \quad (26)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 150 \cdot 19}{\pi}} = 60,2 \text{ mm} \quad (27)$$

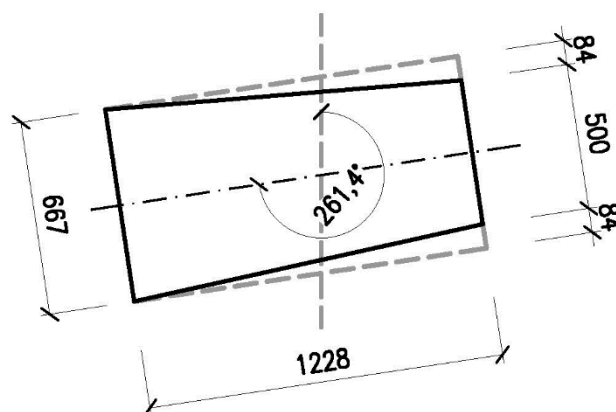
Jako materiál modelovaného předpínacího kabelu bylo zvoleno „předpínací lano St1660/1860“, protože z knihovny materiálů se nejvíce blíží skutečně použitému materiálu, který je v dokumentaci [32] specifikován jako St1640/1860. Modul pružnosti je u tohoto materiálu v programu definován hodnotou 195 GPa.



Obr. 61 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – předpínací kabel

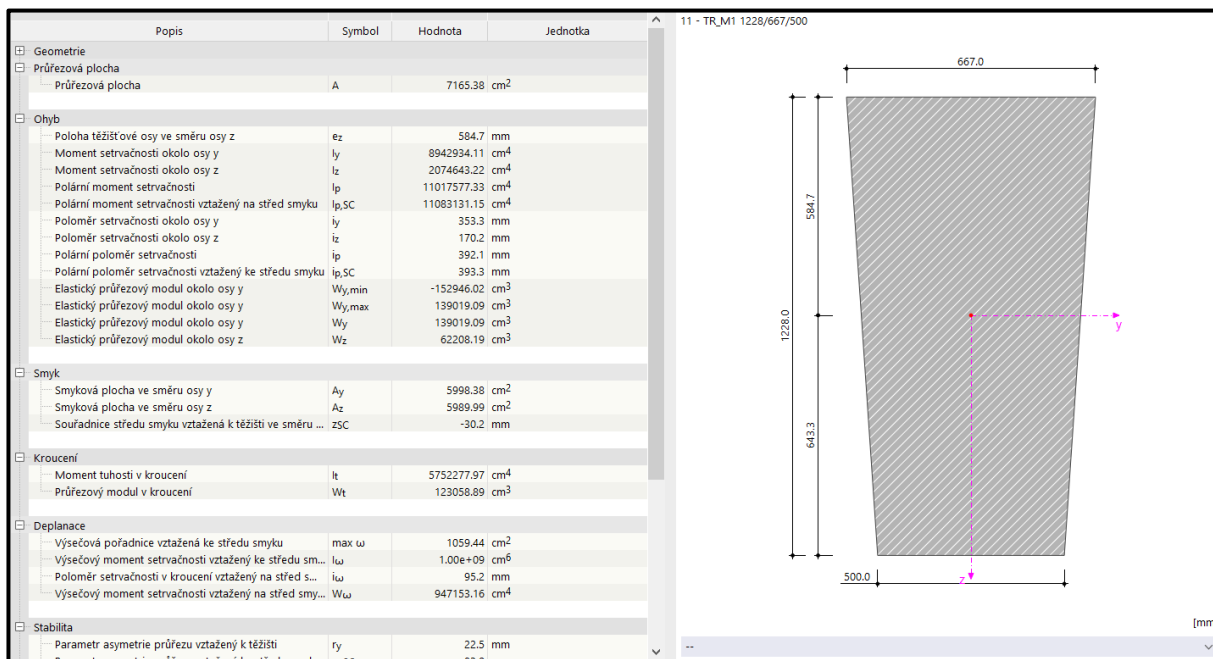
Příčnick nad opěrou O1 byl modelován jako prutový prvek s lichoběžníkovým průřezem, který byl otočen od svislé osy o  $261,4^\circ$  (viz obr. 62). Ve skutečnosti je náběh realizován s parabolickým průběhem. Rozměry lichoběžníkového průřezu byly vypočteny tak, aby celkový objem příčnicku zůstal zachován. Jako materiál byl zvolen beton třídy C50/60, což odpovídá materiálu uvedenému v realizační dokumentaci [32].

## PRŮŘEZ: PŘÍČNÍK NAD 01



Obr. 62 Průřez příčnicku nad O1 – schéma natočení průřezu

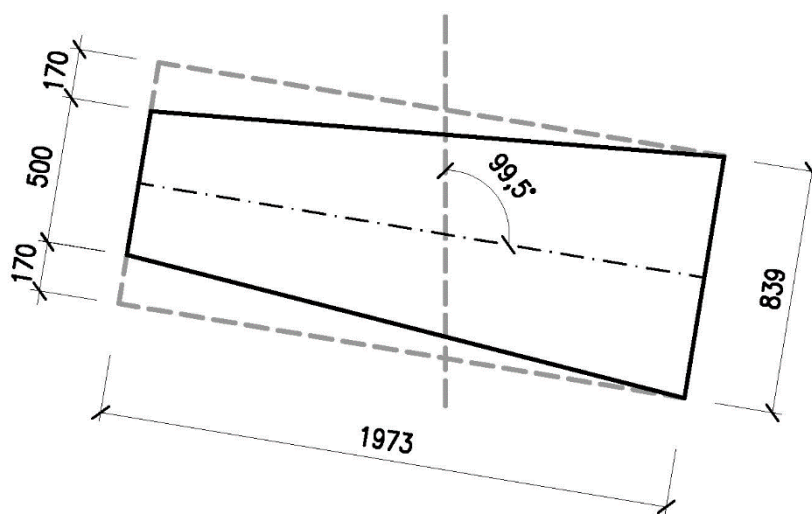




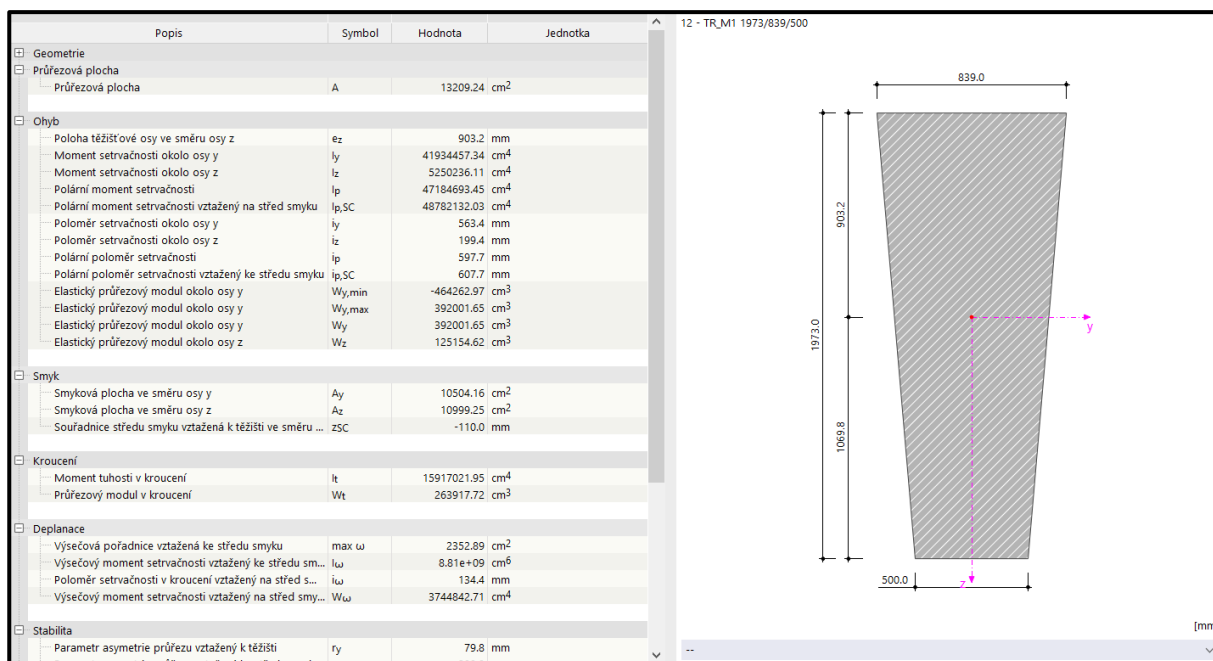
Obr. 63 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – příčník nad opěrou O1

Příčník u opěry O3 byl modelován jako prutový prvek s lichoběžníkovým průřezem, který byl otočen od svislé osy o  $99,5^\circ$  (viz obr. 64). Ve skutečnosti je náběh realizován s parabolickým průběhem. Rozměry lichoběžníkového průřezu byly vypočteny tak, aby celkový objem příčníku zůstal zachován. Jako materiál byl zvolen beton třídy C50/60, což odpovídá materiálu uvedenému v realizační dokumentaci [32].

## PRŮŘEZ: PŘÍČNÍK U O3



Obr. 64 Průřez příčníku u O3 – schéma natočení průřezu



Obr. 65 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – příčnick u opěry O3

### 8.1.2 Závěsy

Závěsy byly modelovány jako příhradové pruty, které lze namáhat pouze tahem/tlakem, nikoliv ohybem. Tato vlastnost odpovídá skutečnému chování závěsu. Průřez závěsu byl modelován jako kruh, jehož průměr byl vypočten podobně jako pro předpínací kabel v kapitole 8.1.1 na základě vztahu (25). V následující tab. 34 je přehled závěsů včetně skutečně použitého typu závěsu, příslušné plochy udávané výrobcem a dále vypočtený průměr náhradního ocelového průřezu, kterým byl příslušný závěs modelován.

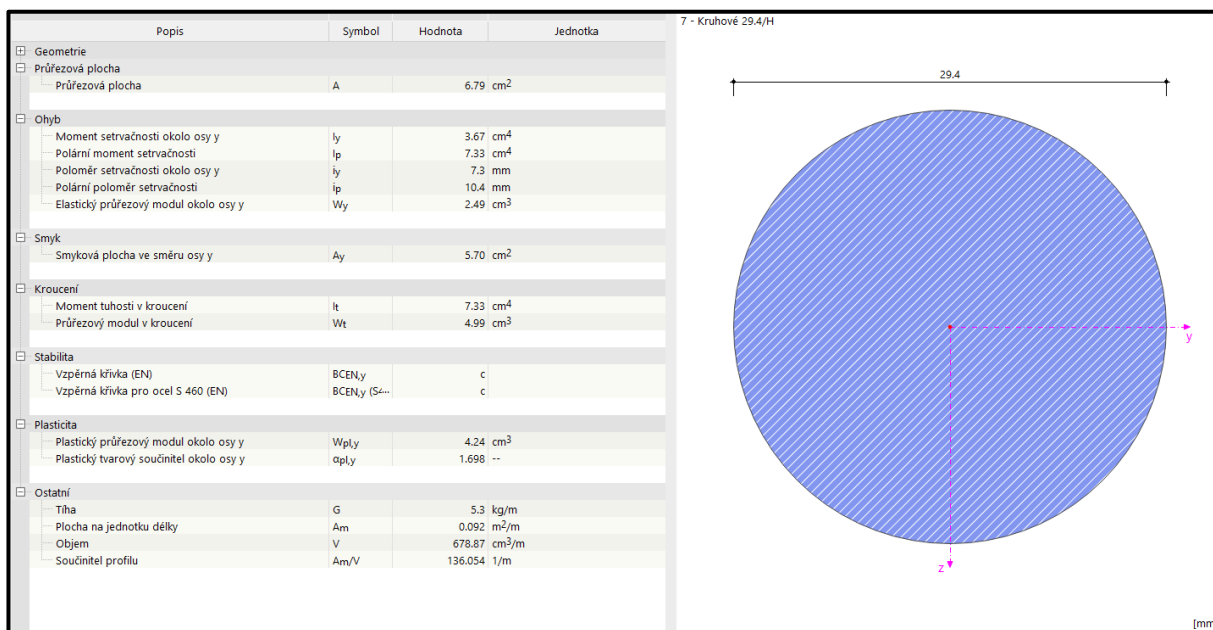
Tab. 34 Přehled závěsů, použitých typů závěsů dle [32], plochy závěsu udávané výrobcem a hodnota vypočteného průměru náhradního ocelového průřezu

Označení závěsu dle RDS [32]	Označení závěsu dle experimentu 15. 10. 2021	Označení typu závěsu	Nominální plocha závěsu A [mm <sup>2</sup> ]	Průměr náhradního ocelového průřezu d [mm]
1-1	X01	FLC 32	681,00	29,4
1-2	X02	FLC 32	681,00	29,4
1-3	X03	FLC 32	681,00	29,4
1-4	X04	FLC 32	681,00	29,4
1-5	X05	FLC 32	681,00	29,4
1-6	X06	FLC 32	681,00	29,4
1-7	X07	FLC 32	681,00	29,4
1-8	X08	FLC 32	681,00	29,4

## Pokračování tab. 34

Označení závěsu dle RDS [32]	Označení závěsu dle experimentu 15. 10. 2021	Označení typu závěsu	Nominální plocha závěsu A [mm <sup>2</sup> ]	Průměr náhradního ocelového průřezu d [mm]
1-9	X09	FLC 32	681,00	29,4
1-10	X10	FLC 32	681,00	29,4
1-11	X11	FLC 32	681,00	29,4
1-12	X12	FLC 32	681,00	29,4
2-5	X13	FLC 32	681,00	29,4
2-4	X14	FLC 32	681,00	29,4
2-3	X15	FLC 36	862,00	33,1
2-2	X16	FLC 60	2 452,00	55,9
2-1	X17	FLC 64	2 789,00	59,6

Jako materiál pro modelování závěsů byla zvolena ocel S355J2, její modul pružnosti byl snížen na 165 GPa, což je hodnota, kterou udává výrobce.

