

Rozvojové projekty MŠMT  
Rozvojové projekty mladých týmů  
RPMT 2018

**MŠMT**  
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

# POSOUZENÍ DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ ZAVĚŠENÉ LÁVKY NA ULICI K BARRANDOVU VČETNĚ NÁVRHU POHLCOVAČE KMITÁNÍ



## Obsah

1. Úvod .....	5
2. Zadání .....	5
3. Popis konstrukce .....	5
4. Postup řešení .....	7
5. Výpočetní model .....	9
6. Zatížení .....	10
6.1. Vlastní tíha lávky .....	10
6.2. Dynamický model zatížení .....	10
6.3. Dynamický model zatížení vandalismem .....	10
7. Vyhodnocení vlastních frekvencí .....	11
7.1. Vlastní frekvence .....	11
7.2. Vlastní tvary .....	12
7.2.1. První vlastní tvar .....	12
7.2.2. Druhý vlastní tvar .....	12
7.2.3. Třetí vlastní tvar .....	13
8. Posouzení kritické oblasti vlastních frekvencí .....	13
9. Určení návrhových situací .....	14
9.1. Stanovení tříd provozu a tříd pohody .....	14
9.2. Stanovení mezních hodnot zrychlení .....	14
9.3. Vlastní frekvence lávky během provozu .....	15
9.3.1. Hmoty chodců .....	15
9.3.2. Vlastní frekvence lávky s hmotou chodců a vandalů .....	15
10. Odhad tlumení konstrukce .....	16
11. Vyhodnocení amplitud zrychlení .....	17
11.1. Zatěžovací stavy na samotné lávce .....	17
11.1.1. Zatěžovací stavy pro Návrhovou situaci 1 – Otevření lávky .....	18
11.1.2. Zatěžovací stavy pro Návrhovou situaci 2 – Běžný provoz .....	19
11.2. Amplitudy zrychlení .....	20
11.2.1. Návrhová situace 1 - Otevření lávky .....	20
11.2.1. Návrhová situace 2 – Běžný provoz .....	21
12. Vyhodnocení hodnot zrychlení .....	21
12.1. Lock-in efekt .....	21
12.2. Splnění mezních hodnot zrychlení .....	21
12.2.1. Návrhová situace 1 – Otevření lávky .....	21

12.2.2.	Návrhová situace 2 – Běžný provoz.....	22
13.	Vandalismus .....	22
13.1.	Zatěžovací stavy představující vandalismus .....	22
13.1.1.	Vandal f1.....	22
13.1.2.	Vandal f2.....	23
13.2.	Posouzení hodnot napětí.....	23
14.	Návrh tlumiče kmitání .....	23
14.1.	Návrh TMD .....	24
14.1.1.	Volba hmoty TMD.....	24
14.1.2.	Určení vhodné frekvence TMD.....	25
14.1.3.	Určení poměrného útlumu TMD .....	25
14.1.4.	Určení konstant TMD .....	25
14.1.5.	Hodnoty TMD pro zadání do výpočetního modelu .....	25
15.	Vyhodnocení vlastních frekvencí lávky s TMD .....	26
15.1.	Vlastní frekvence lávky s TMD.....	26
15.2.	Vlastní tvary lávky s TMD.....	26
15.2.1.	První vlastní tvar lávky s TMD.....	27
15.2.2.	Druhý vlastní tvar lávky s TMD .....	27
15.2.3.	Třetí vlastní tvar lávky s TMD .....	27
15.2.4.	Čtvrtý vlastní tvar lávky s TMD .....	28
15.2.5.	Pátý vlastní tvar lávky s TMD.....	28
16.	Vyhodnocení amplitud zrychlení lávky s TMD.....	29
16.1.	Zatěžovací stavy na lávce s TMD .....	29
16.1.1.	Zatěžovací stavy pro návrhovou situaci 1 na lávce s instalovanými TMD.....	29
16.1.2.	Zatěžovací stavy pro návrhovou situaci 2 na lávce s instalovanými TMD.....	31
16.2.	Amplitudy zrychlení na lávce s TMD.....	33
16.2.1.	Návrhová situace 1 - Otevření lávky.....	33
16.2.2.	Návrhová situace 2 – Běžný provoz.....	34
17.	Vyhodnocení hodnot zrychlení na lávce s TMD .....	34
17.1.	Lock-in efekt .....	35
17.1.	Splnění mezních hodnot zrychlení.....	35
17.1.1.	Návrhová situace 1 – Otevření lávky.....	35
17.1.2.	Návrhová situace 2 – Běžný provoz.....	35
18.	Vandalismus na lávce s TMD .....	36
18.1.	Zatěžovací stavy k vyhodnocení účinků vandalismu .....	36

18.1.1.	Vlastní tíha.....	36
18.1.2.	Předpětí.....	36
18.1.3.	Vandal $f_1$ _TMD.....	36
18.1.4.	Vandal $f_2$ _TMD.....	36
18.1.5.	Vandal $f_3$ _TMD.....	37
18.2.	Kontrola vynuceného kmitání (zrychlení).....	37
18.2.1.	Upravené hodnoty zatížení .....	38
18.3.	Mimořádná kombinace zatížení – Vandalismus.....	38
18.4.	Posouzení účinků vandalismu na lávce s TMD .....	38
19.	Závěr .....	40
20.	Reference .....	41
21.	Příloha 1: Měřené vlastní frekvence lávky .....	42

**Poděkování:**

*Tímto autoři této vzorové úlohy děkují doc. Ing. Pavlu Ryjáčkovi, Ph.D. za poskytnuté informace a podklady týkající se konstrukce lávky na ulici K Barrandovu a také za cenné rady a doporučení při tvorbě této úlohy.*

## 1. Úvod

Motivací pro vytvoření tohoto vzorového příkladu je zacelení mezery ve studijním programu, kterou je absence podrobnějšího popisu posouzení dynamického chování lávky. Jako posuzovaná konstrukce byla zvolena atraktivní a nevšední konstrukce stávající zavěšené lávky na ulici K Barrandovu, viz **Obr.1**. Konstrukce lávek, především zavěšené a visuté, jsou náchylné na kmitání od pohyblivého zatížení chodci. Proto je nutné u těchto konstrukcí věnovat dynamické analýze velkou pozornost. V příloze č.1, **tab.10** jsou pro zajímavost uvedeny vlastní frekvence lávky naměřené při dynamické zatěžovací zkoušce provedené v roce 2006.



*Obr. 1 Lávka na ulici K Barrandovu*

## 2. Zadání

Proveďte posouzení dynamického chování lávky pro pěší na ulici K Barrandovu. V rámci posouzení určete vlastní frekvence kmitání lávky a ověřte, že:

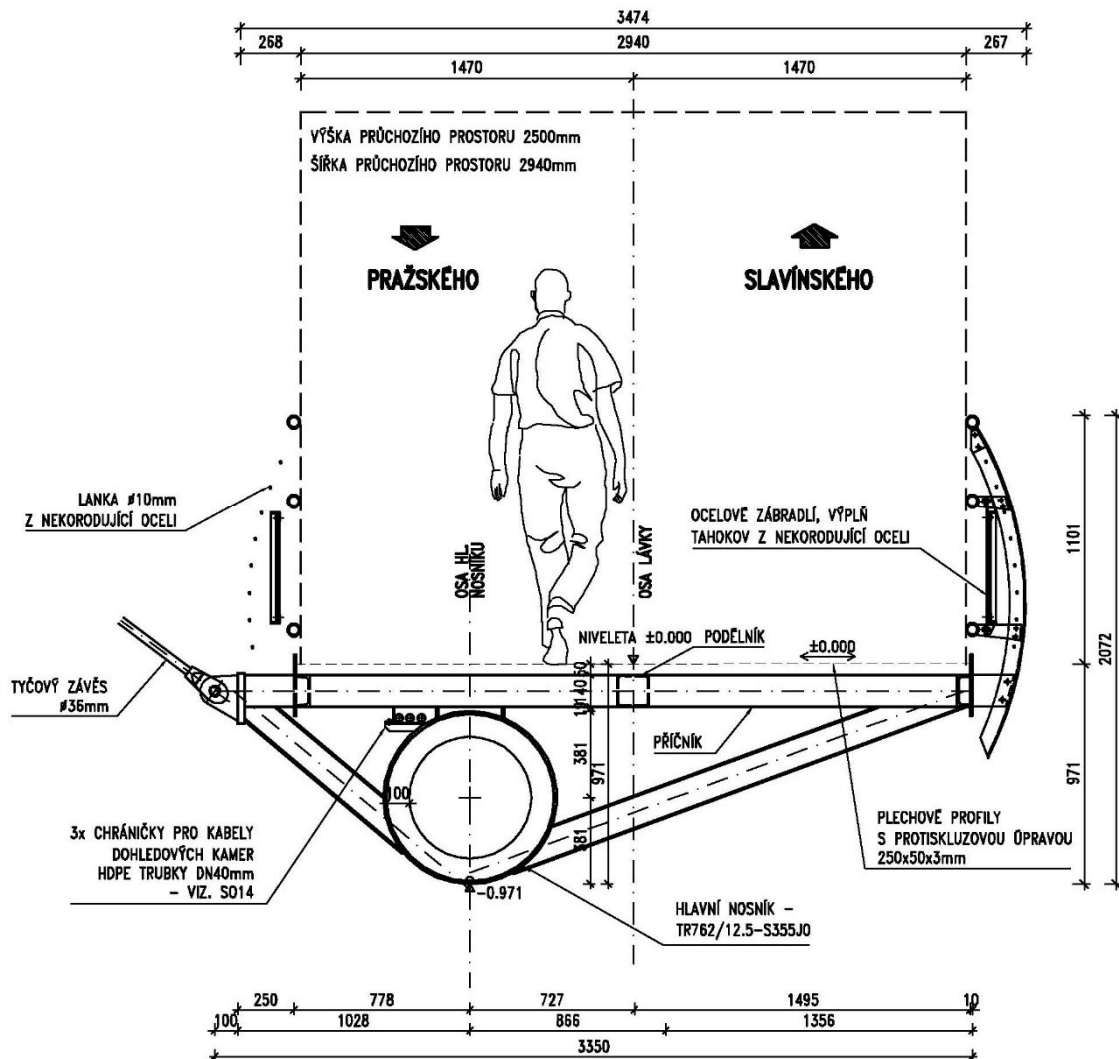
- Svislé a vodorovné zrychlení je v přípustných mezích.
- Nedojde k riziku vzniku efektu „lock-in“.
- Vynucené kmitání způsobené vandalismem nezpůsobí poruchu nebo havárii lávky.