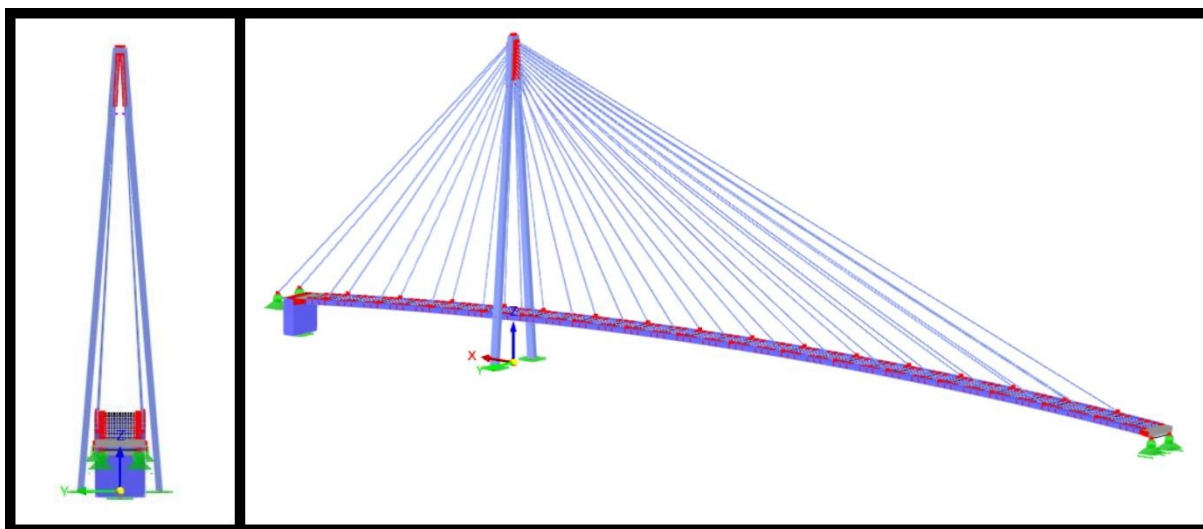


Obr. 66 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – závěsy X01 až X14

Obdobným způsobem jako závěsy X01 až X14 na obr. 66 byly modelovány i závěsy X15 až X17.

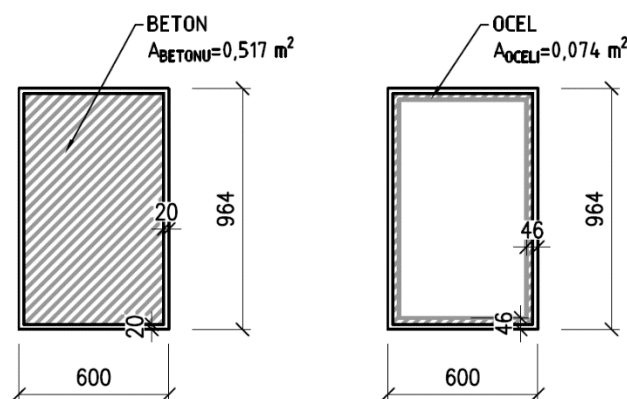
### 8.1.3 Pylon

Jak již bylo popsáno v kapitole 7.1, nosnou konstrukci pylonu tvoří dvě ocelové stojky obdélníkového průřezu, které jsou v horní části spojené masivní hlavou, ve které jsou ukotveny nosné závěsy mostovky. Rozměr průřezu stojky pylonu je lineárně proměnný. V programu byla použita funkce rozdílného průřezu na začátku a na konci prutu, změna mezi rozměry na začátku a konci prutu má lineární průběh, což odpovídá skutečnosti.



Obr. 67 Pohled na pylon ve 3D modelu konstrukce

#### ŘEZ PYLONEM V POLOVINĚ VÝŠKY

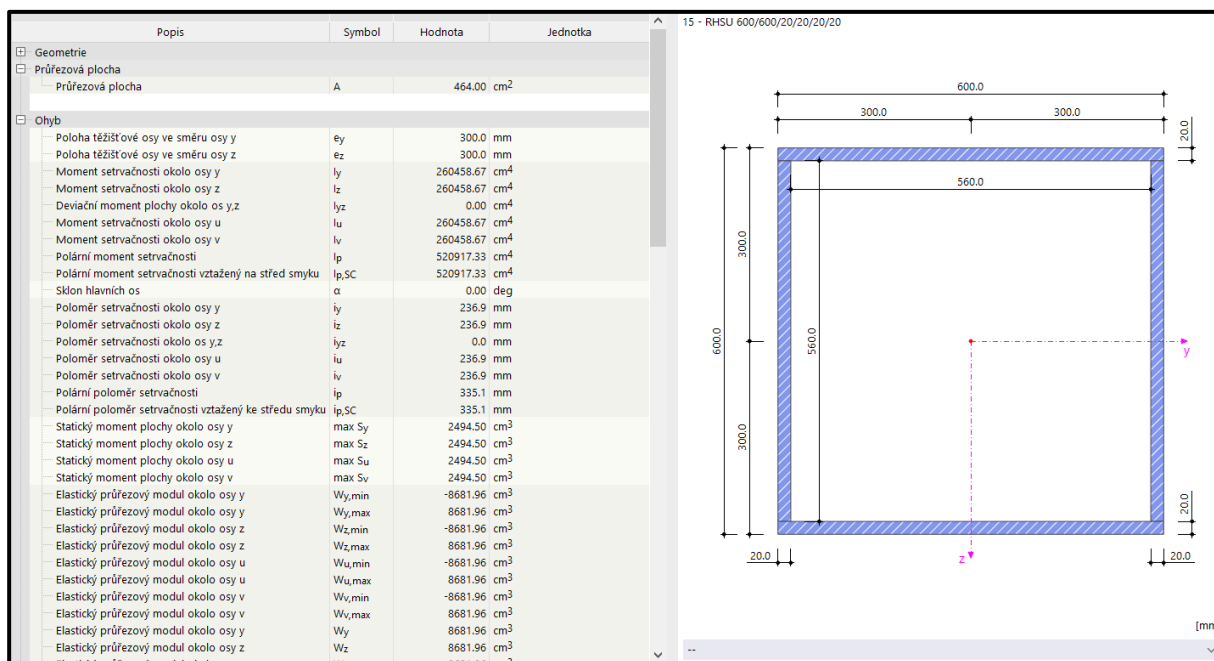


Obr. 68 Tvorba náhradního ocelového průřezu za část ocelového pylonu vyplněnou betonem

Ocelové stojky pylonu jsou od paty do výškové úrovně mostovky vyplněny betonem. V základní knihovně průřezů v programu Dlubal RFEM 6.01 není k dispozici průřez složený ze dvou různých materiálů, proto bylo přistoupeno k vytvoření náhradního ocelového průřezu, a to následujícím způsobem: byl vybrán řez v polovině

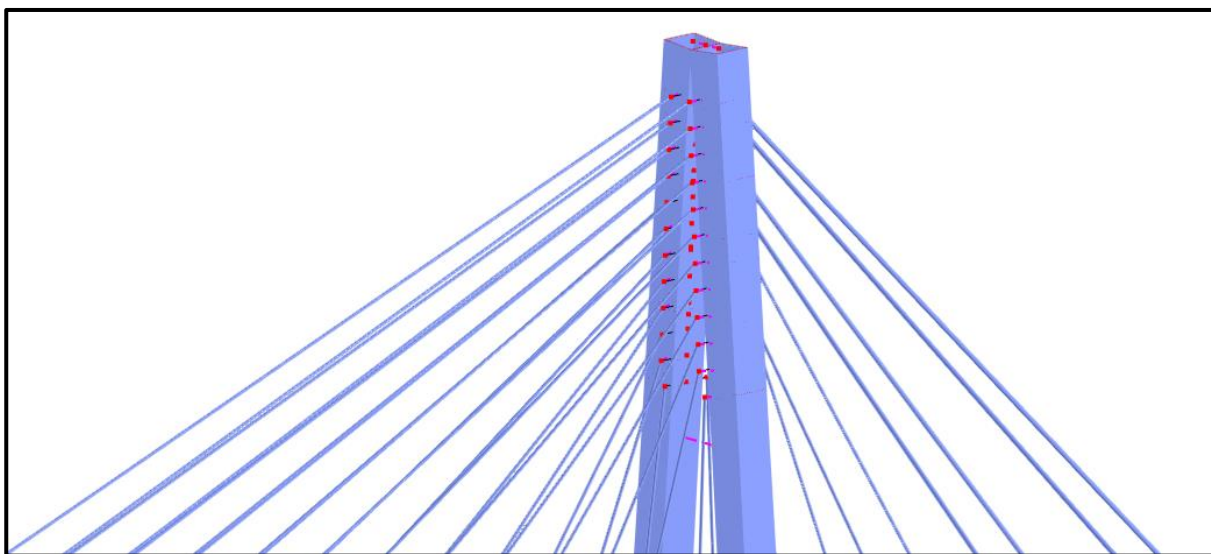
výšky mezi patou pylonu a úrovní mostovky. V tomto řezu byla změřena plocha betonu. Ta byla následně vydělena tzv. pracovním součinitelem, který je definován jako poměr modulů pružnosti oceli a betonu a je přibližně roven 7. Tato náhradní plocha byla poté přidána ke stěnám ocelového průřezu. Postup je znázorněn na obr. 68.

Jako materiál byla zvolena ocel S355J2, což odpovídá materiálu uvedeném v [32].



Obr. 69 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – stojka ocelového pylonu v hlavě

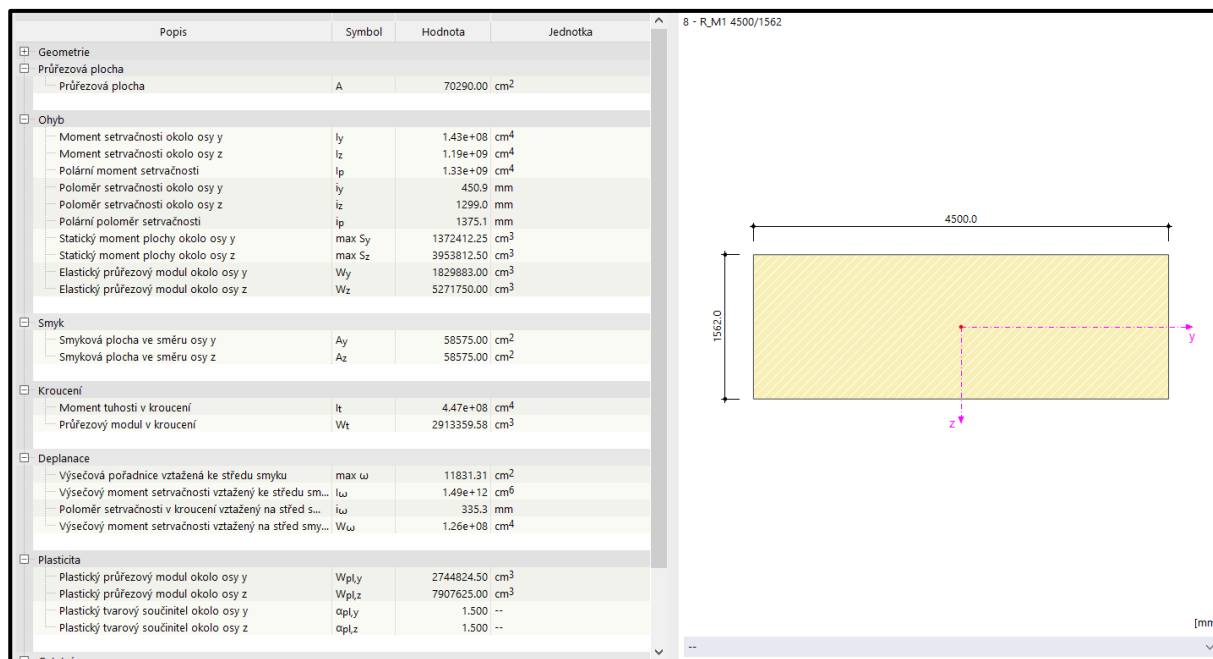
Napojení závěsů na hlavu pylonu bylo řešeno pomocí tuhých ramen, stejně tak bylo zjednodušeně řešeno propojení stojek pylonu ve vrcholu hlavy a v úrovni připojení spodní řady závěsů.



Obr. 70 Zjednodušené modelování hlavy pylonu

### 8.1.4 Opěra O3

Opěra O3 byla modelována pomocí prutového prvku s obdélníkovým průřezem o rozměrech 4500 × 1562 mm (obr. 69). Jako materiál byl zvolen beton třídy C30/37, což odpovídá materiálu uvedeném v [32].



Obr. 71 Průřez a jeho průřezové charakteristiky – dřík opěry O3

Propojení s příčnickem vetknutým do opěry O3 bylo modelováno pomocí tuhých ramen.

### 8.1.5 Podepření konstrukce

Konstrukce byla modelována bez tuhostních parametrů podloží, bylo využito pouze teoretických podpor. Hlavním důvodem je skutečnost, že pro dynamické chování nosné konstrukce lávky se podepření svými vlastnostmi blíží teoretickým předpokladům ideálních vazeb, jak vyplývá ze zkušeností vedoucího práce prof. Ing. Michala Poláka, CSc.

Podepření na opěře O1 bylo modelováno dvěma podélně posuvnými klouby, což odpovídá popisu v [32]. Podepření stojek ocelového pylonu bylo modelováno jako vetknutí. Podepření opěry O3 bylo modelováno jako vetknutí, a to v úrovni pracovní spáry mezi dříkem opěry a základem opěry.

### 8.1.6 Zatěžovací stavy

Pro výpočet modální analýzy bylo nutné zadat takové zatížení výpočetního modelu konstrukce, které odpovídá stálému zatížení lávky. Mezi stálá zatížení v tomto případě patří zatížení vlastní tíhou, ostatní stálé zatížení (zde bylo uvažováno pouze zatížení zábradlím), předpětí předpínacími kabely a předpětí závěsů. Uvažovaná stálá zatížení jsou shrnuta v následující tab. 35 včetně označení zatěžovacích stavů tak, jak byly označeny ve výpočetním modelu.

Tab. 35 Seznam zatěžovacích stavů pro výpočet modální analýzy

Zatěžovací stav č.	Zatížení
1	Vlastní tíha generovaná programem
2	Zábradlí
3	Předpětí předpínacími kabely
4	Předpětí závěsů

Zatížením zábradlím bylo uvažováno jako liniové o intenzitě 0,5 kN/m, což je hodnota převzatá z [32]. Předpětí předpínacími kabely bylo zadáno jako zatížení typu „počáteční předpětí“ o intenzitě osově síly  $F_P = 3\,972,9$  kN. Tato hodnota byla vypočtena následujícím způsobem:

$$F_P = \sigma_P \cdot A_P = 1\,394 \cdot 150 \cdot 19 = 3\,972\,900 \text{ N} = 3\,972,9 \text{ kN} \quad (28)$$

kde  $\sigma_P$  je maximální napětí v předpínací výztuži po zakotvení, hodnota převzatá z [32]

$A_P$  je plocha předpínacího kabelu vypočtená jako plocha jednoho lana vynásobená počtem lan v kabelu, hodnoty byly převzaty z [32]

Předpětí závěsů bylo zadáno jako zatížení typu „počáteční předpětí“. Hodnoty jednotlivých osových sil v závěsech jsou podrobně uvedeny v následující tab. 36. Hodnoty osových sil v tab. 36 byly převzaty z [32] a jsou to hodnoty naměřené 11. 8. 2020.

Tab. 36 Hodnoty uvažovaných osových sil v závěsech ve výpočetním modelu

Označení závěsu dle RDS	Označení závěsu dle experimentu 15. 10. 2021	Průměrná síla v závěsu měření 11. 8. 2020 [kN]
1-1	01	283
1-2	02	238

Pokračování tab. 36

Označení závěsu dle RDS	Označení závěsu dle experimentu 15. 10. 2021	Průměrná síla v závěsu měření 11. 8. 2020 [kN]
1-3	03	268
1-4	04	240
1-5	05	200
1-6	06	211
1-7	07	174
1-8	08	115
1-9	09	123
1-10	10	83
1-11	11	66
1-12	12	110
2-5	13	27
2-4	14	96
2-3	15	171
2-2	16	440
2-1	17	1 627

## 8.2 Verifikace teoretického 3D modelu konstrukce

Verifikace, tj. ověření výstižnosti modelu, byla provedena následujícím způsobem: na teoretickém 3D modelu konstrukce byly vypočteny vlastní frekvence a s nimi spjaté vlastní tvary. Míra shody změřených a vypočtených vlastních frekvencí byla posuzována podle hodnoty mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  vypočtené podle vzorce (13) uvedeného v kapitole 4.3.4.1, pro větší přehlednost je zde uveden znovu:

$$\Delta_{(j)} = \frac{f_{(j)CAL} - f_{(k)OBS}}{f_{(j)CAL}} \cdot 100, \quad (29)$$

kde  $f_{(j)CAL}$  je vypočtená  $j$ -tá vlastní frekvence a  $f_{(k)OBS}$  je změřená  $k$ -tá vlastní frekvence.

Hodnoty mezních odchylek byly následně posouzeny podle kritérií uvedených v tab. 4. V normě [6] je uvedeno, že výše uvedená kritéria pro posouzení mezní odchylky se vztahují na posouzení nejméně prvních pěti vlastních frekvencí konstrukce, a to za předpokladu, že jsou mezi prvními pěti vlastními frekvencemi obsaženy i vlastní frekvence torzního a vodorovného charakteru. V následujících kapitolách bylo posouzení provedeno pro všechny vlastní frekvence zjištěné při experimentu, a to ze studijních důvodů.



Vypočtené vlastní frekvence jsou uvedeny v následující tab. 37, a to včetně posouzení mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6]. Do posouzení nebyla zahrnuta změřená vlastní frekvence  $f_{(7)} = 2,77$  Hz, protože ve výpočtu nebyl nalezen odpovídající vlastní tvar, a to jak vizuálně, tak i po ověření pomocí koeficientu korelace modální analýzy MAC (viz kapitola 8.5, tab. 49). Stejně tak nebyly do posouzení zahrnuty vypočtené vlastní tvary s dominantními pořadnicemi kmitání na pylonu, protože při experimentu nebyly na pylonu osazeny snímače, a tak nebylo možné vlastní tvary s tímto charakterem kmitání zachytit.

Tab. 37 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – verifikace 3D modelu

Pořad. číslo frekv. k	Experiment 15.10.2021		Výpočet		Posouzení			Vyho- vuje?
	$f_{(k)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$\Delta_{(j)}$	Přípustný interval $\Delta_{(j)}$		
						min	max	
1	0,72	Svislý ohyb.	0,604	Svislý ohyb.	-19,21 %	-15,0 %	10,0 %	×
2	0,92	Vodorovný	0,947	Vodorovný	2,85 %	-15,6 %	15,6 %	✓
3	1,19	Svislý ohyb.	1,050	Svislý ohyb.	-13,33 %	-15,7 %	15,7 %	✓
4	1,73	Svislý ohyb.	1,504	Svislý ohyb.	-15,03 %	-16,5 %	16,5 %	✓
5	2,11	Torzni	1,925	Torzni	-9,61 %	-17,2 %	17,2 %	✓
6	2,28	Svislý ohyb.	2,020	Svislý ohyb.	-12,87 %	-17,3 %	17,3 %	✓
8	2,84	Vodorovný	2,533	Torzni/Vod.	-12,12 %	-18,2 %	18,2 %	✓
9	2,98	Svislý ohyb.	2,548	Svislý ohyb.	-16,95 %	-18,2 %	18,2 %	✓
10	3,13	Svislý ohyb.	2,849	Svislý ohyb.	-9,86 %	-18,7 %	18,7 %	✓
11	3,41	Torzni	3,028	Torzni	-12,62 %	-19,0 %	19,0 %	✓
12	3,61	Svislý ohyb.	3,082	Svislý ohyb.	-17,13 %	-19,1 %	19,1 %	✓
13	4,20	Svislý ohyb.	3,589	Svislý ohyb.	-17,02 %	-19,9 %	19,9 %	✓
14	4,56	Torzni	3,941	Torzni	-15,71 %	-20,5 %	20,5 %	✓
15	4,89	Svislý ohyb.	4,041	Svislý ohyb.	-21,01 %	-20,7 %	20,7 %	×

Z posouzení hodnoty mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6] v tab. 37 je patrné, že hodnota první vlastní frekvence nevyhovuje podle daných kritérií. Proto bylo přistoupeno k identifikaci<sup>5</sup> teoretického 3D modelu, aby bylo dosaženo co největší míry shody změřených a vypočtených vlastních frekvencí.

<sup>5</sup> Při identifikaci se vybrané parametry modelu se upravují tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší míry shody výsledků výpočtu a experimentu

### 8.3 Jednotlivé kroky identifikace teoretického 3D modelu konstrukce

Při samotné identifikaci bylo postupováno po jednotlivých krocích. V každém jednotlivém kroku byla ve výpočetním modelu změněna jedna skutečnost. Poté byla posuzována míra ovlivnění výsledných vlastních frekvencí konstrukce touto změnou. Míra shody mezi výsledky experimentu a výpočtu byla posuzována podle hodnoty mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  vypočtené podle vzorce (13).

#### 8.3.1 Změna objemové tíhy betonu mostovky

Prvním krokem identifikace byla úprava objemové hmotnosti betonu mostovky. K tomuto kroku bylo přistoupeno z důvodu, že vypočtené vlastní frekvence konstrukce jsou ve většině případů nižší než změřené vlastní frekvence konstrukce. Protože je hodnota vlastní frekvence konstrukce nepřímo úměrná odmocnině z hmotnosti, snížením hmotnosti lze tedy docílit zvýšení hodnot vypočtených vlastních frekvencí.

Dle „Protokolu o stanovení meze úměrnosti a zbytkové pevnosti v tahu za ohybu betonu s kovovými vlákny“ [35], který byl autorce poskytnut společností Valbek, s r. o., je průměrná hodnota objemové hmotnosti betonu mostovky ve stáří 28 dní 2410 kg/m<sup>3</sup>. Hodnota objemové tíhy betonu byla tedy v programu upravena z původních 25 kN/m<sup>3</sup> na skutečných 24,1 kN/m<sup>3</sup>.

Tab. 38 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – první krok identifikace

Pořad. číslo frekv. k	Experiment 15.10.2021		Výpočet		Posouzení			
	$f_{(k)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$\Delta_{(j)}$	Přípustný interval $\Delta_{(j)}$		Vyho- vuje?
						min	max	
1	0,72	Svislý ohyb.	0,610	Svislý ohyb.	-18,03 %	-15,0 %	10,0 %	×
2	0,92	Vodorovný	0,957	Vodorovný	3,87 %	-15,6 %	15,6 %	✓
3	1,19	Svislý ohyb.	1,061	Svislý ohyb.	-12,16 %	-15,7 %	15,7 %	✓
4	1,73	Svislý ohyb.	1,520	Svislý ohyb.	-13,82 %	-16,5 %	16,5 %	✓
5	2,11	Torzní	1,936	Torzní	-8,99 %	-17,2 %	17,2 %	✓
6	2,28	Svislý ohyb.	2,041	Svislý ohyb.	-11,71 %	-17,3 %	17,3 %	✓
8	2,84	Vodorovný	2,560	Torzní/Vod.	-10,94 %	-18,2 %	18,2 %	✓
9	2,98	Svislý ohyb.	2,575	Svislý ohyb.	-15,73 %	-18,2 %	18,2 %	✓
10	3,13	Svislý ohyb.	2,881	Svislý ohyb.	-8,64 %	-18,7 %	18,7 %	✓
11	3,41	Torzní	3,047	Torzní	-11,91 %	-19,0 %	19,0 %	✓
12	3,61	Svislý ohyb.	3,113	Svislý ohyb.	-15,97 %	-19,1 %	19,1 %	✓

Pokračování tab. 38

Pořad. číslo frekv. k	Experiment 15.10.2021		Výpočet		Posouzení			
	$f_{(k)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$\Delta_{(j)}$	Přípustný interval $\Delta_{(j)}$		Vyhovuje?
						min	max	
13	4,20	Svislý ohyb.	3,629	Svislý ohyb.	-15,73 %	-19,9 %	19,9 %	✓
14	4,56	Torzní	3,966	Torzní	-14,98 %	-20,5 %	20,5 %	✓
15	4,89	Svislý ohyb.	4,086	Svislý ohyb.	-19,68 %	-20,7 %	20,7 %	✓

V tab. 38 jsou uvedeny vypočtené vlastní frekvence, a to včetně posouzení mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6]. Míra ovlivnění výsledků změnou objemové tíhy betonu mostovky je zřetelná z následující tab. 39. Zelenou barvou jsou označeny takové vlastní frekvence, u nichž nastalo zlepšení výsledků, tím se rozumí, že vypočtené vlastní frekvence konstrukce se blíží ke změřeným vlastním frekvencím konstrukce více než při předchozím kroku identifikace. Naopak červenou barvou jsou označeny takové vlastní frekvence, u nichž nastalo zhoršení výsledků, tím se rozumí, že vypočtené vlastní frekvence konstrukce se odchyľují od změřených vlastních frekvencí konstrukce více než při předchozím kroku identifikace.

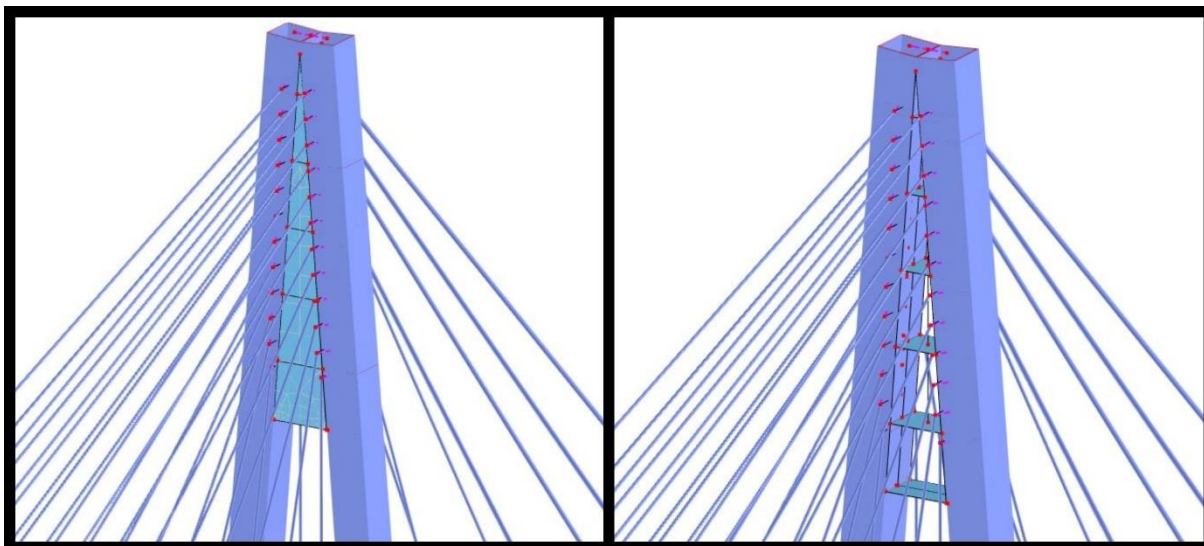
Tab. 39 Porovnání zlepšení/zhoršení výsledků výpočtu vlastních frekvencí konstrukce – první krok identifikace

Pořadové číslo frekvence k	Experiment 15. 10. 2021	Přechozí krok identifikace	$f_{(j),CAL,0}/f_{(k),OBS}$	Současný krok identifikace	$f_{(j),CAL,1}/f_{(k),OBS}$	Rozdíl poměrů frekvencí
	$f_{(k),OBS}$ [Hz]			$f_{(j),CAL,0}$ [Hz]		
1	0,72	0,604	83,89 %	0,610	84,72 %	0,83 %
2	0,92	0,947	102,93 %	0,957	104,02 %	-1,09 %
3	1,19	1,05	88,24 %	1,061	89,16 %	0,92 %
4	1,73	1,504	86,94 %	1,520	87,86 %	0,92 %
5	2,11	1,925	91,23 %	1,936	91,75 %	0,52 %
6	2,28	2,020	88,60 %	2,041	89,52 %	0,92 %
8	2,84	2,533	89,19 %	2,560	90,14 %	0,95 %
9	2,98	2,548	85,50 %	2,575	86,41 %	0,91 %
10	3,13	2,849	91,02 %	2,881	92,04 %	1,02 %
11	3,41	3,028	88,80 %	3,047	89,35 %	0,56 %
12	3,61	3,082	85,37 %	3,113	86,23 %	0,86 %
13	4,20	3,589	85,45 %	3,629	86,40 %	0,95 %
14	4,56	3,941	86,43 %	3,966	86,97 %	0,55 %
15	4,89	4,041	82,64 %	4,086	83,56 %	0,92 %

Z tab. 39 je zřejmé, že úvaha o snížení objemové hmotnosti byla správná. Hodnoty vypočtených vlastních frekvencí konstrukce se zvýšily, stále však platí, že první vlastní frekvence konstrukce z hlediska mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6] nevyhovuje.

### 8.3.2 Přesnější modelování hlavy pylonu

Další možností, jak zvýšit hodnoty vlastních frekvencí konstrukce při výpočtu, je kromě snížení hmotnosti také zvýšení tuhosti konstrukce. Ke zvýšení tuhosti konstrukce bylo přistoupeno ve druhém kroku identifikace výpočtového modelu, a to konkrétně přesnějším modelováním hlavy pylonu, kde byla v prvotním výpočtu zanedbána řada detailů, které by mohly mít vliv na výslednou tuhost.



Obr. 72 Podrobnější modelování hlavy pylonu v rámci druhého kroku identifikace modelu

**Vlevo:** modelovaná hlava pylonu včetně čelního plechu (použito ve výpočtu)

**vpravo:** modelovaná hlava pylonu bez čelního plechu (pro zviditelnění prvků, které nejsou za čelním plechem na obrázku vlevo vidět)

V rámci tvorby modelu byla v hlavě pylonu zanedbána řada plechů, proto byly při podrobnějším modelování hlavy do modelu doplněny, a to jako stěnodeskové prvky o tloušťce 20 mm z oceli S355J2, což odpovídá specifikaci uvedené v [32].