V případě nutnosti navrhnete vhodné opatření optimalizující dynamickou odezvu lávky.

## 3. Popis konstrukce

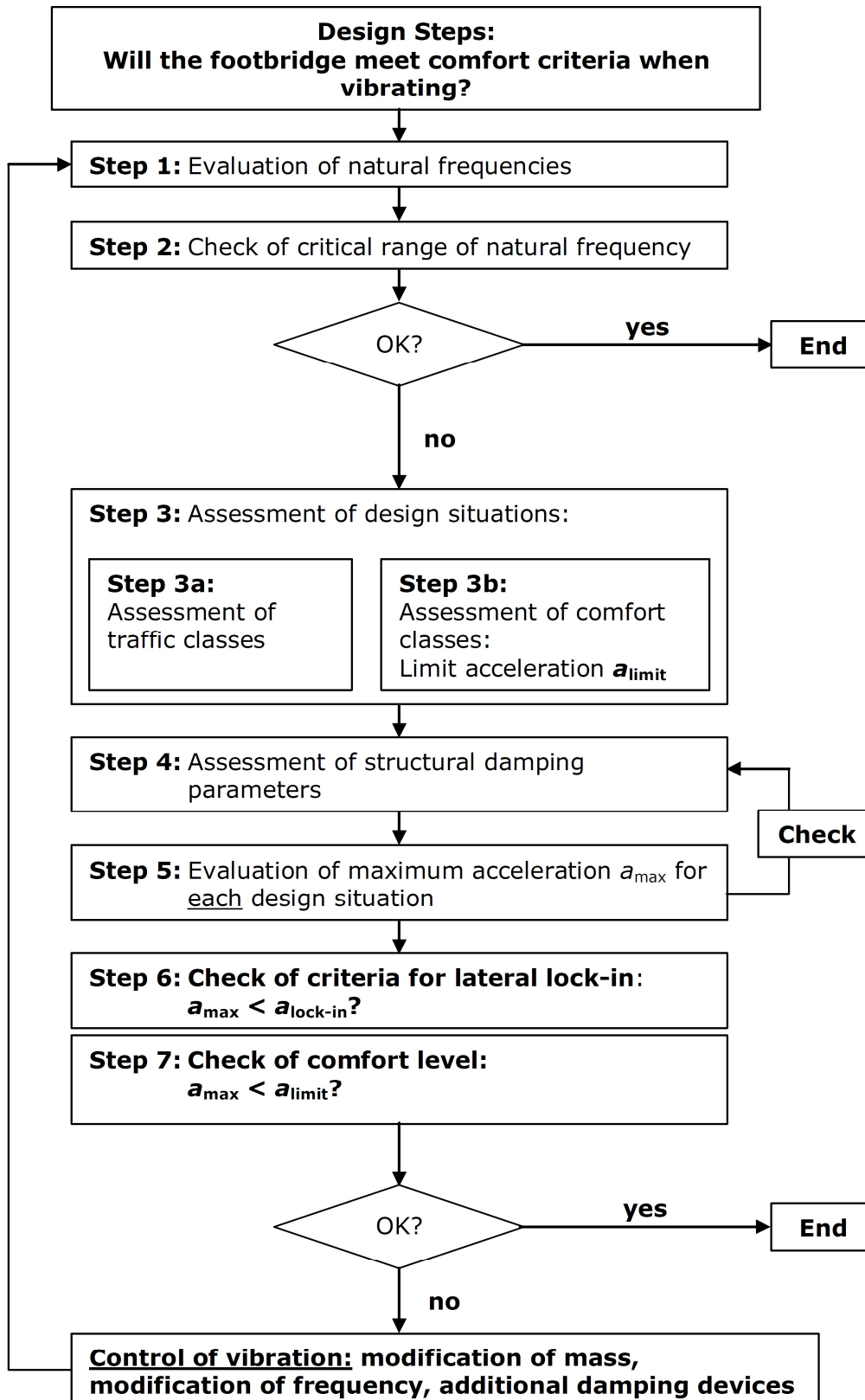
Jedná se o konstrukci zavěšené lávky pro pěší a cyklisty. Hlavní nosný systém je tvořen hlavním nosníkem profilu TR762/12.5, zakřiveným do tvaru písmene S. Oba konce hlavního nosníku jsou pevně připojeny k opěrám. Hlavní nosník zároveň podpírají vějířovitě uspořádané tyčové závěsy průměru 35 mm. Závěsy jsou připojeny ke dvěma šikmým pylonům (ke každému pět závěsů). Oba pylony jsou kotveny pomocí zpětného závěsu průměru 85 mm do základového bloku. Pylon tvoří Vierendeelův nosník dostředně se rozšiřující. Připojení tyčových závěsů ke konstrukci je realizováno čepovými spoji s napínacím i rektifikačním prvkem.

Mostovku tvoří ocelové plechy s protiskluzovou úpravou, průchozí prostor je široký 2,94 m. Rozpětí lávky je 45,135 m. Zábradlí na mostě je výšky 1100 mm. Příčné uspořádání konstrukce je zobrazeno na **Obr.2**, na **Obr.3** je zobrazen půdorys lávky.



Obr. 2 Příčný řez lávkou v poli





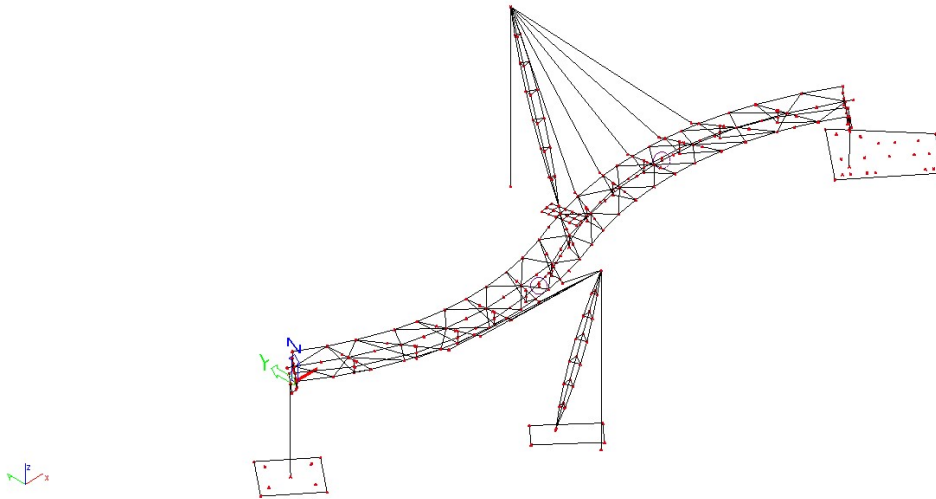
Obr. 4 Postup dynamické analýzy dle [2]



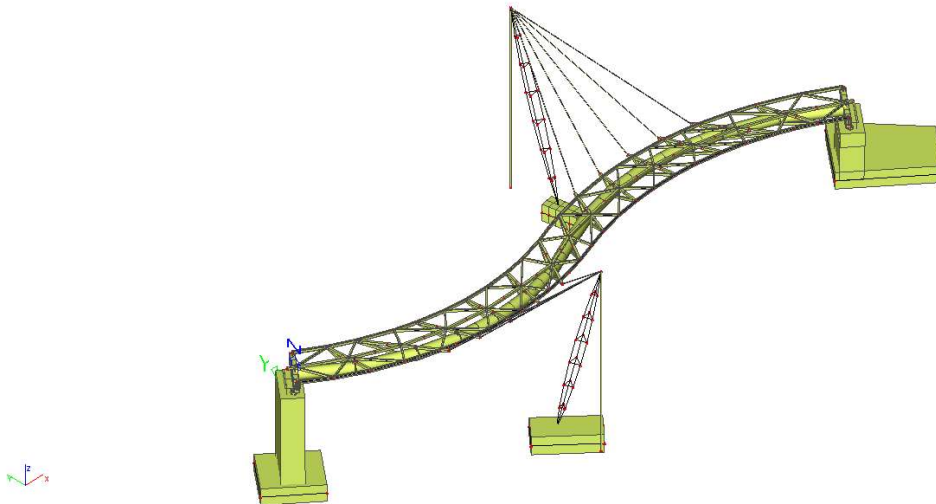
## 5. Výpočetní model

Pro tuto úlohu byl použit výpočetní model konstrukce ze softwaru NEXIS, který byl převeden do softwaru SCIA Engineer verze 18.0.2033 (studentská verze). Výpočetní model je nedílnou součástí této úlohy a je k dispozici na stránkách <http://rpmt.ocel-drevo.cz>.

Nosná konstrukce je modelována jako prutový model, opěry a základy pylonů jsou modelovány jako deskostěnové prvky.