Tab. 40 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – druhý krok identifikace

Pořad. číslo frekv. k	Experiment 15.10.2021		Výpočet		Posouzení			
	$f_{(k)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$\Delta_{(j)}$	Přípustný interval $\Delta_{(j)}$		Vyho- vuje?
						min	max	
1	0,72	Svislý ohyb.	0,610	Svislý ohyb.	-18,03 %	-15,0 %	10,0 %	×
2	0,92	Vodorovný	0,957	Vodorovný	3,87 %	-15,6 %	15,6 %	✓
3	1,19	Svislý ohyb.	1,063	Svislý ohyb.	-11,95 %	-15,7 %	15,7 %	✓
4	1,73	Svislý ohyb.	1,521	Svislý ohyb.	-13,74 %	-16,5 %	16,5 %	✓
5	2,11	Torzní	1,929	Torzní	-9,38 %	-17,2 %	17,2 %	✓
6	2,28	Svislý ohyb.	2,041	Svislý ohyb.	-11,71 %	-17,3 %	17,3 %	✓
8	2,84	Vodorovný	2,560	Torzní/Vod.	-10,94 %	-18,2 %	18,2 %	✓
9	2,98	Svislý ohyb.	2,573	Svislý ohyb.	-15,82 %	-18,2 %	18,2 %	✓
10	3,13	Svislý ohyb.	2,881	Svislý ohyb.	-8,64 %	-18,7 %	18,7 %	✓
11	3,41	Torzní	3,042	Torzní	-12,10 %	-19,0 %	19,0 %	✓
12	3,61	Svislý ohyb.	3,110	Svislý ohyb.	-16,08 %	-19,1 %	19,1 %	✓
13	4,20	Svislý ohyb.	3,629	Svislý ohyb.	-15,73 %	-19,9 %	19,9 %	✓
14	4,56	Torzní	3,962	Torzní	-15,09 %	-20,5 %	20,5 %	✓
15	4,89	Svislý ohyb.	4,086	Svislý ohyb.	-19,68 %	-20,7 %	20,7 %	✓

V tab. 40 jsou uvedeny vypočtené vlastní frekvence, a to včetně posouzení mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6]. Míra ovlivnění výsledků podrobnějším modelováním pylonu je zřetelná z následující tab. 41.

Tab. 41 Porovnání zlepšení/zhoršení výsledků výpočtu vlastních frekvencí konstrukce – druhý krok identifikace

Pořadové číslo frekvence k	Experiment 15. 10. 2021	Přechozí krok identifikace	$f_{(j),CAL,1}/f_{(k),OBS}$	Současný krok identifikace	$f_{(j),CAL,2}/f_{(k),OBS}$	Rozdíl poměrů frekvencí
	$f_{(k),OBS}$ [Hz]	$f_{(j),CAL,1}$ [Hz]		$f_{(j),CAL,2}$ [Hz]		
1	0,72	0,610	84,72 %	0,610	84,72 %	0,00 %
2	0,92	0,957	104,02 %	0,957	104,02 %	0,00 %
3	1,19	1,061	89,16 %	1,063	89,33 %	0,17 %
4	1,73	1,52	87,86 %	1,521	87,92 %	0,06 %
5	2,11	1,936	91,75 %	1,929	91,42 %	-0,33 %
6	2,28	2,041	89,52 %	2,041	89,52 %	0,00 %
8	2,84	2,560	90,14 %	2,560	90,14 %	0,00 %
9	2,98	2,575	86,41 %	2,573	86,34 %	-0,07 %

Pokračování tab. 41

Pořadové číslo frekvence k	Experiment 15. 10. 2021 $f_{(k),OBS}$ [Hz]	Předchozí krok identifikace $f_{(j),CAL,1}$ [Hz]	$f_{(j),CAL,1}/f_{(k),OBS}$	Současný krok identifikace $f_{(j),CAL,2}$ [Hz]	$f_{(j),CAL,2}/f_{(k),OBS}$	Rozdíl poměrů frekvencí
10	3,13	2,881	92,04 %	2,881	92,04 %	0,00 %
11	3,41	3,047	89,35 %	3,042	89,21 %	-0,15 %
12	3,61	3,113	86,23 %	3,110	86,15 %	-0,08 %
13	4,20	3,629	86,40 %	3,629	86,40 %	0,00 %
14	4,56	3,966	86,97 %	3,962	86,89 %	-0,09 %
15	4,89	4,086	83,56 %	4,086	83,56 %	0,00 %

Z tab. 41 je patrné, že podrobnější modelování pylonu nevedlo ke znatelnému ovlivnění výsledků, a když už se změna alespoň minimálně projevila (např. u první vlastní frekvence s torzním charakterem kmitání), vedla ke zhoršení výsledků. Proto v dalším kroku identifikace tato úprava nebyla použita, byla tedy dále upravována verze modelu z prvního kroku. Stále platí, že první vlastní frekvence konstrukce z hlediska mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6] nevyhovuje.

### 8.3.3 Změna osových sil v závěsech

Dalším krokem identifikace výpočetního modelu konstrukce byla úprava sil v závěsech. Byly použity hodnoty, které byly vypočteny frekvenční metodou ze strunové teorie (v rámci této diplomové práce je výpočet uveden v kapitole 7.3.3.2). V následující tab. 42 jsou uvedeny síly v závěsech, které byly použity při prvotním výpočtu, a dále síly, které byly použity v rámci třetího kroku identifikace modelu. Pro výpočet byla použita průměrná hodnota síly vypočtené ze strunové teorie, a to ve smyslu průměru z hodnot sil v závěsech na levé a pravé straně.

Tab. 42 Hodnoty sil v závěsech, které byly použity v rámci třetího kroku identifikace

Označení závěsu dle RDS [32]	Označení závěsu dle experimentu 15. 10. 2021	Nultý krok identifikace	Třetí krok identifikace
		Průměrná síla v závěsu měření 11. 8. 2020 [kN]	Vypočtená síla v závěsu dle strunové teorie [kN]
1-1	01	283	255,42
1-2	02	238	224,50
1-3	03	268	262,13
1-4	04	240	245,92

Pokračování tab. 42

Označení závěsu dle RDS [32]	Označení závěsu dle experimentu 15. 10. 2021	Nultý krok identifikace	Třetí krok identifikace
		Průměrná síla v závěsu měření 11. 8. 2020 [kN]	Vypočtená síla v závěsu dle strunové teorie [kN]
1–5	05	200	204,34
1–6	06	211	215,98
1–7	07	174	184,74
1–8	08	115	122,36
1–9	09	123	137,41
1–10	10	83	93,34
1–11	11	66	76,33
1–12	12	110	98,49
2–5	13	27	32,86
2–4	14	96	87,99
2–3	15	171	153,64
2–2	16	440	491,61
2–1	17	1 627	1 827,80

V tab. 43 jsou uvedeny vypočtené vlastní frekvence, a to včetně posouzení mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6].

Tab. 43 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – třetí krok identifikace

Pořad. číslo frekv. k	Experiment 15.10.2021		Výpočet		Posouzení			
	$f_{(k)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$\Delta_{(j)}$	Přípustný interval $\Delta_{(j)}$		Vyhovuje?
						min	max	
1	0,72	Svislý ohyb.	0,610	Svislý ohyb.	-18,03 %	-15,0 %	10,0 %	×
2	0,92	Vodorovný	0,957	Vodorovný	3,87 %	-15,6 %	15,6 %	✓
3	1,19	Svislý ohyb.	1,061	Svislý ohyb.	-12,16 %	-15,7 %	15,7 %	✓
4	1,73	Svislý ohyb.	1,520	Svislý ohyb.	-13,82 %	-16,5 %	16,5 %	✓
5	2,11	Torzni	1,936	Torzni	-8,99 %	-17,2 %	17,2 %	✓
6	2,28	Svislý ohyb.	2,041	Svislý ohyb.	-11,71 %	-17,3 %	17,3 %	✓
8	2,84	Vodorovný	2,560	Torzni/Vod.	-10,94 %	-18,2 %	18,2 %	✓
9	2,98	Svislý ohyb.	2,575	Svislý ohyb.	-15,73 %	-18,2 %	18,2 %	✓
10	3,13	Svislý ohyb.	2,881	Svislý ohyb.	-8,64 %	-18,7 %	18,7 %	✓
11	3,41	Torzni	3,047	Torzni	-11,91 %	-19,0 %	19,0 %	✓
12	3,61	Svislý ohyb.	3,113	Svislý ohyb.	-15,97 %	-19,1 %	19,1 %	✓

## Pokračování tab. 43

Pořad. číslo frekv. k	Experiment 15.10.2021		Výpočet		Posouzení			
	$f_{(k)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$\Delta_{(j)}$	Přípustný interval $\Delta_{(j)}$		$f_{(k)}$ [Hz]
						min	max	
13	4,20	Svislý ohyb.	3,629	Svislý ohyb.	-15,73 %	-19,9 %	19,9 %	✓
14	4,56	Torzní	3,966	Torzní	-14,98 %	-20,5 %	20,5 %	✓
15	4,89	Svislý ohyb.	4,086	Svislý ohyb.	-19,68 %	-20,7 %	20,7 %	✓

Míra ovlivnění výsledků vlivem změny osových sil v závěsech je zřetelná z následující tab. 44.

Tab. 44 Porovnání zlepšení/zhoršení výsledků výpočtu vlastních frekvencí konstrukce – třetí krok identifikace

Pořadové číslo frekvence k	Experiment 15. 10. 2021 $f_{(k),OBS}$ [Hz]	Přechozí krok identifikace $f_{(j),CAL,1}$ [Hz]	$f_{(j),CAL,1}/f_{(k),OBS}$	Současný krok identifikace $f_{(j),CAL,3}$ [Hz]	$f_{(j),CAL,3}/f_{(k),OBS}$	Rozdíl poměrů frekvencí
1	0,72	0,610	84,72 %	0,610	84,72 %	0,00 %
2	0,92	0,957	104,02 %	0,957	104,02 %	0,00 %
3	1,19	1,061	89,16 %	1,061	89,16 %	0,00 %
4	1,73	1,520	87,86 %	1,520	87,86 %	0,00 %
5	2,11	1,936	91,75 %	1,936	91,75 %	0,00 %
6	2,28	2,041	89,52 %	2,041	89,52 %	0,00 %
8	2,84	2,560	90,14 %	2,560	90,14 %	0,00 %
9	2,98	2,575	86,41 %	2,575	86,41 %	0,00 %
10	3,13	2,881	92,04 %	2,881	92,04 %	0,00 %
11	3,41	3,047	89,35 %	3,047	89,35 %	0,00 %
12	3,61	3,113	86,23 %	3,113	86,23 %	0,00 %
13	4,20	3,629	86,40 %	3,629	86,40 %	0,00 %
14	4,56	3,966	86,97 %	3,966	86,97 %	0,00 %
15	4,89	4,086	83,56 %	4,086	83,56 %	0,00 %

Z tab. 44 je patrné, že změna osových sil v závěsech neměla vůbec žádný vliv. Stále platí, že první vlastní frekvence konstrukce z hlediska mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6] nevyhovuje.



## 8.3.4 Změna podepření

Dalším krokem identifikace výpočetního modelu konstrukce byla úprava podepření konstrukce, a to konkrétně nahrazení podélně posuvných kloubů pevnými klouby. Jak vyplývá ze zkušeností vedoucího práce prof. Ing. Michala Poláka, CSc., při dynamickém namáhání konstrukce může být chování podepření tužší než při namáhání statickém, a to z důvodu, že při dynamickém namáhání konstrukce jsou mnohdy síly v ložiscích tak malé, že není překonáno tření.

Tab. 45 Výpočet vlastních frekvencí konstrukce – čtvrtý krok identifikace

Pořad. číslo frekv. k	Experiment 15.10.2021		Výpočet		Posouzení			
	$f_{(k)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	$\Delta_{(j)}$	Přípustný interval $\Delta_{(j)}$		Vyho- vuje?
						min	max	
1	0,72	Svislý ohyb.	0,775	Svislý ohyb.	7,10 %	-15,0 %	10,0 %	✓
2	0,92	Vodorovný	0,976	Vodorovný	5,74 %	-15,3 %	15,3 %	✓
3	1,19	Svislý ohyb.	1,118	Svislý ohyb.	-6,44 %	-15,4 %	15,4 %	✓
4	1,73	Svislý ohyb.	1,617	Svislý ohyb.	-6,99 %	-16,1 %	16,1 %	✓
5	2,11	Torzní	1,955	Torzní	-7,93 %	-16,5 %	16,5 %	✓
6	2,28	Svislý ohyb.	2,088	Svislý ohyb.	-9,20 %	-16,7 %	16,7 %	✓
8	2,84	Vodorovný	2,596	Torzní/Vod.	-9,40 %	-17,3 %	17,3 %	✓
9	2,98	Svislý ohyb.	2,633	Svislý ohyb.	-13,18 %	-17,4 %	17,4 %	✓
10	3,13	Svislý ohyb.	2,933	Svislý ohyb.	-6,72 %	-17,8 %	17,8 %	✓
11	3,41	Torzní	3,076	Torzní	-10,86 %	-18,0 %	18,0 %	✓
12	3,61	Svislý ohyb.	3,128	Svislý ohyb.	-15,41 %	-18,0 %	18,0 %	✓
13	4,20	Svislý ohyb.	3,672	Svislý ohyb.	-14,38 %	-18,7 %	18,7 %	✓
14	4,56	Torzní	3,971	Torzní	-14,83 %	-19,1 %	19,1 %	✓
15	4,89	Svislý ohyb.	4,126	Svislý ohyb.	-18,52 %	-19,3 %	19,3 %	✓

Míra ovlivnění výsledků vlivem změny podepření je zřetelná z následující tab. 46.

Tab. 46 Porovnání zlepšení/zhoršení výsledků výpočtu vlastních frekvencí konstrukce – čtvrtý krok identifikace

Pořadové číslo frekvence k	Experiment 15. 10. 2021 $f_{(k),OBS}$ [Hz]	Přechozí krok identifikace $f_{(j),CAL,3}$ [Hz]	$f_{(j),CAL,3}/f_{(k),OBS}$	Současný krok identifikace $f_{(j),CAL,4}$ [Hz]	$f_{(j),CAL,4}/f_{(k),OBS}$	Rozdíl poměrů frekvencí
1	0,72	0,610	84,72 %	0,775	107,64 %	7,64 %
2	0,92	0,957	104,02 %	0,976	106,09 %	-2,07 %
3	1,19	1,061	89,16 %	1,118	93,95 %	4,79 %
4	1,73	1,520	87,86 %	1,617	93,47 %	5,61 %
5	2,11	1,936	91,75 %	1,955	92,65 %	0,90 %
6	2,28	2,041	89,52 %	2,088	91,58 %	2,06 %
8	2,84	2,560	90,14 %	2,596	91,41 %	1,27 %
9	2,98	2,575	86,41 %	2,633	88,36 %	1,95 %
10	3,13	2,881	92,04 %	2,933	93,71 %	1,66 %
11	3,41	3,047	89,35 %	3,076	90,21 %	0,85 %
12	3,61	3,113	86,23 %	3,128	86,65 %	0,42 %
13	4,20	3,629	86,40 %	3,672	87,43 %	1,02 %
14	4,56	3,966	86,97 %	3,971	87,08 %	0,11 %
15	4,89	4,086	83,56 %	4,126	84,38 %	0,82 %

Z tab. 46 je patrné, že změna podepření konstrukce vedla u většiny vlastních frekvencí ke zlepšení výsledků. Největší změna nastala u první vlastní frekvence. Tato skutečnost je velmi příznivá, protože první vlastní frekvence po této úpravě modelu již vyhovuje (viz tab. 45) ve smyslu mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6].

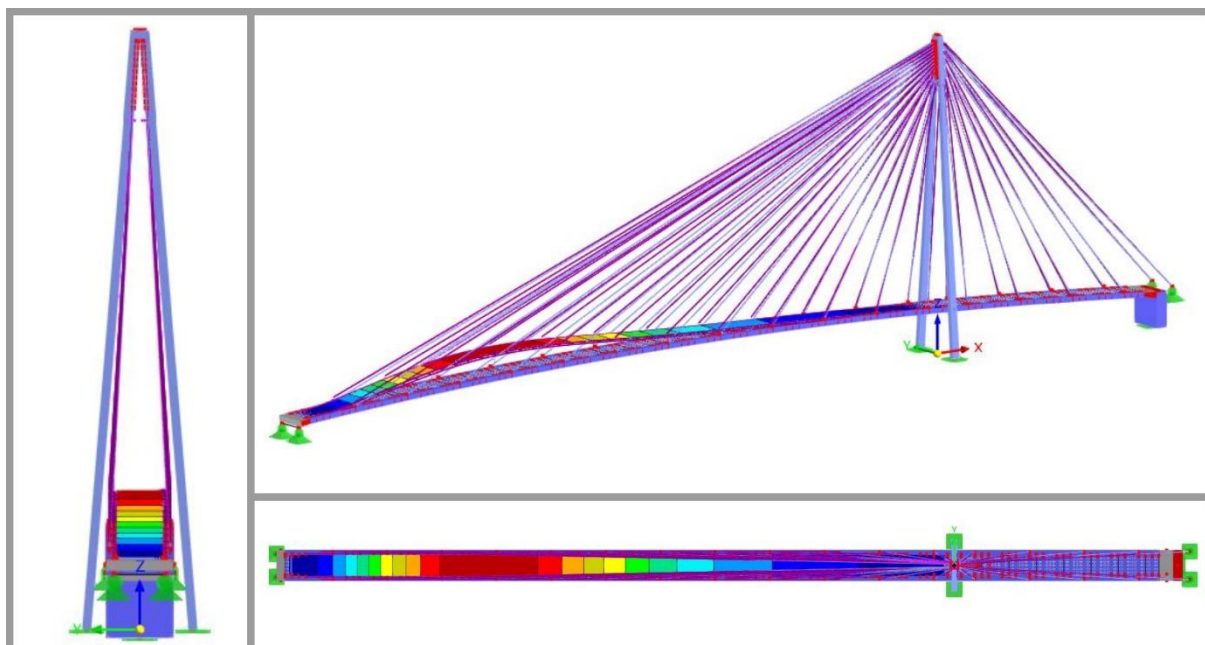
#### 8.4 Vypočtené vlastní tvary kmitání konstrukce

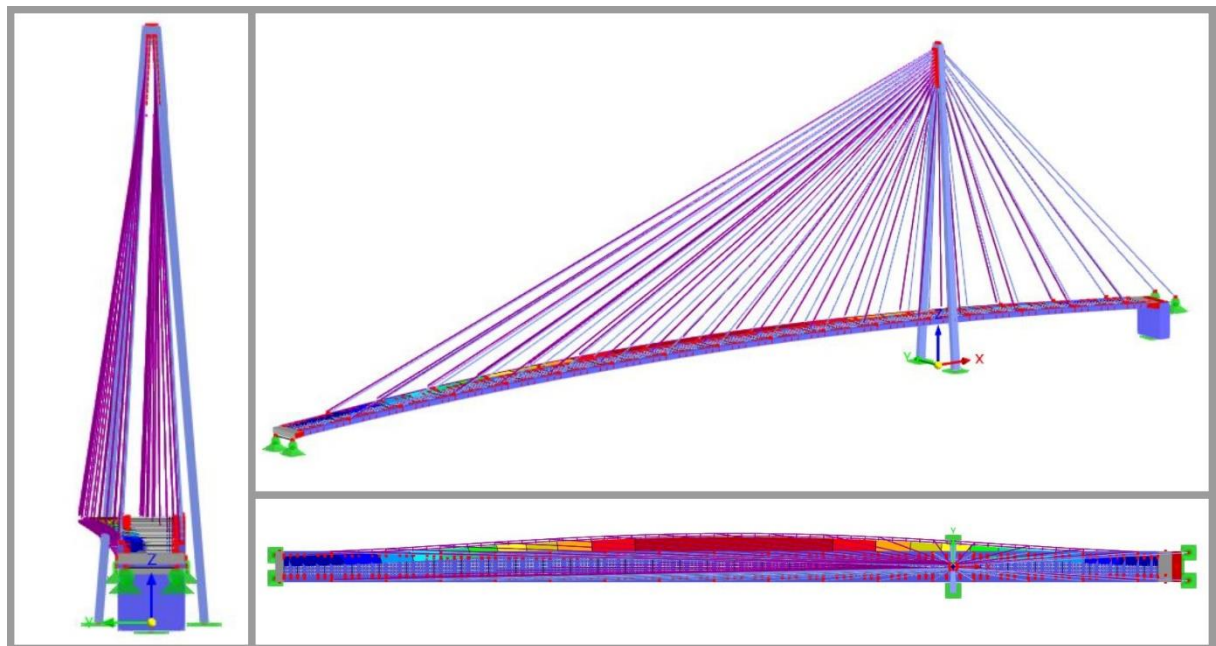
Přehled vypočtených vlastních frekvencí a charakterů příslušných vlastních tvarů je v následující tab. 47. Vybrané vypočtené vlastní tvary jsou vykresleny na obr. 73 až obr. 86.

Vypočtené vlastní tvary s dominantními pořadnicemi kmitání na pylonu nebyly do porovnání shody se změřenými vlastními tvary konstrukce zahrnuty, proto nejsou ani na následujících obrázcích.

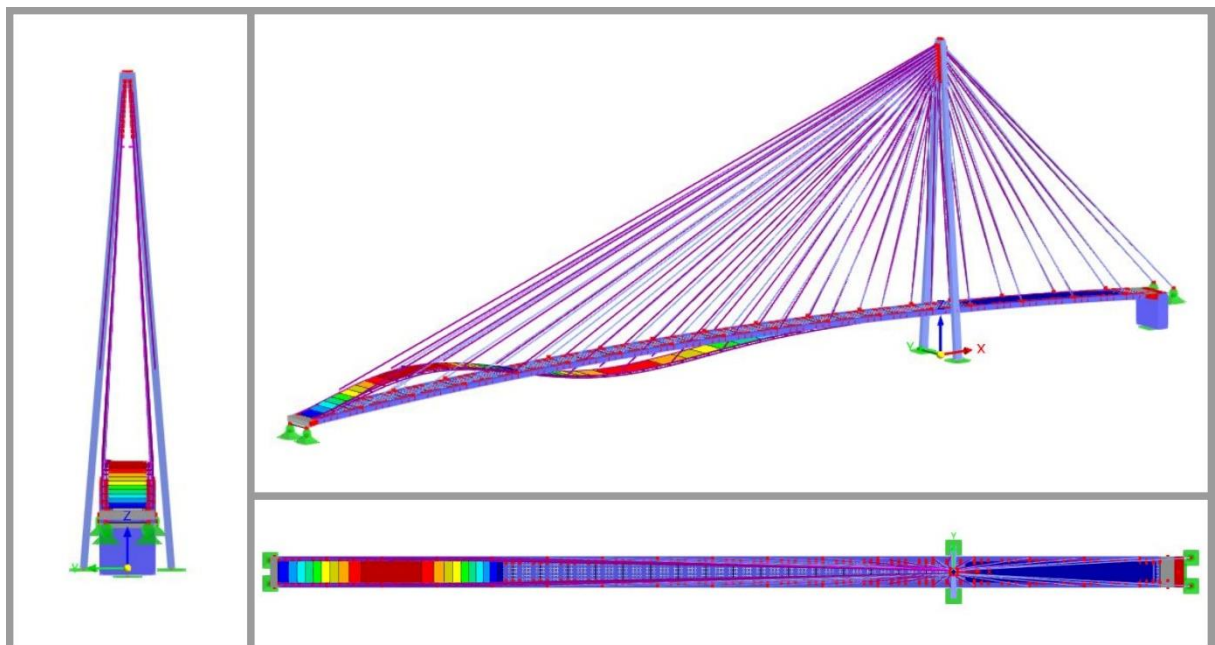
Tab. 47 Přehled vypočtených vlastních frekvencí a popis charakteru odpovídajících vlastních tvarů

Pořadové číslo frekvence j	Vlastní frekvence $f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru kmitání
1	0,775	Svislý ohybový
2	0,976	Vodorovný
3	1,118	Svislý ohybový
4	1,617	Svislý ohybový
5	1,822	Pylon
6	1,955	Torzní
7	2,088	Svislý ohybový
8	2,596	Torzní/Vodorovný
9	2,633	Svislý ohybový
10	2,933	Svislý ohybový
11	3,076	Torzní
12	3,128	Svislý ohybový
13	3,304	Pylon
14	3,672	Svislý ohybový
15	3,971	Torzní
16	4,126	Svislý ohybový

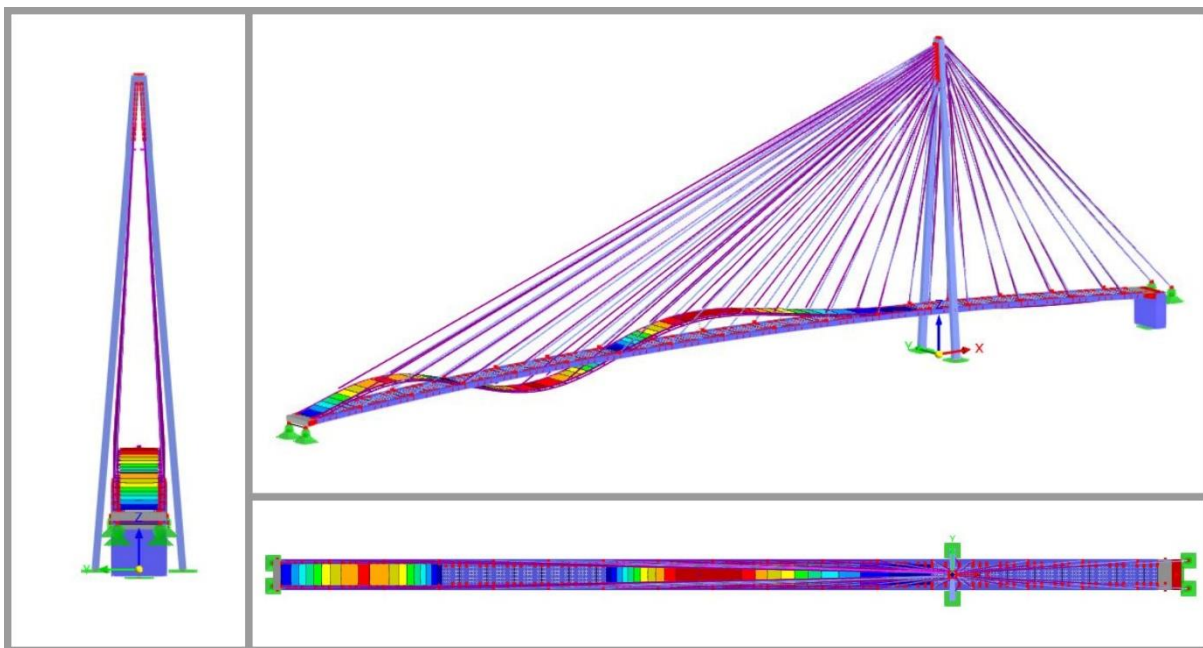
Obr. 73 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(1)}=0,775$  Hz



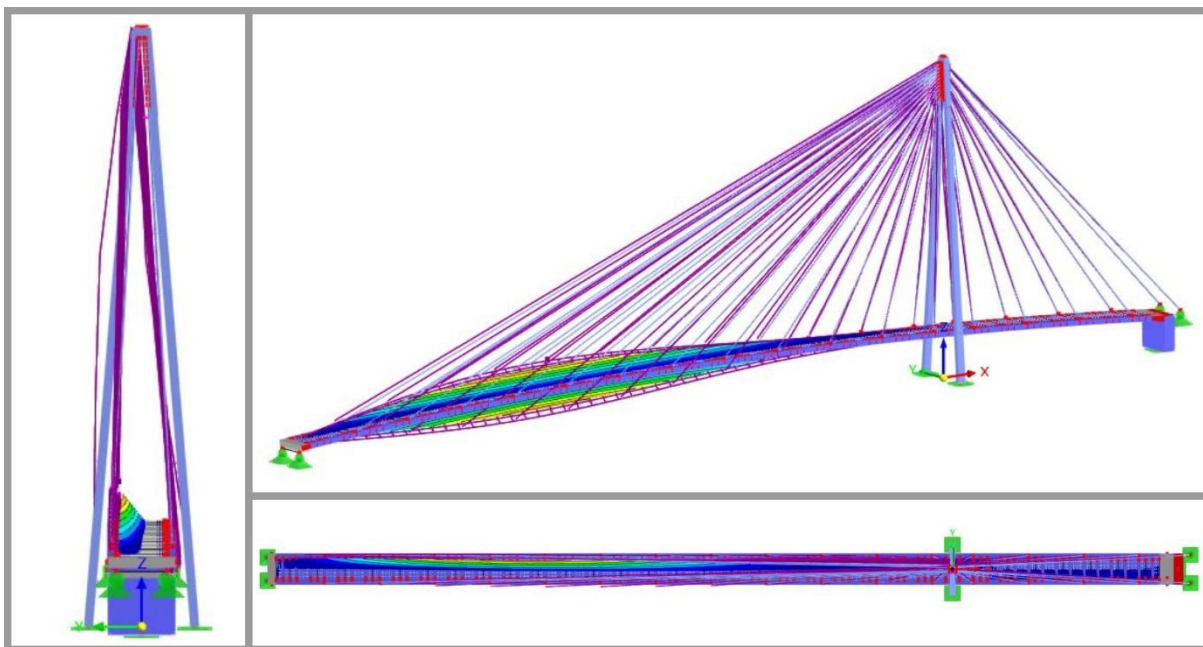
Obr. 74 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(2)}=0,976$  Hz