Obr. 5 Výpočetní model - prostorový střednicový



Obr. 6 Výpočetní model - prostorový rendrovaný

POZN.: Pro výpočet dynamické analýzy v softwaru SCIA je v nastavení projektu potřeba zapnout funkci dynamika. Poté se v hlavním stromu nabídky objeví otevírací seznam s názvem dynamika, umožňující další postup.

## 6. Zatížení

Zatížení konstrukce je stanoveno dle [1] s využitím metodik [2] a [3]. Uvedeny jsou zatěžovací stavy a dynamické modely zatížení použité pro dynamickou analýzu. Zatěžovací stavy jsou uvedeny v 11.1..

### 6.1. Vlastní tíha lávky

Vlastní tíha lávky je běžně generována samotným výpočetním softwarem.

POZN.: Software SCIA Engineer generuje zatížení vlastní tíhou konstrukce.

### 6.2. Dynamický model zatížení

Dynamické modely zatížení pro stanovení dynamické odezvy konstrukce jsou definované v [2]. Modely uvažují harmonické zatížení  $p(t)$  [N/m<sup>2</sup>] rovnoměrně rozdělené po celé pochozí ploše lávky.

$$(1) \quad p(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi \quad [\text{N/m}^2]$$

- P [N] síla vyvozená jedním chodcem
- $f_s$  [Hz] frekvence lidského kroku totožná s kritickou vlastní frekvencí lávky
- $n'$  [m<sup>-2</sup>] ekvivalentní počet chodců na pochozí ploše lávky
- $\psi$  [-] redukční koeficient zahrnující pravděpodobnost synchronizace frekvence lidského kroku s vlastní frekvencí lávky
- $P * \cos(2\pi f_s t)$  harmonické zatížení způsobené jedním chodcem

Ekvivalentní počet  $n'$  [os.] vyjadřuje počet lidí na pochozí ploše pohybujících se ve stejné frekvenci kroku (95. percentil). Hodnota  $n'$  se liší dle hustoty provozu  $d$  [os./m<sup>2</sup>] na lávce (pro  $d < 1$  a  $d \geq 1$ ). Očekávané varianty hustoty provozu na lávce jsou určeny při sestavování návrhových situací, viz 9. V této úloze je uvažovaný provoz na lávce  $d$  vždy nižší než 1 os./m<sup>2</sup>, proto je  $n'$  určeno dle následujícího vzorce:

$$(2) \quad n' = \frac{10,8 * \sqrt{\xi * n}}{S} \quad [\text{os./m}^2]$$

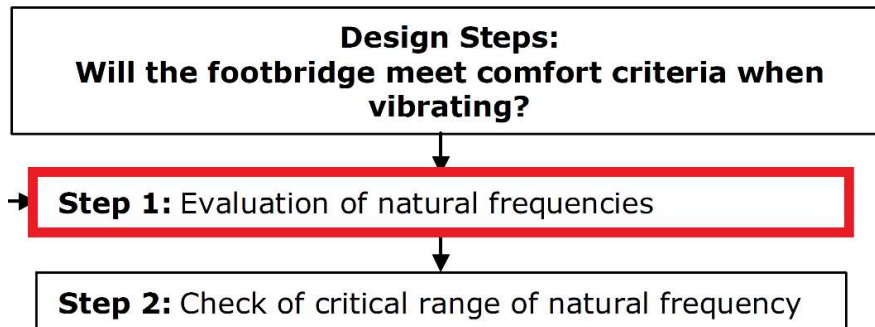
- $\xi$  [-] poměrné tlumení
- $n = S * d_i$  [os.] počet osob pohybujících se na pochozí ploše lávky dle uvažované návrhové situace.
- S [m<sup>2</sup>] pochozí plocha lávky
- $d_i$  [os./m<sup>2</sup>] hustota provozu na lávce

### 6.3. Dynamický model zatížení vandalismem

Dynamické modely zatížení představující vynucené kmitání způsobené vandalismem jsou uvedeny v [3] a [4]. Nejbezpečnějším postupem je použití dynamického modelu zatížení vandalismem z metodiky [3]. Dynamický model uvažuje plnou obsazenost lávky vandaly, kteří jsou přesně synchronizováni a budí některý z vlastních tvarů kmitání lávky. Omezující podmínkou je hodnota dosaženého zrychlení, při dosažení svislého zrychlení  $\frac{1}{2}g$  se pohyb na kmitající konstrukci stává nemožným. V případě vodorovného zrychlení je hodnota ještě menší, a to  $\frac{1}{10}g$ . Proto je možné hodnotu zatížení ponížít na hodnotu potřebnou k vybuzení svislého zrychlení  $\frac{1}{2}g \approx 4,9\text{m/s}^2$  či hodnotu k vybuzení vodorovného zrychlení  $\frac{1}{10}g \approx 0,98\text{m/s}^2$  a posoudit konstrukci na toto snížené zatížení.

- Uvažováno je harmonické zatížení  $p(t)=700$  N/m<sup>2</sup> (hustota provozu  $d_v=1$  os./m<sup>2</sup>)
- Frekvence lidského kroku všech chodců na lávce je brána totožná s vyšetřovanou vlastní frekvencí lávky ( $n' = n / S$ ;  $\psi = 1$ ).

## 7. Vyhodnocení vlastních frekvencí



Obr. 7 postup posouzení

Po vytvoření výpočetního modelu je prvním krokem stanovení vlastních frekvencí konstrukce lávky. Pro výpočet modální analýzy je potřeba zadat hmotu konstrukce, která může kmitat. Nejjednodušším postupem je využít zatížení vlastní tíhou, které model generuje sám. K této tíze je vhodné případně doplnit tíhu zbývajících nenosných prvků konstrukce, které nebyly modelovány, avšak ovlivňují svoji hmotností dynamickou odezvu lávky (zábradlí, pochozí vrstvy apod.).

POZN.: V tomto případě je hmota lávky svázána se zatěžovacím stavem „vlastní tíha“ a doplněna spojitém zatížením 200kg/m po délce mostovky. Vzhledem k tomu, že se jedná o prutový model, je tato hmota zadána jako hmota na prutu. Hmota je zadána jako 80kg/m po délce podélníku a 60kg/m po délce každého z římsových nosníků. Hmota reprezentuje ocelové přímo-pochozí plechy a prvky konstrukce zábradlí, které model neobsahuje. Před samotným výpočtem vlastních frekvencí je potřeba ještě provést nastavení řešiče. V tomto případě byl řešič nastaven tak, aby určil prvních 100 vlastních frekvencí. Tento počet byl zvolen z důvodů vyloučení vlastních frekvencí lan, které u zavěšených či visutých konstrukcí software běžně určí také.

### 7.1. Vlastní frekvence

Vlastní frekvence samotné konstrukce lávky určené softwarem SCIA Engineer jsou následující.

C5 Vlastní Tíha	
n [-]	frekvence $f_n$ [Hz]
1	2,08
2	2,50
3	4,30
4	5,27
5	5,52
6	5,89
7	6,26
8	6,65
9	7,53
10	7,72

Tab. 1 Vlastní frekvence lávky

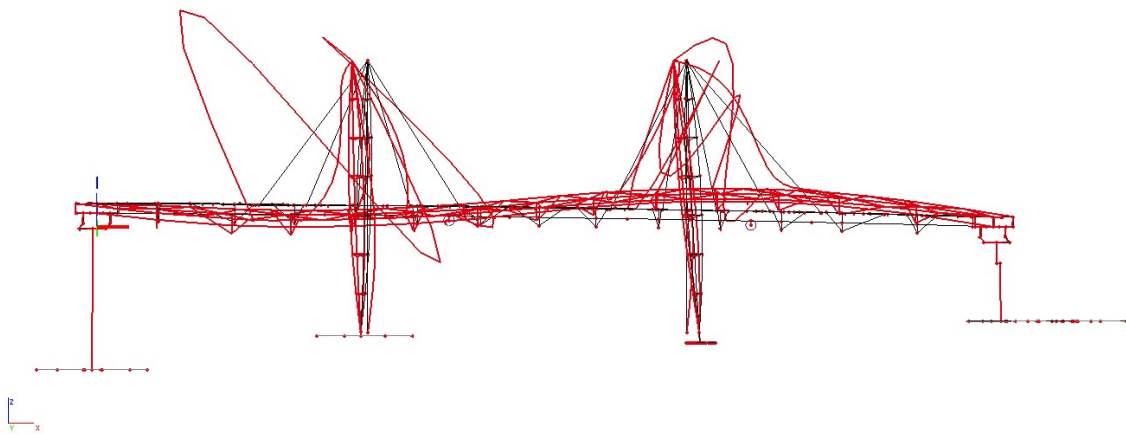
Z vlastních frekvencí určených softwarem musí být určeny skutečné vlastní frekvence celé nosné konstrukce lávky. Vlastní frekvence celé nosné konstrukce jsou identifikovatelné dle vykreslovaných vlastních tvarů kmitání. Pokud je tedy v tomto případě pro danou vlastní frekvenci vlastní tvar definován pouze výchylkou závěsů, deska mostovky zůstává nehybná, nejedná se o vlastní frekvenci celé nosné konstrukce, ale pouze závěsů.

## 7.2. Vlastní tvary

Na následujících obrázcích jsou vykresleny první tři vlastní tvary kmitání, které jsou z hlediska dynamické analýzy významné.

### 7.2.1. První vlastní tvar

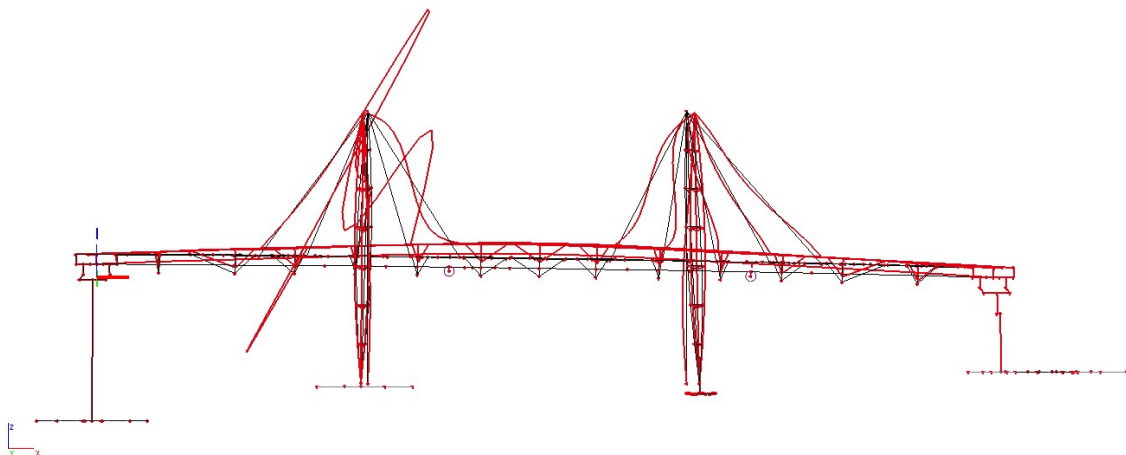
Vlastní tvar č.1 je svislý, částečně dochází ke kroucení, díky atypickému tvaru konstrukce. Frekvence prvního vlastního tvaru je  $f_1=2,08$  Hz.



*Obr. 8 Vlastní tvar kmitání č.1*

### 7.2.2. Druhý vlastní tvar

Ve vlastním tvaru č.2 kmitá konstrukce ve svislém směru s jednou amplitudou. Frekvence druhého vlastního tvaru je  $f_2=2,50$  Hz.



*Obr. 9 Vlastní tvar č.2*

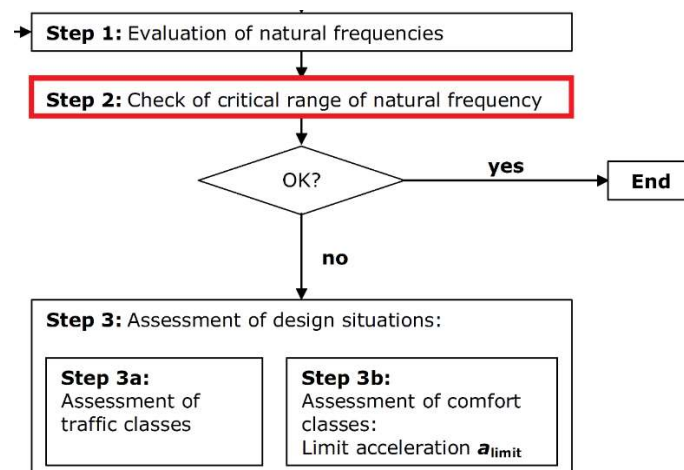
### 7.2.3. Třetí vlastní tvar

Vlastní tvar č.3 je svislý, částečně dochází ke kroucení, díky atypickému tvaru konstrukce. Frekvence třetího vlastního tvaru je  $f_3=4,30$  Hz.



Obr. 10 Vlastní tvar č.3

## 8. Posouzení kritické oblasti vlastních frekvencí



Dle [1] musí být provedena dynamická analýza, pokud některá z vlastních frekvencí kmitání lávky je v nebezpečné oblasti z hlediska buzení chodci.

### Kritická oblast kmitání:

Pro svislé kmitání: 1,0 až 5,0 Hz

Pro vodorovné kmitání: 0,5 až 2,5 Hz

### Vlastní frekvence:

$f_1=2,08$  Hz  $\in (1,0; 5,0)$  platí

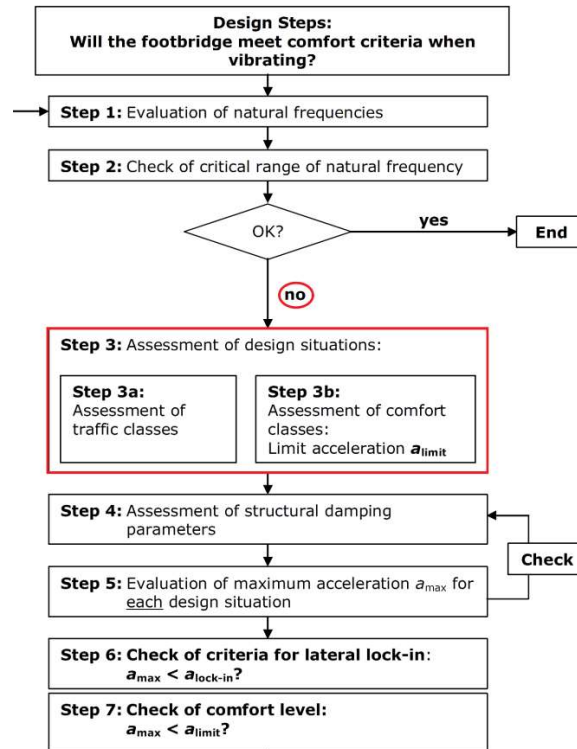
$f_2=2,52$  Hz  $\in (1,0; 5,0)$  platí

$f_3=4,31$  Hz  $\in (1,0; 5,0)$  platí

### Vyhodnocení:

Vlastní frekvence prvních tří vlastních tvarů se nacházejí v nebezpečné oblasti. Musí být provedena podrobná dynamická analýza.

## 9. Určení návrhových situací



Přípustné meze má stanovit zadavatel projektu po zvážení požadavků správce a vlastníka lávky. Mezní hodnoty zrychlení jsou stanoveny třídami pohody. Pro stanovení návrhových situací je kromě tříd pohody potřeba definovat ještě třídy provozu. Třídy provozu definují předpokládanou intenzitu provozu na lávce během její životnosti.

### 9.1. Stanovení tříd provozu a tříd pohody

V tomto případě uvažujeme dvě návrhové situace, a to:

- **N1 Otevření lávky**, kdy je uvažován hustý provoz na lávce, zároveň však lze předpokládat, že taková situace nastane prakticky pouze jednou za celou předpokládanou dobu životnosti konstrukce, a proto je třída pohody zvolena jako nízká.
- **N2 Běžný provoz**, je uvažován nízkým provozem, vzhledem k umístění konstrukce, nejedná se o polohu v centru města. Požadovaná pohoda přechodu lávky pro běžný provoz je stanovena jako normální.

N	Návrhová situace	Třída provozu	Výskyt	Třída pohody
1	Otevření lávky	Hustý	jednou	Nízká
2	Běžný provoz	Nízký	denně	Normální

*Tab. 2 Návrhové situace*

### 9.2. Stanovení mezních hodnot zrychlení

Mezní hodnoty zrychlení jsou definovány zvolenými třídami pohody. Viz **tab.3**.

N	Návrhová situace	Provoz $d_i=[os./m^2]$	Svislé zrychlení $a_{v,lim}= [m/s^2]$	Vodorovné zrychlení $a_{h,lim}= [m/s^2]$
1	Otevření lávky	0,50	1,00	0,40
2	Běžný provoz	0,20	0,70	0,20

*Tab. 3Mezní hodnoty zrychlení*

### 9.3. Vlastní frekvence lávky během provozu

Při posuzování návrhových situací je uvažováno rovnoměrné rozložení provozu pěších po délce lávky, dle modelu zatížení viz 6.2. Lávky jsou obecně velmi lehké konstrukce, a proto je vhodné provést opětovné vyhodnocení vlastních frekvencí konstrukce, nyní ovšem se započítáním tíhy chodců pro každou návrhovou situaci, včetně případu vandalismu. Tíha běžného chodce je uvažována jako  $m_{os.}=70kg/osoba$ .

#### 9.3.1. Hmoty chodců

Přidaná hmota chodců  $m_{Ni}$  [kg/m] pro návrhové situace je:

$$m_{Ni} = m_{os.} * d_i * b$$

- $m_{os.}$  tíha jednoho chodce
- $d_i$  provoz na lávce v osobách na čtvereční metr, dle stanovených návrhových situací
- $b$  šířka průchozího prostoru na lávce

##### 9.3.1.1. N1 Otevření lávky

Pro návrhovou situaci N1 je přidaná hmota:

$$m_{N1} = m_{os.} * d_1 * b = 70 * 0,5 * 2,94 \approx 100 \text{ kg/m}$$

Hmota chodců je rozdělena jako 40kg/m po délce podélníku a 30kg/m po délce každého z římsových nosníků.

##### 9.3.1.2. N2 Běžný provoz

Pro návrhovou situaci N2 je přidaná hmota:

$$m_{N2} = m_{os.} * d_2 * b = 70 * 0,2 * 2,94 \approx 40 \text{ kg/m}$$

Hmota chodců je rozdělena jako 20kg/m po délce podélníku a 10kg/m po délce každého z římsových nosníků.

##### 9.3.1.3. Vandalismus

Pro případ vandalismu je přidaná hmota:

$$m_V = m_{os.} * d_v * b = 70 * 1 * 2,94 \approx 210 \text{ kg/m}$$

Hmota chodců je rozdělena jako 90kg/m po délce podélníku a 60kg/m po délce každého z římsových nosníků.

#### 9.3.2. Vlastní frekvence lávky s hmotou chodců a vandalů

Vlastní frekvence konstrukce lávky se započítáním hmoty chodců, pro obě návrhové situace, určené softwarem SCIA Engineer jsou následující.