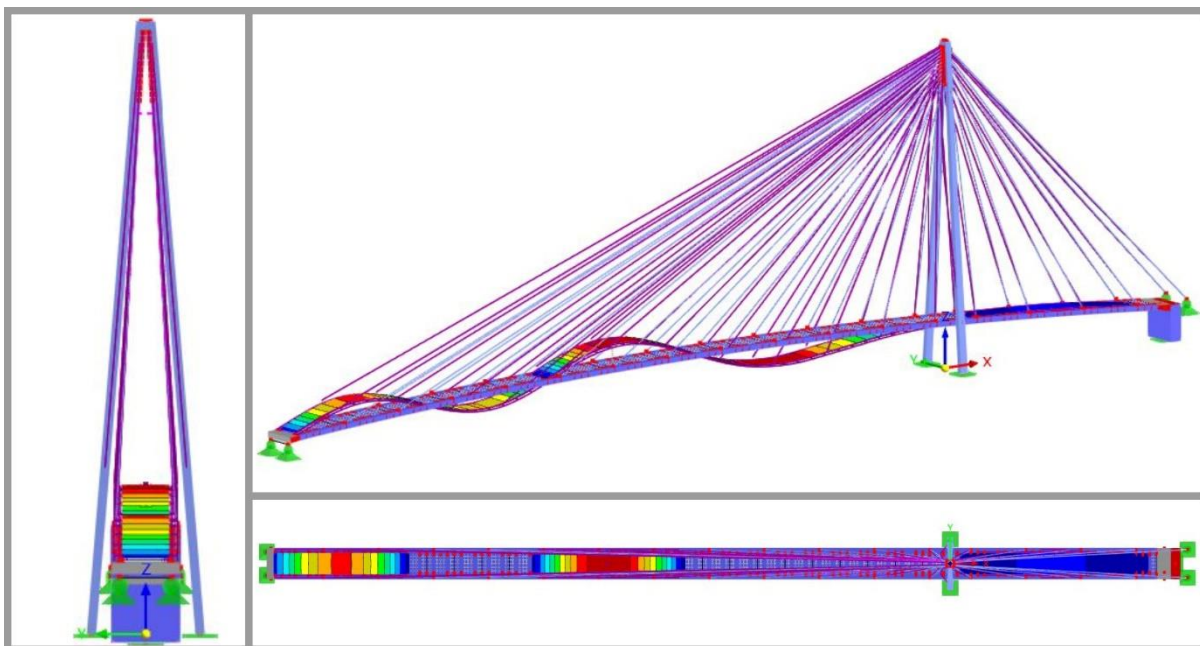
Obr. 75 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(3)}=1,118$  Hz



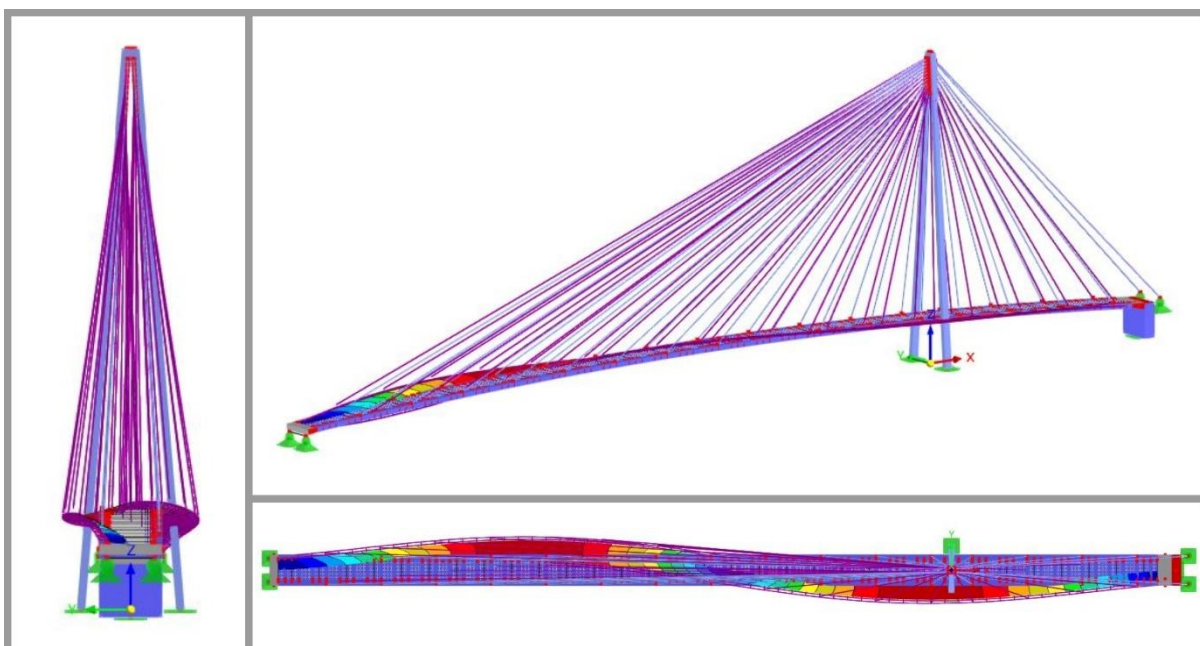
Obr. 76 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(4)}=1,617$  Hz



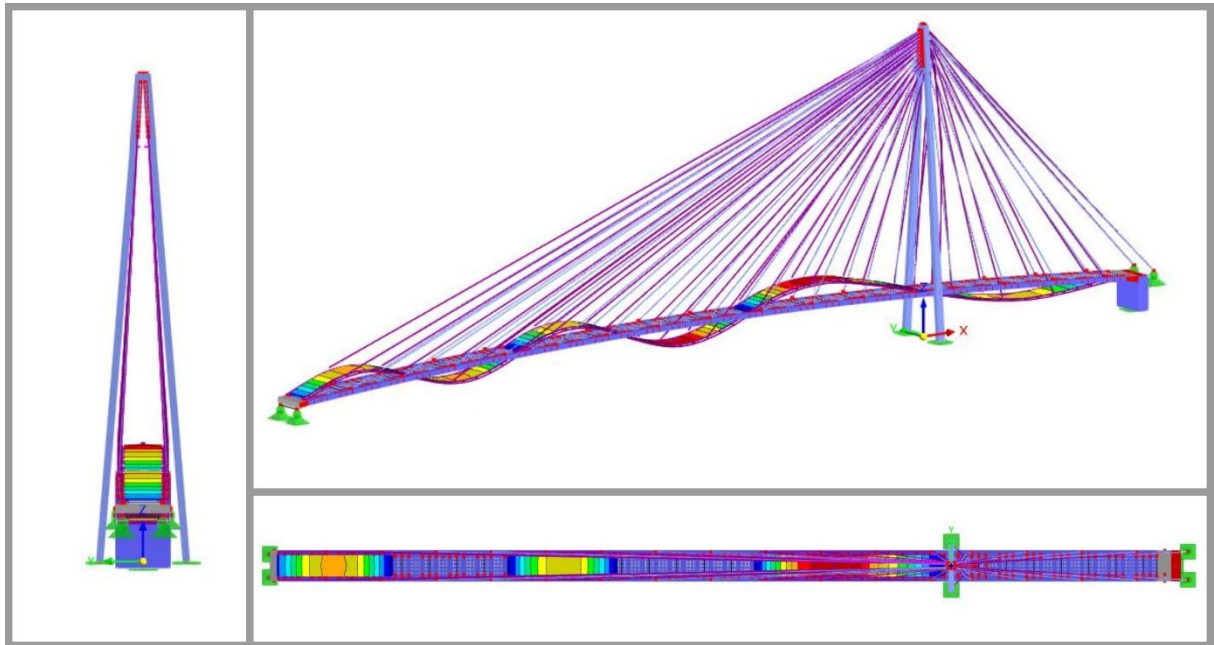
Obr. 77 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(6)}=1,955$  Hz



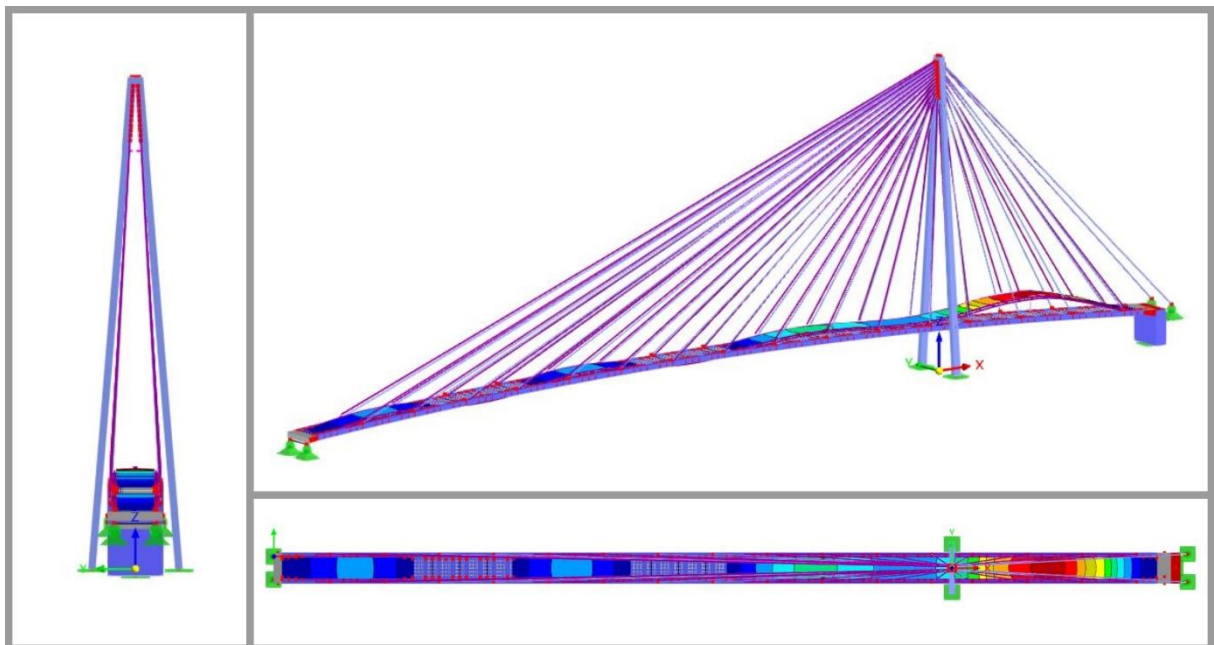
Obr. 78 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(7)}=2,088$  Hz



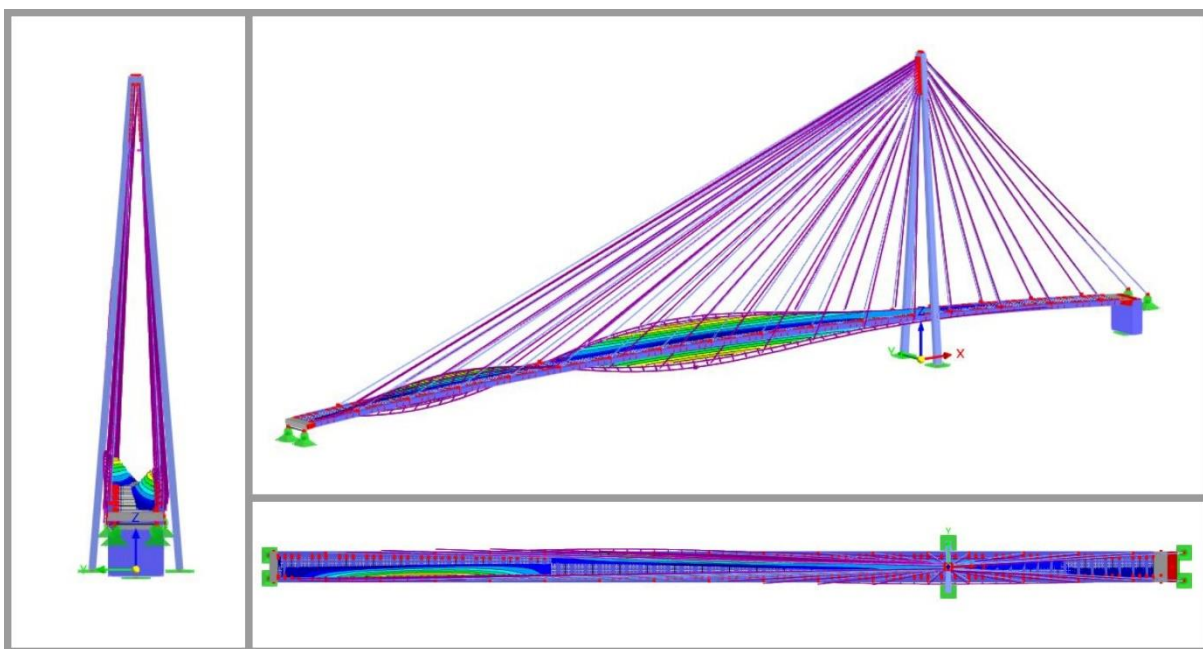
Obr. 79 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(8)}=2,596$  Hz



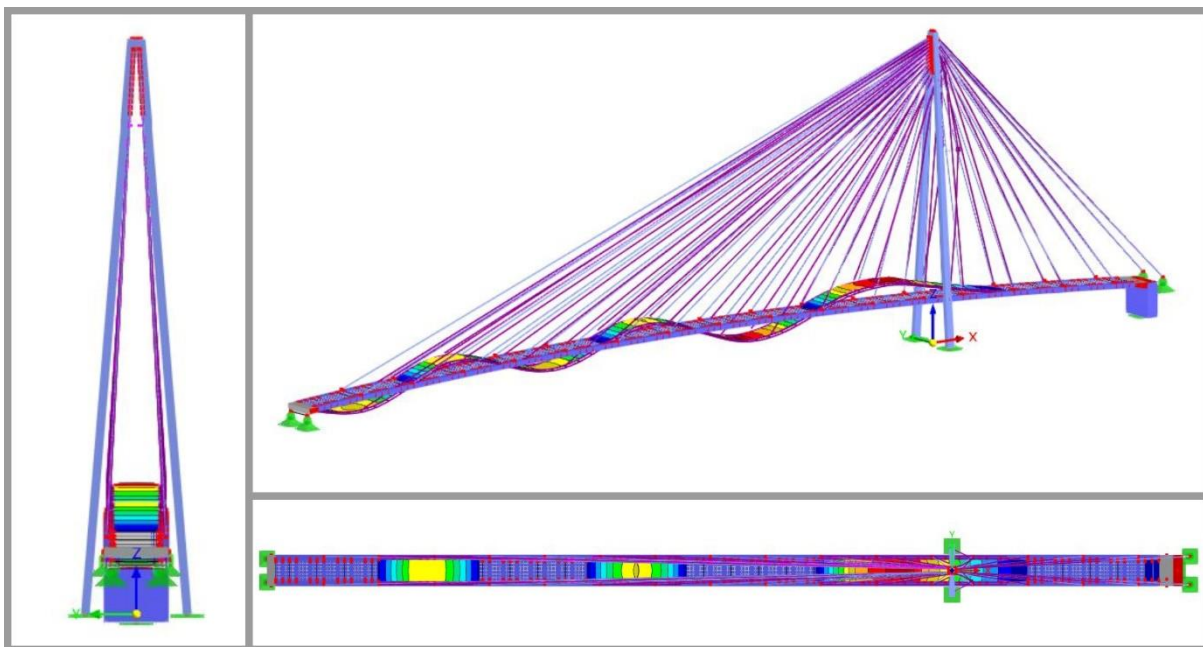
Obr. 80 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(9)}=2,633$  Hz



Obr. 81 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(10)}=2,933$  Hz

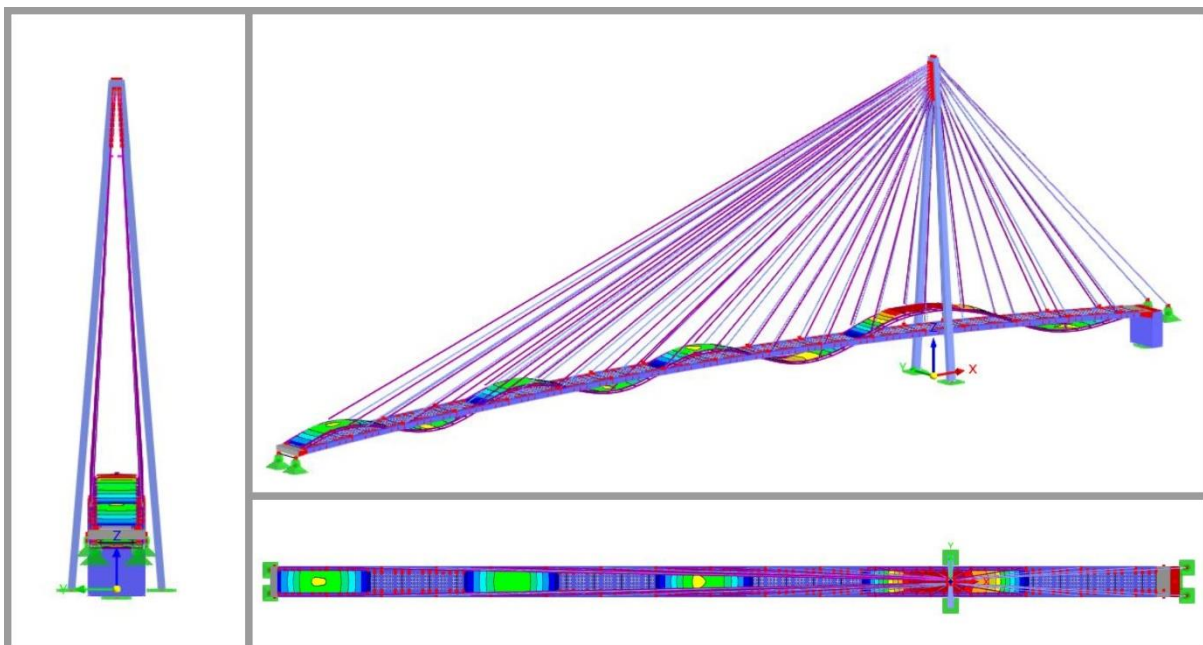


Obr. 82 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(11)}=3,076$  Hz

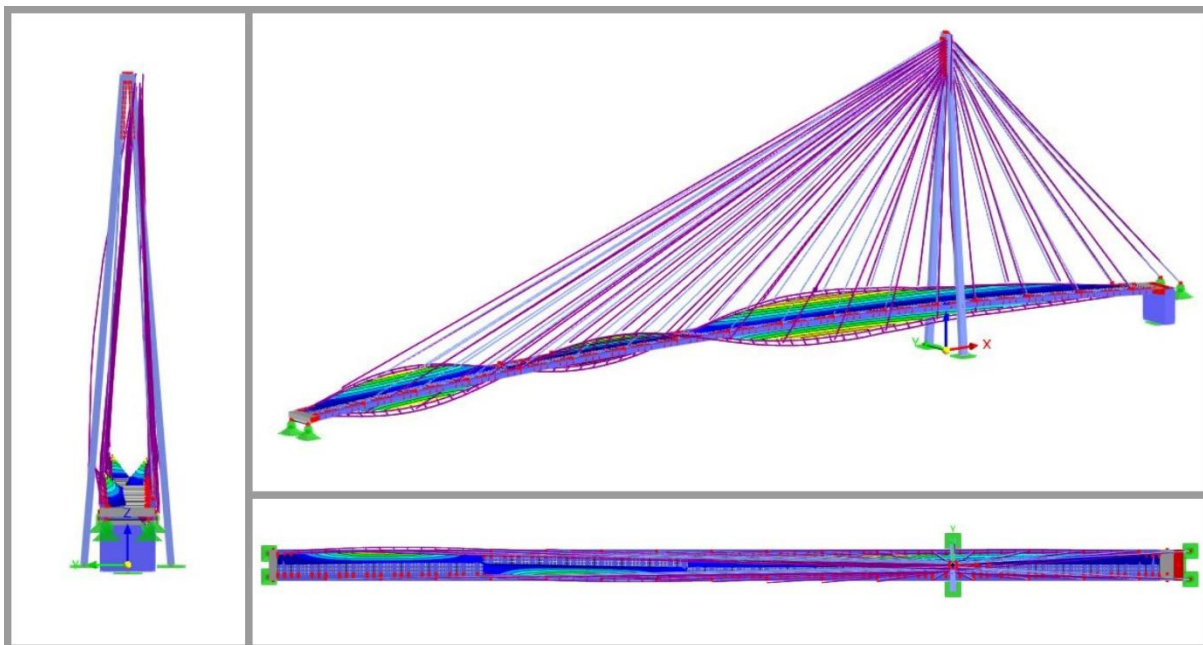


Obr. 83 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(12)}=3,128$  Hz

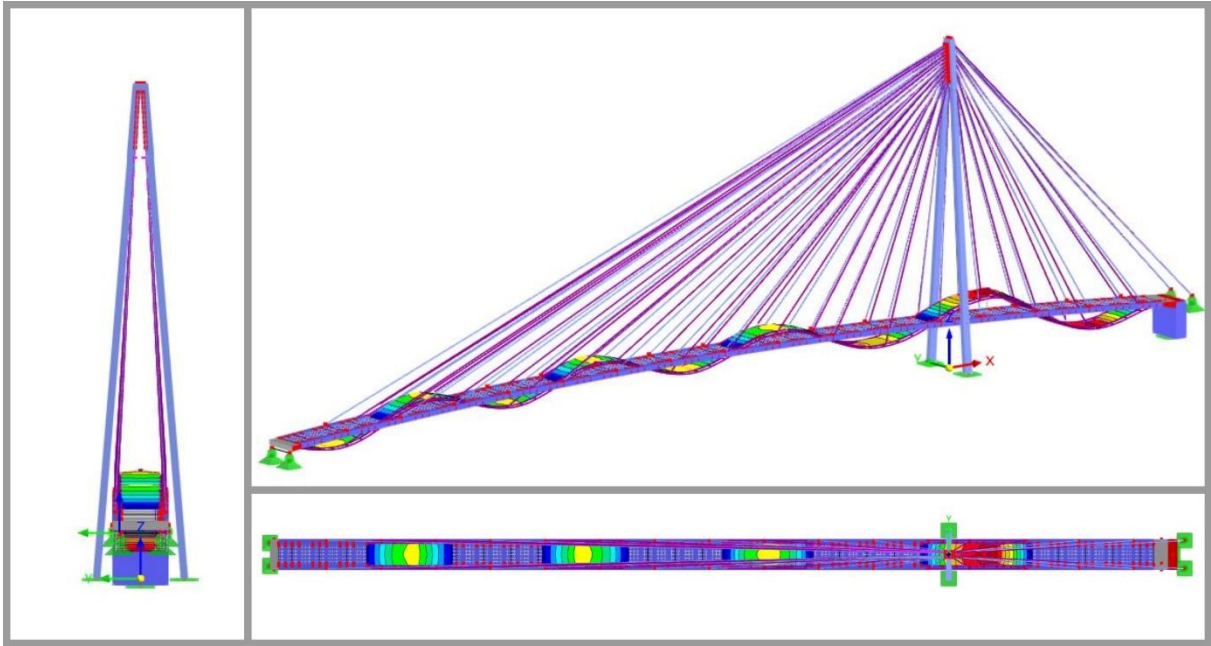




Obr. 84 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(14)}=3,672$  Hz



Obr. 85 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(15)}=3,971$  Hz



Obr. 86 Vypočtený vlastní tvar kmitání konstrukce spjatý s vlastní frekvencí  $f_{(16)}=4,126$  Hz

## 8.5 Shoda vypočtených a změřených vlastních tvarů posouzená pomocí koeficientu MAC

Vzorec pro výpočet koeficientu korelace modální analýzy MAC [5] byl uveden již v kapitole 4.3.4.2, pro větší přehlednost je zde uveden znovu:

$$MAC_{(j,k)} = \frac{\left(\{r_{(j)CAL}\}^T \{r_{(k)OBS}\}\right)^2}{\left(\{r_{(j)CAL}\}^T \{r_{(j)CAL}\}\right) \left(\{r_{(k)OBS}\}^T \{r_{(k)OBS}\}\right)}, \quad (30)$$

kde  $\mathbf{r}_{(j)CAL}$  je vektor vypočteného  $j$ -tého vlastního tvaru a  $\mathbf{r}_{(k)OBS}$  je vektor změřeného  $k$ -tého vlastního tvaru.

Platí, že když  $MAC_{(j,k)} \geq 0,85$  pro  $\mathbf{r}_{(j)CAL}$  a  $\mathbf{r}_{(k)OBS}$  a zároveň  $MAC_{(j,m)} \leq 0,4$  pro všechny ostatní měřené vlastní tvary kmitání  $\mathbf{r}_{(m)OBS}$ , pak je možné předpokládat, že se jedná o odpovídající si vlastní tvary kmitání [6].

Nejprve byla provedena vizuální kontrola vlastních tvarů kmitání, podle toho byla přiřazena pořadová čísla  $j$  a  $k$ . Přehled odpovídajících si vlastních frekvencí konstrukce podle vizuální kontroly vlastních tvarů kmitání včetně označení pořadovými čísly  $j$  a  $k$  použitých ve výpočtu koeficientu MAC je uveden v následující tab. 48.

Tab. 48 Přehled odpovídajících si vypočtených a změřených vlastních frekvencí konstrukce podle vizuální kontroly vlastních tvarů kmitání

Výpočet			Experiment 15. 10. 2021		
Pořadové číslo frekvence $j$	Vlastní frekvence $f_{(j),CAL}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru	Pořadové číslo frekvence $k$	Vlastní frekvence $f_{(k),OBS}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru
1	0,775	Svislý ohybový	1	0,72	Svislý ohybový
2	0,976	Vodorovný	2	0,92	Vodorovný
3	1,118	Svislý ohybový	3	1,19	Svislý ohybový
4	1,617	Svislý ohybový	4	1,73	Svislý ohybový
6	1,955	Torzní	5	2,11	Torzní
7	2,088	Svislý ohybový	6	2,28	Svislý ohybový
8	2,596	Torzní/Vodorovný	8	2,84	Vodorovný
9	2,633	Svislý ohybový	9	2,98	Svislý ohybový
10	2,933	Svislý ohybový	10	3,13	Svislý ohybový
11	3,076	Torzní	11	3,41	Torzní
12	3,128	Svislý ohybový	12	3,61	Svislý ohybový
14	3,672	Svislý ohybový	13	4,20	Svislý ohybový
15	3,971	Torzní	14	4,56	Torzní
16	4,126	Svislý ohybový	15	4,89	Svislý ohybový

Dalším krokem byl výpočet koeficientu korelace modální analýzy MAC podle vzorce (30). Výsledky jsou uvedeny v tab. 49 níže. V tab. 49 jsou zeleně podbarveny hodnoty, které splňují kritéria uvedená výše (sytě zeleně v případě shody vlastních tvarů, tedy  $MAC \geq 0,85$ , bledě zeleně v případě ortogonalitě vlastních tvarů, tedy  $MAC \leq 0,4$ ). Šedě jsou podbarveny hodnoty, které nesplňují kritéria uvedená výše, tedy  $MAC > 0,4$  a zároveň  $MAC < 0,85$ .

Ideální podoba matice s hodnotami koeficientu korelace modální analýzy MAC je matice identity, tedy na hlavní diagonále samé 1 a mimo hlavní diagonálu samé 0. Kritériím uvedeným výše se v tab. 49 vymyká 3,06 % vypočtených hodnot, z nichž všechny leží na hlavní diagonále. Lze tedy usoudit, že spíše než o ortogonalitě porovnávaných vypočtených a změřených vlastních tvarů je pochybnost o shodě těchto vlastních tvarů, shoda těchto vlastních tvarů ale byla prokázána v dostatečné míře vizuálně. Tato skutečnost se ale netýká souboru prvních pěti vlastních tvarů kmitání konstrukce, který je směrodatný z hlediska požadavků uvedených v [6]. Požadovaná

kritéria byla splněna u 100 % hodnot nejen základního souboru prvních pěti vlastních frekvencí, ale dokonce u 100 % hodnot prvních šesti vlastních frekvencí.

Tab. 49 Vypočtený koeficient korelace modální analýzy MAC mezi vypočtenými a změřenými vlastními tvary konstrukce

k; $f_{(k)}$	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	7
j; $f_{(j)}$ [Hz]	0,72	0,92	1,19	1,73	2,11	2,28	2,84	2,98	3,13	3,41	3,61	4,20	4,56	4,89	2,77
1	0,775	0,99	0,01	0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
2	0,976	0,00	0,92	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,118	0,00	0,00	0,99	0,02	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
4	1,617	0,00	0,00	0,00	0,95	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
6	1,955	0,00	0,01	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2,088	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,89	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43
8	2,596	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,64	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	2,633	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04	0,64	0,17	0,00	0,06	0,00	0,00	0,45
10	2,933	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,75	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,04
11	3,076	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	3,128	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,79	0,11	0,00	0,01	0,03
14	3,672	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,09	0,81	0,00	0,11	0,00
15	3,971	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,96	0,00	0,00
16	4,126	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,83	0,00

V posledním sloupci tab. 49 je vidět, že byla posouzena i shoda změřeného vlastního tvaru příslušícího k vlastní frekvenci  $f_{(10)} = 2,77$  Hz, ačkoli k němu nebyl vizuálně přiřazen žádný vypočtený vlastní tvar. Výpočtem koeficientu MAC bylo potvrzeno, že žádný z vypočtených vlastních tvarů nelze k tomuto změřenému vlastnímu tvaru jednoznačně přiřadit, protože u žádného vypočteného vlastního tvaru nebyl  $MAC \geq 0,85$ .