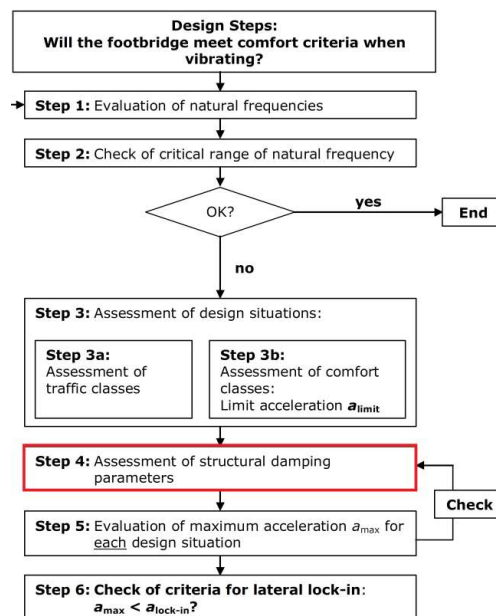
C6 chodci N1		C7 chodci N2		C8 vandalové	
n [-]	frekvence $f_n$ [Hz]	n [-]	frekvence $f_n$ [Hz]	n [-]	frekvence $f_n$ [Hz]
1	1,96	1	2,08	1	1,82
2	2,34	2	2,50	2	2,19
3	4,09	3	4,30	3	3,73
4	5,01	4	5,27	4	4,76
5	5,40	5	5,52	5	5,29
6	5,82	6	5,89	6	5,75
7	6,17	7	6,26	7	6,08
8	6,50	8	6,65	8	6,40
9	7,44	9	7,53	9	7,48
10	7,60	10	7,72	10	7,82

*Tab. 4 Vlastní frekvence lávky s přidanou hmotou chodců a vandalů*

POZN.: **Tab.4** uvádí vlastní frekvence konstrukce s uvážením následujících kombinací hmot.

- **C6 N1:** hmota lávky s hmotou chodců při návrhové situaci 1
- **C7 N2:** hmota lávky s hmotou chodců při návrhové situaci 2
- **C8 Vandal.:** hmota lávky s hmotou vandalů na lávce

## 10. Odhad tlumení konstrukce



Hodnota útlumu závisí na materiálu konstrukce a zároveň i na lokálních podmínkách podepření a celkovém uspořádání. Například osazení zábradlí a hmota pochozího povrchu lávky může způsobit dodatečný nárůst útlumu.

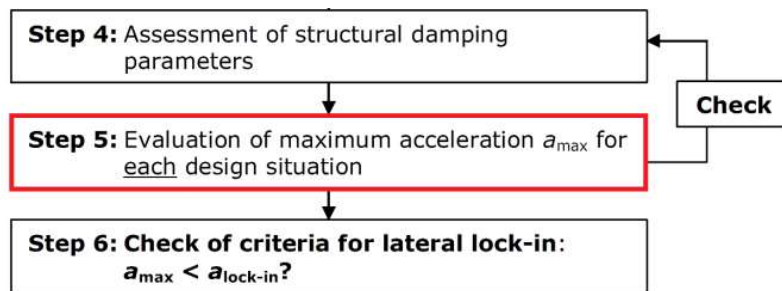


V literatuře [2]; [3] jsou uvedeny minimální a střední hodnoty poměrného útlumu. Metodika [4] Fib bulletin 32: 2005 Guidelines for the design of footbridges, uvádí střední a minimální hodnoty logaritmického dekrementu útlumu v závislosti na použitém materiálu, kotvení a typu konstrukce.

Hodnota logaritmického dekrementu útlumu byla stanovena pomocí tab. 5.8 - 5.10 z [4].

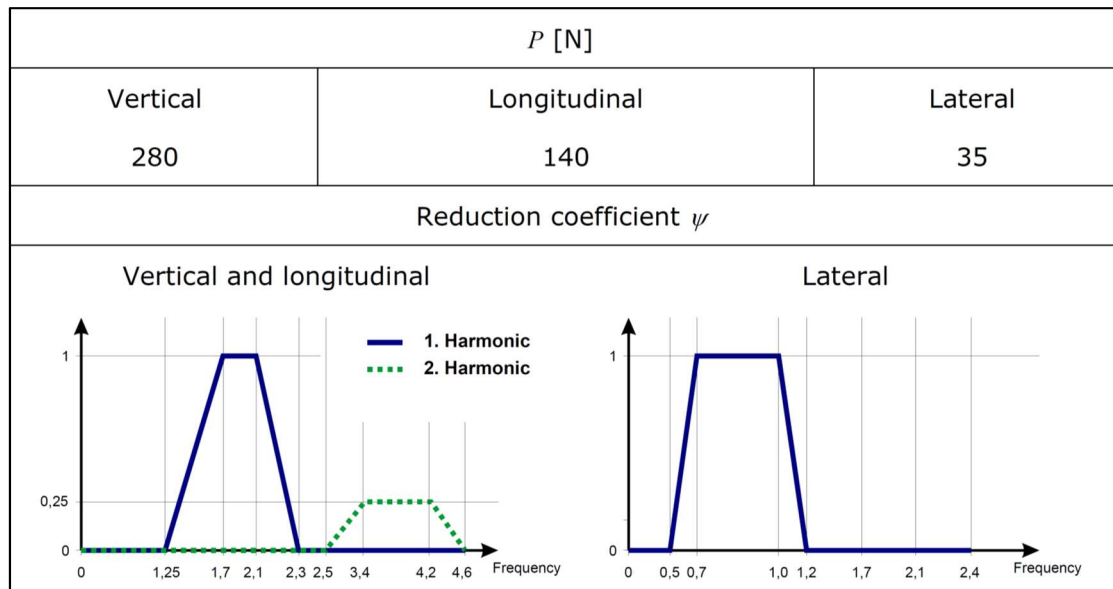
- $\delta=0,035$  - logaritmický dekrement útlumu
- $\xi= \delta / 2\pi$  poměrný útlum (pro malé hodnoty útlumu)
- $\xi= 0,0055$  - (hodnota poměrného útlumu je v literatuře udávána v procentech)

## 11. Vyhodnocení amplitud zrychlení



### 11.1. Zatěžovací stavy na samotné lávce

Zatěžovací stavy jsou zadány jako harmonické zatížení o frekvenci odpovídající vlastní frekvenci lávky v kritické oblasti pro každou návrhovou situaci. Hodnoty zatížení pro zatěžovací stavy odpovídající buzení jednotlivých frekvencí jsou určeny dle tab.4-8 [2]. Zatížení je zadáno vždy ve směru amplitud vlastního tvaru kmitání, tak aby vyvozovalo maximální účinky.



*Obr. 11 tab. 4-8 z [2]*

Hodnoty redukčního součinitele  $\psi$  jsou odečteny z grafů uvedených na **Obr.11**. Vyšetřované frekvence odpovídají svislým vlastním tvarům. Vzhledem k tomu, že vlastní tvary kmitání jsou svislé, je uvažována pouze svislá budící síla. Nejprve je dle rovnice (2) určen ekvivalentní počet chodců na lávce pro návrhovou situaci  $N_i$  a poté je vypočteno harmonické zatížení od chodců dle rovnice (1).

Charakteristiky potřebné pro výpočet zatížení:

$B = 2,94 \text{ m}$	šířka lávky
$L = 45,14 \text{ m}$	rozpětí
$S = 132,7 \text{ m}^2$	pochozí plocha na lávce
$d_1 = 0,5 \text{ os./m}^2$	hustota provozu při první návrhové situaci
$d_2 = 0,2 \text{ os./m}^2$	hustota provozu při druhé návrhové situaci
$n_{N1} = d_i * S$	počet osob na mostě při dané návrhové situaci
$P_v = 280 \text{ N}$	svislá budící síla vyvozená jedním chodcem

### 11.1.1. Zatěžovací stavy pro Návrhovou situaci 1 – Otevření lávky

Zatěžovací stavy pro Návrhovou situaci 1 jsou vázány s kombinací hmot C6 N1.

Ekvivalentní počet chodců na lávce pro návrhovou situaci N1:

$$n'_{N1} = \frac{10,8 * \sqrt{\xi * n_{N1}}}{S} = \frac{10,8 * \sqrt{0,0055 * 132,7 * 0,5}}{132,7} = 0,05 \text{ [os./m}^2\text{]}$$

#### 11.1.1.1. $N1_{f1}$ (Harmonické zatížení chodci v první vlastní frekvenci)

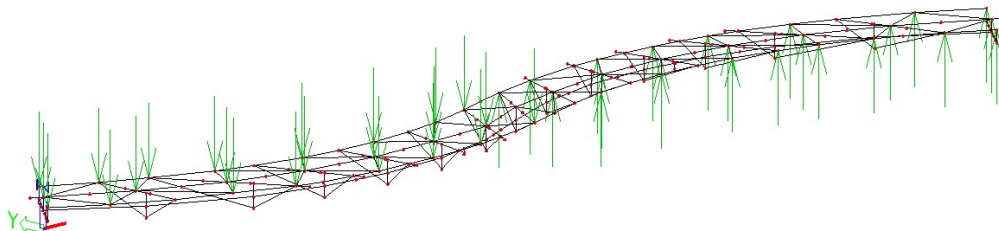
První vlastní frekvence pro první návrhovou situaci má hodnotu  $f_1=1,96\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f1} = 1 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_1 * t) * 0,05 * 1 = 14 * \cos(2\pi f_1 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

POZN.: Software Scia Engineer 18.0.2033 (studentská verze) umožňuje zadání harmonického zatížení pouze jako bodové síly v uzlu. Bodové síly jsou proto rovnoměrně rozděleny do uzlů po délce mostovky prutového modelu, dohromady je zadáno 46 bodových sil. 14 sil je zadáno po délce prvku podélníku a 16 bodových sil na každém ze dvou římsových nosníků. Směr zatížení je zadán vždy dle vlastního tvaru kmitání. Harmonické bodové síly pro zadání do modelu jsou označeny  $F_{N1,f1}$ . Pro zadání harmonického zatěžovacího stavu je potřeba zadat logaritmický dekrement tlumení konstrukce, frekvenci zatížení a kombinaci hmot konstrukce (liší se pro návrhové situace, viz 9.3.1.).

$$F_{N1,f1} = p(t) * \frac{S}{46} = 14 * \cos(2\pi f_1 t) * \frac{132,7}{46} = 39,71 * \cos(2\pi f_1 t) \text{ [N]}$$



Obr. 12 Zatěžovací stav  $N1_{f1}$

### 11.1.1.2. $N1_{f_2}$ (Harmonické zatížení chodci v druhé vlastní frekvenci)

Druhá vlastní frekvence pro první návrhovou situaci má hodnotu  $f_2=2,34\text{Hz}$ . Nenachází se tedy v oblasti harmonických frekvencí lidského kroku. Buzení druhého vlastního tvaru chodci tak není uvažováno.