Na základě pochybnosti o přiřazení změřeného vlastního tvaru konstrukce příslušícího k vlastní frekvenci 2,77 Hz k některému z vypočtených vlastních tvarů byla provedena kontrola ortogonality změřených vlastních tvarů pomocí koeficientu MAC (tab. 50). O zvýšené míře provázanosti především 7. a 9. vlastního tvaru, ale i 6. a 7. vlastního tvaru svědčí zvýšené hodnoty koeficientu MAC pro tyto vlastní tvary (v tab. 50 označeny žlutou barvou).

Tab. 50 Vypočtený koeficient korelace modální analýzy MAC mezi změřenými vlastními tvary konstrukce

k; $f_{(k)}$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$k; f_{(k)} [Hz]$		0,72	0,92	1,19	1,73	2,11	2,28	2,77	2,84	2,98	3,13	3,41	3,61	4,20	4,56	4,89
1	0,72	1,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,92	0,01	1,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,19	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,73	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,01	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	2,11	0,00	0,03	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	2,28	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	1,00	0,18	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2,77	0,01	0,00	0,04	0,07	0,00	0,18	1,00	0,08	0,33	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	2,84	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,08	1,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00
9	2,98	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,03	0,33	0,01	1,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	3,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	3,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00
12	3,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
13	4,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
14	4,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	1,00	0,00
15	4,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

## 9 Závěr

V první části práce jsou shrnuty informace týkající se dynamické analýzy lávek pro chodce, a to především experimentální, protože právě experiment je základním předmětem této práce. Součástí první části práce je také souhrn požadavků dle norem, předpisů a doporučení, které se dané problematiky týkají. V rámci první části byla též popsána specifika kmitání závěsů.

V rámci této diplomové práce byly provedeny dva dynamické experimenty na lávce pro chodce v Lužci nad Vltavou. První experiment byl zaměřen na kmitání závěsů od větru. Cílem druhého experimentu bylo provedení experimentální modální analýzy a dynamické zkoušky zatěžovací.

První experiment se uskutečnil 9. 4. 2021. Již při příjezdu k lávce v Lužci nad Vltavou bylo viditelné značné kmitání nejdelších závěsů. Bylo pořízeno celkem 26 záznamů kmitání závěsů. Z pořízených záznamů byly pomocí programu Dyn\_anal vyhodnoceny vlastní frekvence závěsů a z nich byly dále vypočteny frekvenční metodou podle několika teorií hodnoty předpínacích sil v závěsech. Autorka považuje výsledky vypočtené pomocí strunové teorie za hodnoty, které se nejvíce blíží realitě. Pro vybrané závěsy byla vyhodnocena úroveň jejich kmitání vyvolané větrem.

Druhý experiment se uskutečnil 15. 10. 2021 a byl zaměřen na zjištění vlastních frekvencí a vlastních tvarů konstrukce (experimentální modální analýza) a dále na zjištění dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodce (dynamická zkouška zatěžovací). Jako první v pořadí byla provedena dynamická zkouška zatěžovací.

V rámci dynamické zkoušky zatěžovací bylo pořízeno celkem 32 záznamů kmitání. Při zkoušce byly provedeny tři zatěžovací stavy: „náhodné přechody chodců po lávce“, „2 chodci/běžci za sebou“ a „vandalismus“. Z pořízených záznamů byly pomocí programu Dyn\_anal vyhodnoceny maximální špičkové hodnoty zrychlení a také maximální RMS hodnoty zrychlení. Největší úrovně kmitání se podařilo dosáhnout při vybuzení torzního vlastního tvaru spjatého s vlastní frekvencí 2,11 Hz, a to jak při zatěžovacím stavu „2 chodci/běžci za sebou“, tak i při „vandalismu“. Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ byl vyhodnocen maximální výkmit výchylky ve svislém směru 8,4 mm, což odpovídá teoretickému rozkmitu výchylky 16,8 mm. Vyhodnocené výsledky byly posouzeny podle komfortních kritérií. Z posouzení podle [6], [11] a [13] vyplývá, že konstrukce „vyhovuje“ ve smyslu 2. mezního stavu (mezního stavu použitelnosti). Z posouzení podle [1] a NAD [12] lze usoudit, že úroveň pohodlí chodců na lávce odpovídá

„průměrné“ úrovni. Podle autorky jsou výstižnější pro posouzení pohody chodců při experimentu taková kritéria pohody chodců, která jsou stanovena pomocí vážených RMS hodnot zrychlení, tedy kritéria stanovená v [6] a [13].

V rámci druhého experimentu byla kromě dynamické zkoušky zatěžovací provedena také experimentální modální analýza, a to metodou AVT (Ambient Vibration Testing), z níž byly vyhodnoceny vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání konstrukce. Ze záznamu dokmitání pořízeného v rámci dynamické zkoušky zatěžovací byl také vyhodnocen logaritmický dekrement útlumu spjatý s vlastní frekvencí 2,11 Hz  $\mathfrak{D} = 0,021$ , což přibližně odpovídá poměrnému útlumu  $\xi=0,33$  %. Při takto nízké hodnotě útlumu platí, že kritický interval frekvencí ve smyslu možného rizika vzniku rezonance s frekvencí přirozeného lidského pohybu je pro svislý směr kmitání přibližně 1,3 až 4,6 Hz a pro vodorovný směr kmitání přibližně 0,5 Hz až 1,2 Hz a 2,6 Hz až 3,4 Hz. Do tohoto intervalu frekvencí spadá celkem 12 vyhodnocených vlastních frekvencí vodorovné nosné konstrukce, z toho 7 vlastních frekvencí je spjato se svislým ohybovým tvarem kmitání, 3 vlastní frekvence přísluší k torznímu charakteru kmitání a 2 vlastní frekvence jsou spjaté s vodorovným vlastním tvarem kmitání.

Součástí zadání této diplomové práce je také teoretická analýza dynamického chování lávky, proto byl sestaven teoretický 3D model konstrukce v programu Dlubal RFEM 6.01. Na teoretickém modelu byly vypočteny vlastní frekvence a vlastní tvary konstrukce. V rámci verifikace (tj. ověření výstižnosti) modelu byla určena hodnota mezní odchylky vlastních frekvencí mezní odchylky  $\Delta_{(j)}$  podle [6]. Protože mezní odchylka pro první vlastní frekvenci nevyhověla, bylo přistoupeno k identifikaci modelu. Bylo provedeno celkem 5 úprav vybraných parametrů modelu, po páté úpravě již hodnota mezní odchylky pro první vlastní frekvenci vyhověla a zároveň podmínky stanovené v [6] splnilo všech 13 dalších porovnávaných vlastních frekvencí. Nakonec byla posouzena míra shody vypočtených a změřených vlastních tvarů pomocí koeficientu MAC.

## 10 Seznam literatury

[1] SÉTRA. *Footbridges*. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading. Technical guide. Paris: Ministry of Transport and Infrastructure, The Technical Department for Transport, Roads and Bridges Engineering and Road Safety, October 2006 [online]. [citace: 21. 10. 2021].

Dostupné z: <http://www.projektering.nu/files/Footbridges.pdf>

[2] MÁČA, Jiří. *Dynamika stavebních konstrukcí 1 [přednáška]*. [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2019. [citace: 05. 04. 2021].

Dostupné z: <https://mech.fsv.cvut.cz/student/>

[3] *Úvod do dynamiky* [online]. Jaroslav Reichl, Martin Všeticka, © 2006–2021. [citace: 24. 09. 2021].

Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/23-uvod-do-dynamiky>

[4] MÁČA, Jiří, KREJČÍ, Tomáš, KRUIS, Jaroslav. *Dynamika stavebních konstrukcí. Řešené příklady*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018. ISBN 978-80-01-05719-3.

[5] POLÁK, Michal. *Experimentální analýza a diagnostika K [přednáška]*. [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2021. [citace: 12. 05. 2021].

Dostupné z: <https://mech.fsv.cvut.cz/student/>

[6] ČSN 73 6209. *Zatěžovací zkoušky mostních objektů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

[7] TP 215. *Využití modální analýzy pro návrh, posouzení, opravy, kontrolu a monitorování mostů pozemních komunikací*. Praha: Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, prosinec 2009 [online]. [citace: 05. 10. 2021]

Dostupné z: [www.pjpk.cz/viewFile.asp?file=1673](http://www.pjpk.cz/viewFile.asp?file=1673)

[8] ČSN 73 2044. *Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1983.

[9] MAIA, Silva, HE, Lieven, LIN, Skingle, TO, Urgueira. *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. 3rd series. Taunton, Somerset, England: Research Studies Press LTD., 1997. ISBN 0 86380 208 7.



[10] BOHÁČOVÁ, Magdaléna. *Dynamický experiment realizovaný na existující lávce pro pěší*. Praha, 2020. Bakalářská práce [online]. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mechaniky. [citace: 21. 11. 2021].

Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/88756>

[11] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[12] ČSN EN 1991-2 ed. 2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

[13] ISO 10137:2007. *Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. International Organization for Standardization, 2004.

[14] GREGOR, Radoslav. *Analýza časových řad s využitím Fourierovy transformace a keprstrální analýzy*. Pardubice, 2012. Diplomová práce [online]. Univerzita Pardubice, Fakulta ekonomicko-správní, Ústav systémového řízení a informatiky. [citace: 03. 11. 2021].

Dostupné z:

[https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/46423/GregorR\\_AnalyzaCasovych\\_PP\\_2\\_012.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/46423/GregorR_AnalyzaCasovych_PP_2_012.pdf?sequence=3&isAllowed=y).

[15] POLÁK, Michal. *Diagnostika stavebních konstrukcí* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 01. 04. 2020.

[16] Fourier transform. In: AAVOS International [online]. Aavos Int., © 2017. [citace: 1. 10. 2021].

Dostupné z: <https://aavos.eu/glossary/fourier-transform/>

[17] POLÁK, Michal. *Dynamika dopravních staveb* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 22. 10. 2020.

[18] BÍLÝ, Petr, TIPKA, Martin. *Úvod do problematiky dynamiky betonových konstrukcí*. Rešeršní práce [online]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2012. [citace: 15. 11. 2021].

Dostupné z:

[http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty\\_soubory/SGS\\_2011/Uvod\\_do\\_problem\\_dynamiky\\_bet\\_konstrukci.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Uvod_do_problem_dynamiky_bet_konstrukci.pdf)

- [19] RYJÁČEK, Pavel. *Ocelové mosty 2* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2021.
- [20] PIRNER, Miroš, FISCHER, Ondřej. *Dynamika ve stavební praxi*. Praha: ČKAIT, 2010. ISBN 978-80-87438-18-3.
- [21] MÁCA, Jiří. *Dynamika stavebních konstrukcí 2* [přednáška]. [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2020. [citace: 23. 10. 2021].
- Dostupné z: <https://mech.fsv.cvut.cz/student/>
- [22] MÁCA, Jiří, ŠTĚPÁNEK, Jan. *Pedestrian load models of footbridges*. MATEC Web of Conferences [online]. DOI 107. 00009. 10.1051/matecconf/201710700009. ResearchGate, 2017. [citace: 03. 12. 2021].
- Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/317132258\\_Pedestrian\\_load\\_models\\_of\\_footbridges](https://www.researchgate.net/publication/317132258_Pedestrian_load_models_of_footbridges)
- [23] HEINEMEYER, Christoph, BUTZ, Christiane, KEIL, Andreas, SCHLAICH, Mike, DOLDACK, Arndt, TROMETER, Stefan, LUKIĆ, Mladen, CHABROLIN, Bruno, LEMAIRE, Arnaud, MARTIN, Pierre-Olivier, CUNHA, Álvaro, CAETANO, Elsa. *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009 [online]. [citace: 25. 11. 2021]. ISSN 1018-5593.
- Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/38613152.pdf>
- [24] TÖLG, Tomáš. *Vlny na struně*. [online]. ZČU Plzeň, Fakulta aplikovaných věd, 2008. [citace: 05. 10. 2021]
- Dostupné z: [http://www.kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FP1/UC103\\_9.pdf](http://www.kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FP1/UC103_9.pdf)
- [25] ČERNÝ, Miroslav. *Mechanické vlnění: stojaté vlnění na struně*. [online]. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, 2014. [citace: 15. 11. 2021].
- Dostupné z: <https://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/BF/labiny/struna.pdf>
- [26] STROUHAL, Čeněk. *Akustika*. [online]. Praha: Sborník jednoty českých matematiků v Praze, 1902. [citace: 29. 09. 2021].

Dostupné z:

[https://physics.mff.cuni.cz/historie/Strouhal/DVD/Ucebnice/Fysika\\_experimentalni/Akustika.pdf](https://physics.mff.cuni.cz/historie/Strouhal/DVD/Ucebnice/Fysika_experimentalni/Akustika.pdf)

[27] ROSMANIT, Miroslav. *Zatížení větrem*. [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, 2008. [citace: 14. 10. 2021].

Dostupné z:

[http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B\)%20TEORIE/Zatizeni%20vetrem%20-%20teorie%20+%20norma.pdf](http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B)%20TEORIE/Zatizeni%20vetrem%20-%20teorie%20+%20norma.pdf)

[28] MACHÁČEK, Michael. *Aerodynamická interference štíhlých vysokých budov v turbulentním proudu vzduchu*. Praha, 2021. Disertační práce [online]. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mechaniky. [citace: 19. 10. 2021].

Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/97703>

[29] JÍZDNÝ, Martin. *Vlastní tvary vírového proudění*. Brno, 2011. Diplomová práce [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. [citace: 09. 10. 2021].

Dostupné z:

<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/7503/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

[30] PIRNER, Miroš, FISCHER, Ondřej. *Zatížení staveb větrem*. Praha: ČKAIT, 2003. ISBN 80-86769-10-0.

[31] ČSN EN 73 0035. *Zatížení stavebních konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1976.

[32] Novák & Partner, s. r. o. *Realizační dokumentace stavby (RDS)*. Lávka pro pěší a cyklisty přes Vltavu v Lužci nad Vltavou. Praha. 2020.

[33] EXCON, a. s. *Zpráva a vyhodnocení zkoušky*. Dynamická zatěžovací zkouška. Praha. 2020.

[34] ČSN ISO 2631-2. *Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím – Část 2: Vibrace v budovách (1 Hz až 80 Hz)*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[35] SQZ, s. r. o., Ústřední laboratoř Praha. *Protokol o stanovení meze úměrnosti a zbytkové pevnosti v tahu za ohybu betonu s kovovými vlákny*. Praha. 2019.

[36] Root Mean Square Value. In: Wira Electrical Engineering Portal [online]. Wira Electrical, © 2021. [citace: 02. 11. 2021].

Dostupné z: <https://www.wiraelectrical.com/2020/02/root-mean-square-formula.html>

[37] Von Kármánova cesta vírů. In: Informační stránky Českého hydrometeorologického ústavu [online]. Infomet. [citace: 10. 11. 2021].

Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&iid=1460276748>