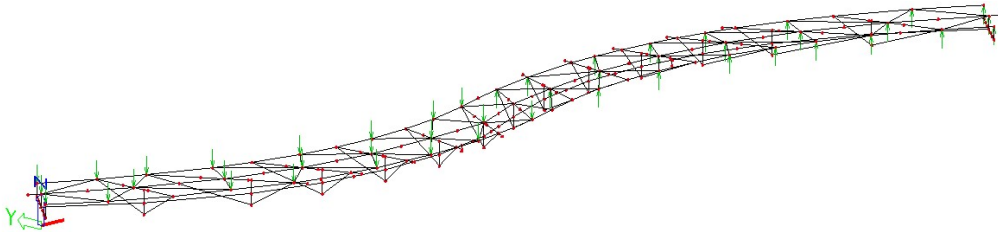
### 11.1.1.3. $N1_{f_3}$ (Harmonické zatížení chodci v třetí vlastní frekvenci)

Třetí vlastní frekvence pro první návrhovou situaci má hodnotu  $f_3=4,09\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti druhé harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_3} = 0,25 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_3 * t) * 0,05 * 0,25 = 3,44 * \cos(2\pi f_3 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N1,f_3} = p(t) * \frac{S}{46} = 3,44 * \cos(2\pi f_1 t) * \frac{132,7}{46} = 9,93 * \cos(2\pi f_3 t) [N]$$



*Obr. 13 Zatěžovací stav  $N1_{f_3}$*

## 11.1.2. Zatěžovací stavy pro Návrhovou situaci 2 – Běžný provoz

Zatěžovací stavy pro Návrhovou situaci 1 jsou vázány s kombinací hmot C7 N2.

Ekvivalentní počet chodců na lávce pro návrhovou situaci N2.

$$n'_{N2} = \frac{10,8 * \sqrt{\xi * n_{N2}}}{S} = \frac{10,8 * \sqrt{0,0055 * 132,7 * 0,2}}{132,7} = 0,03 [\text{os./m}^2]$$

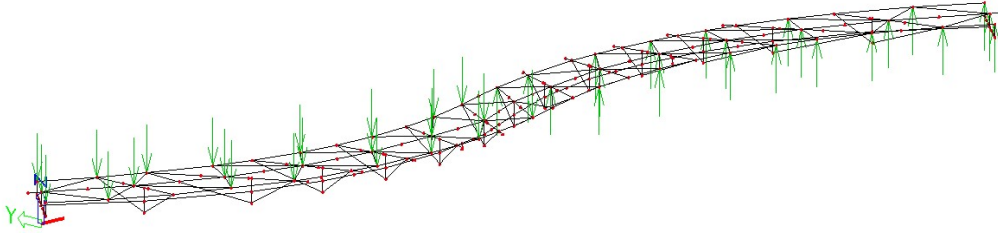
### 11.1.2.1. $N2_{f_1}$ (Harmonické zatížení chodci v první vlastní frekvenci)

První vlastní frekvence pro druhou návrhovou situaci má hodnotu  $f_1=2,08\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_1} = 1 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_1 * t) * 0,03 * 1 = 8,71 * \cos(2\pi f_1 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N2,f_1} = p(t) * \frac{S}{46} = 8,71 * \cos(2\pi f_1 t) * \frac{132,7}{46} = 25,12 * \cos(2\pi f_2 t) [N]$$



*Obr. 14 Zatěžovací stav N2\_f1*

#### 11.1.2.2. N2\_f2 (Harmonické zatížení chodci v druhé vlastní frekvenci)

Druhá vlastní frekvence pro druhou návrhovou situaci má hodnotu  $f_2=2,50\text{Hz}$ . Nenachází se tedy v oblasti harmonických frekvencí lidského kroku. Buzení druhého vlastního tvaru chodci tak není uvažováno.

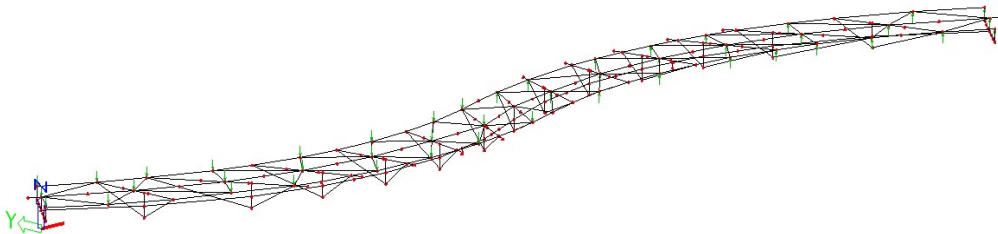
#### 11.1.2.3. N2\_f3 (Harmonické zatížení chodci v třetí vlastní frekvenci)

Třetí vlastní frekvence pro druhou návrhovou situaci má hodnotu  $f_3=4,30\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f1} = 0,19 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_3 * t) * 0,03 * 0,19 = 1,63 * \cos(2\pi f_3 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N2,f1} = p(t) * \frac{S}{46} = 1,63 * \cos(2\pi f_1 t) * \frac{132,7}{46} = 4,71 * \cos(2\pi f_3 t) [N]$$



*Obr. 15 Zatěžovací stav N2\_f3*

## 11.2. Amplitudy zrychlení

POZN.: Po provedení lineárního výpočtu v programu SCIA jsou výsledné amplitudy zrychlení pro jednotlivé zatěžovací stavy uvedeny v nabídce Výsledky > Dynamika > Zrychlení uzlů.

### 11.2.1. Návrhová situace 1 - Otevření lávky

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_1=1,96\text{Hz}$ :

$$a_{v,N1,f1} = 0,7\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda svislého zrychlení}$$

$$a_{h,N1,f1} = 0,7\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda vodorovného zrychlení}$$

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_3=4,09\text{Hz}$ :

$$a_{v,N1,f3} = 0,3\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda svislého zrychlení}$$

$$a_{h,N1,f3} = 0,1\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda vodorovného zrychlení}$$

### 11.2.1. Návrhová situace 2 – Běžný provoz

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_1=2,02\text{Hz}$ :

$a_{v,N2,f1} = 0,6\text{m/s}^2$                       amplituda svislého zrychlení

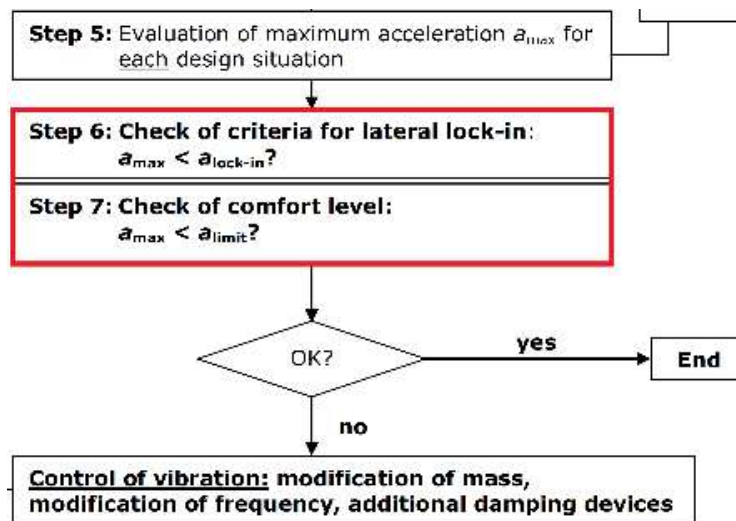
$a_{h,N2,f1} = 0,5\text{m/s}^2$                       amplituda vodorovného zrychlení

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_3=4,22\text{Hz}$ :

$a_{v,N2,f3} = 0,2\text{m/s}^2$                       amplituda svislého zrychlení

$a_{h,N2,f3} = 0,1\text{m/s}^2$                       amplituda vodorovného zrychlení

## 12. Vyhodnocení hodnot zrychlení



### 12.1. Lock-in efekt

Hodnoty vlastních frekvencí nejsou z hlediska příčného kmitání v nebezpečné oblasti. Kmitání lávky v příčném směru nenastává. Riziko vzniku efektu „lock-in“ je vyloučeno.

POZN.: Skupiny chodců synchronizující se s frekvencí svislého kmitání nebyly dosud pozorovány.

### 12.2. Splnění mezních hodnot zrychlení

#### 12.2.1. Návrhová situace 1 – Otevření lávky

Hodnoty zrychlení v první návrhové situaci vyhovují určeným mezním hodnotám, viz **Tab.5**.

Návrhová situace 1 Otevření lávky		Zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]		Podmínka
		Model	Mez	$a_{model} < a_{mez}$
		$a_{model} =$	$a_{mez} =$	
pro $f_1$ :	svislé:	0,7	1,0	Vyhovuje
	vodorovné:	0,7	0,4	Nevyhovuje
pro $f_3$ :	svislé:	0,3	1,0	Vyhovuje
	vodorovné:	0,1	0,4	Vyhovuje

Tab. 5 Vyhodnocení hodnot zrychlení při návrhové situaci 1

### 12.2.2. Návrhová situace 2 – Běžný provoz

Mezní hodnoty v druhé návrhové situaci při synchronizaci chodců v první vlastní frekvenci lávky nejsou splněny z hlediska vodorovného zrychlení, svislé zrychlení je na mezní hodnotě, viz **tab.6**.

Návrhová situace 2 Běžný provoz		Zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]		Podmínka
		Model	Mez	$a_{\text{model}} \leq a_{\text{mez}}$
		$a_{\text{model}} =$	$a_{\text{mez}} =$	
pro $f_1$ :	svislé:	0,6	0,7	Vyhovuje
	vodorovné:	0,5	0,2	Nevyhovuje
pro $f_3$ :	svislé:	0,2	0,7	Vyhovuje
	vodorovné:	0,1	0,2	Vyhovuje

Tab. 6 Vyhodnocení hodnot zrychlení při návrhové situaci 2

POZN.: Díky atypickému tvaru konstrukce dochází při buzení svislého kmitání částečně i ke kroucení konstrukce, proto jsou kontrolovány i mezní hodnoty vodorovného zrychlení.

## 13. Vandalismus

### 13.1. Zatěžovací stavy představující vandalismus

Zatěžovací stavy jsou určeny dle **6.3.** Je nutno uvést, že vandalismem vynucené kmitání ve frekvencích druhého harmonického stavu nebylo pozorováno. Synchronizace větší skupiny osob v druhé harmonické frekvenci lidského kroku je téměř nemožná. Větší synchronizace osob byla pozorována pro skupiny lidí pohupujících se v kolenou. Pro lepší souhru je vhodné pokud se členové skupiny drží za ruce, či pokud je použit metronom pro snazší udržení rytmu. Posuzovány jsou proto pouze vlastní frekvence nacházející se v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$S=132,7$  [m<sup>2</sup>]                      pochozí plocha na lávce

$d_v=1$  [os./m<sup>2</sup>]                      hustota provozu

$P=700$  [N]                              budící síla od působení jednoho vandala

$n'=1$  [os./m<sup>2</sup>]                      ekvivalentní počet chodců v synchronizaci

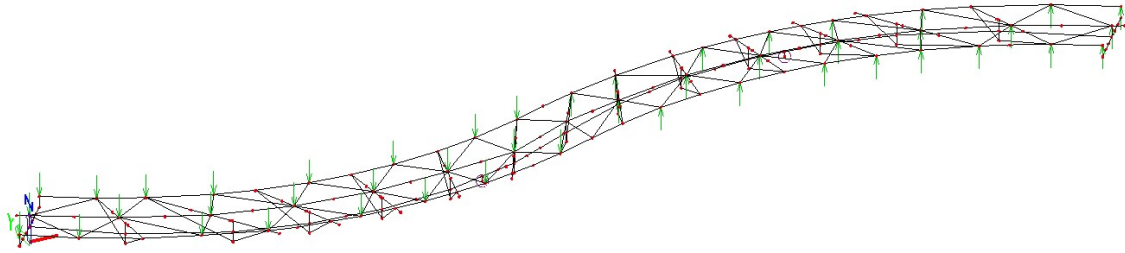
- Uvažováno je harmonické zatížení  $p(t)=700\text{N/m}^2$  (hustota provozu  $d_v=1$  os./m<sup>2</sup>)
- Frekvence lidského kroku všech chodců na lávce je brána totožná s vyšetřovanou vlastní frekvencí lávky ( $n' = n / S$ ;  $\psi = 1$ ).

#### 13.1.1. Vandal $f_1$

První vlastní frekvence lávky s uvážením hmoty davu vandalů má hodnotu  $f_1=1,82\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$p_v(t) = 700 * \cos(2\pi * f_1 * t) = 700 * \cos(2\pi f_1 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{V,f_1} = p(t) * \frac{S}{46} = 700 * \cos(2\pi f_1 t) * \frac{132,7}{46} = 2019,35 * \cos(2\pi f_1 t) [N]$$



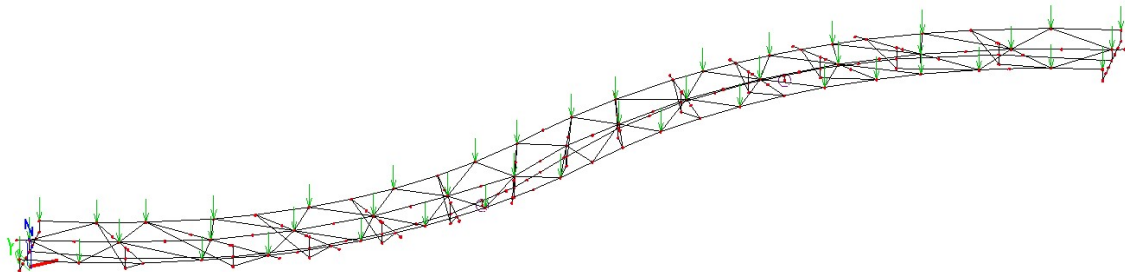
*Obr. 16 Zatěžovací stav Vandal f1*

### 13.1.2. Vandal f2

Druhá vlastní frekvence lávky s uvážením hmoty davu vandalů má hodnotu  $f_1=2,23\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$p_v(t) = 700 * \cos(2\pi * f_2 * t) = 700 * \cos(2\pi f_2 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{V,f_2} = p(t) * \frac{S}{46} = 700 * \cos(2\pi f_2 t) * \frac{132,7}{46} = 2019,35 * \cos(2\pi f_2 t) [N]$$



*Obr. 17 Zatěžovací stav Vandal f2*

## 13.2. Posouzení hodnot napětí

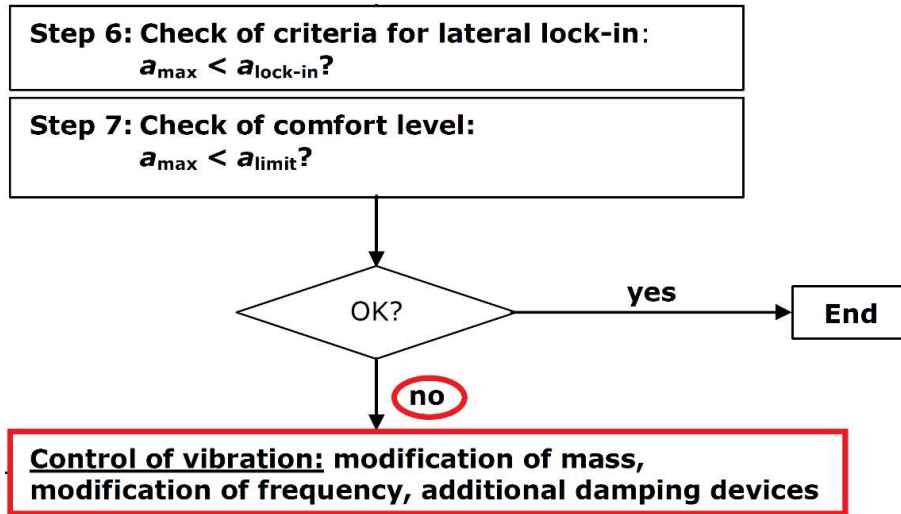
Posouzení účinků vynuceného kmitání (vandalismu) v tuto chvíli postrádá smysl, jelikož nejsou splněny stanovené podmínky maximálního zrychlení pro běžné užívání lávky.

## 14. Návrh tlumiče kmitání

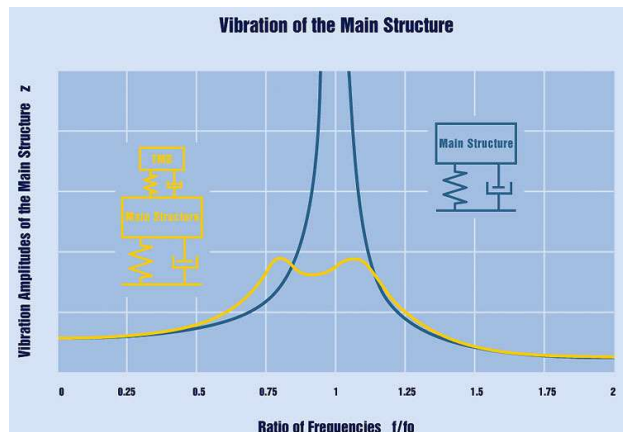
Zjištěné hodnoty zrychlení na lávce nevyhovují pro navrženou třídu pohody návrhové situace 2. Vhodným opatřením musí být optimalizována dynamická odezva lávky. Nejjednodušším opatřením pro již postavenou lávku je zvýšení útlumu konstrukce, toho lze dosáhnout použitím vhodného tlumiče kmitání.

Jako pohlcovač kmitání je navržen tzv. TMD (tuned mass damper), jedná se o hmotu připojenou ke konstrukci pomocí pružiny a tlumiče, viz **Obr.18**. TMD je naladěný na frekvenci, kterou má tlumit. Hmotnost TMD je nepatrná ve srovnání s hmotností konstrukce, při buzení tak dochází k velkým výkmitům TMD, tím je pohlcována energie vlastního kmitání lávky.

## 14.1. Návrh TMD



Navrženy jsou dva pohlcovače kmitání, jeden tlumící první vlastní tvar, umístěný zhruba ve čtvrtině rozpětí. Druhý pohlcovač kmitání je umístěný na druhé straně blíže středu rozpětí konstrukce a je tak umístěn pro tlumení druhého vlastního tvaru. Pohlcovače kmitání jsou umístěny uvnitř kruhového profilu hlavního nosníku, z praktického hlediska je to ideální místo, kam se dá zařízení umístit tak, aby plnilo svou funkci a zároveň nenarušovalo vzhled konstrukce.



Obr. 18 Princip TMD

POZN.: Tlumení druhého vlastního tvaru je bezpečnostní opatření nevynucené normou, nicméně je k němu přistoupeno z následujícího důvodu: frekvence druhého vlastního tvaru se pohybuje na pomezí spektra daného metodikou [2]. Při neočekávané obsazenosti lávky se může tato druhá vlastní frekvence dostat do nebezpečného spektra první harmonické frekvence lidského kroku. (Např. metodika [3] uvádí oblast frekvencí 2,1 – 2,6 Hz jako oblast středního rizika pro vznik rezonance)

### 14.1.1. Volba hmoty TMD

Navrženy jsou dva TMD o hmotnosti 750kg.

$$m_{d1} = 750 \text{ kg}$$

hmotnost prvního TMD

$$m_{d2} = 750 \text{ kg}$$

hmotnost druhého TMD

$$m_d = 1500 \text{ kg}$$

hmotnost navržených pohlcovačů kmitání ( $m_{d1} + m_{d2}$ )



$m_s = 25000 \text{ kg}$  hmotnost konstrukce, dle [5]  
 $\mu = \frac{m_d}{m_s} = \frac{1500}{2500} = 0,06 [-]$  poměr hmotnosti (ideálně 0,03-0,05)

POZN.: Do modelu je hmota obou TMD zadána jako hmota v uzlu.

#### 14.1.2. Určení vhodné frekvence TMD

$\delta_{opt} = \frac{1}{1+\mu} = \frac{1}{1+0,06} = 0,94$  optimální poměr frekvence TMD a tlumené vlastní frekvence lávky

$f_{s1} = 2,08 \text{ Hz}$  první vlastní frekvence samotné konstrukce lávky

$f_{s2} = 2,50 \text{ Hz}$  druhá vlastní frekvence samotné konstrukce lávky

$f_{di} = \delta_{opt} * f_{si}$  vlastní frekvence TMD

$f_{d1} = 1,96 \text{ Hz}$  vlastní frekvence, na kterou je naladěno první TMD

$f_{d2} = 2,36 \text{ Hz}$  vlastní frekvence, na kterou je naladěno druhé TMD

#### 14.1.3. Určení poměrného útlumu TMD

$\xi_{opt} = \sqrt{3\mu/(8(1+\mu)^3)} = \sqrt{\frac{3*0,06}{8*(1+0,06)^3}}$

$\xi_{opt} = 0,137 [-]$  poměrný útlum TMD

#### 14.1.4. Určení konstant TMD

$k_{di} = (2\pi f_{di})^2 m_{di}$  tuhost TMD

$k_{d1} = (2\pi f_{d1})^2 m_{d1} = (2\pi * 1,96)^2 * 750$

$k_{d1} = 114,01 \left[\frac{kN}{m}\right]$  tuhost prvního TMD

$k_{d2} = (2\pi f_{d2})^2 m_{d2} = (2\pi * 2,38)^2 * 750$

$k_{d2} = 164,70 \left[\frac{kN}{m}\right]$  tuhost druhého TMD

#### 14.1.5. Hodnoty TMD pro zadání do výpočetního modelu

POZN.: Oba TMD jsou do modelu zadány pomocí fiktivního prutu kruhového průřezu.

$l_{TMD} = 0,2 \text{ m}$  návrh délky fiktivního prutu

$d_{TMD} = 0,2 \text{ m}$  návrh průměru fiktivního prutu

$A_{TMD} = 0,0314 \text{ m}^2$  plocha fiktivního prutu

$E_{TMD,i} = k_{di} l_{TMD} A_{TMD}$  náhradní tuhost TMD

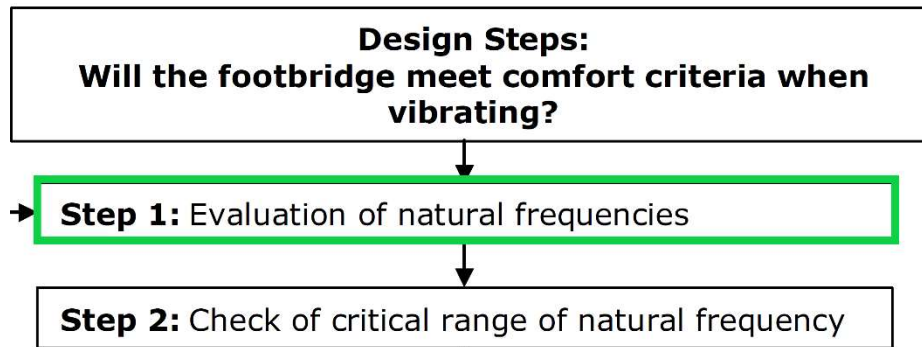
$E_{TMD,1} = k_{d1} l_{TMD} A_{TMD} = 114,01 * 0,2 * 0,0314$

$E_{TMD,1} = 0,73 \text{ [MPa]}$  náhradní tuhost prvního TMD

$E_{TMD,2} = k_{d2} l_{TMD} A_{TMD} = 167,34 * 0,2 * 0,0314$

$E_{TMD,2} = 1,05 \text{ [MPa]}$  náhradní tuhost druhého TMD

## 15. Vyhodnocení vlastních frekvencí lávky s TMD



### 15.1. Vlastní frekvence lávky s TMD

Lávky jsou obecně velmi lehké konstrukce, a proto je vhodné provést opětovné vyhodnocení vlastních frekvencí konstrukce, nyní ovšem se započítáním váhy pohlcovačů kmitání, viz **tab.7**.

C1 TMD		C2 N1 + TMD		C3 N2 + TMD		C4 vandal + TMD	
n [-]	frekvence $f_n$ [Hz]	n [-]	frekvence $f_n$ [Hz]	n [-]	frekvence $f_n$ [Hz]	n [-]	frekvence $f_n$ [Hz]
1	1,84	1	1,79	1	1,84	1	1,74
2	2,12	2	2,04	2	2,12	2	1,97
3	2,26	3	2,20	3	2,26	3	2,14
4	2,72	4	2,61	4	2,72	4	2,54
5	4,34	5	4,10	5	4,32	5	3,75
6	5,28	6	5,02	6	5,28	6	4,76
7	5,52	7	5,40	7	5,52	7	5,29
8	5,89	8	5,82	8	5,89	8	5,75
9	6,26	9	6,18	9	6,26	9	6,08
10	6,65	10	6,50	10	6,65	10	6,40

*Tab. 7 Vlastní frekvence lávky s hmotou TMD, se započítáním hmoty chodců při návrhových situacích a v případě vandalismu*

POZN.: **Tab.7** uvádí vlastní frekvence konstrukce s uvážením následujících kombinací hmot.

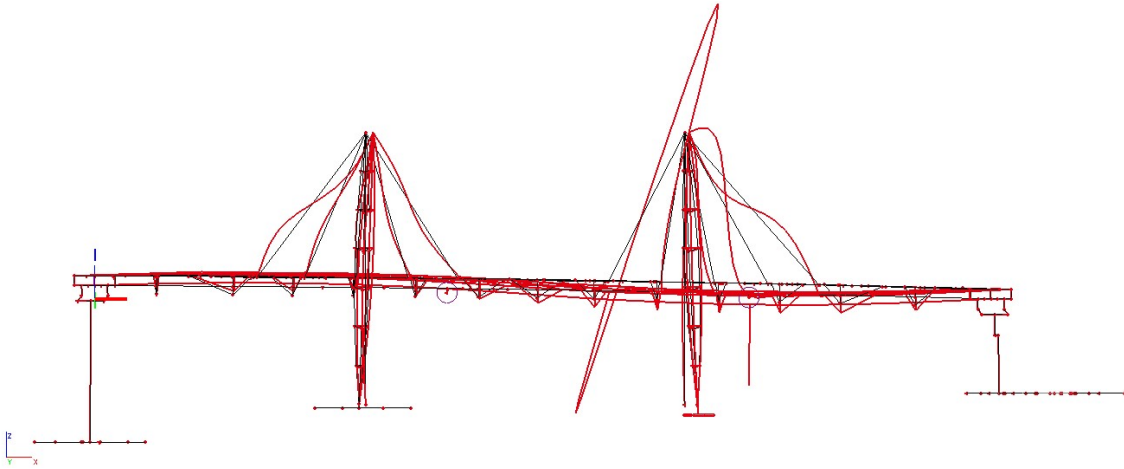
- **C1 TMD:** hmota lávky s hmotou TMD
- **C2 N1 + TMD:** hmota lávky s hmotou TMD a s hmotou chodců při návrhové situaci 1
- **C3 N2 + TMD:** hmota lávky s hmotou TMD a s hmotou chodců při návrhové situaci 2
- **C4 Vandal. + TMD:** hmota lávky s hmotou TMD a s hmotou vandalů na lávce

### 15.2. Vlastní tvary lávky s TMD

Na následujících obrázcích je vykresleno prvních pět vlastních tvarů kmitání, které jsou z hlediska dynamické analýzy významné.

### 15.2.1. První vlastní tvar lávky s TMD

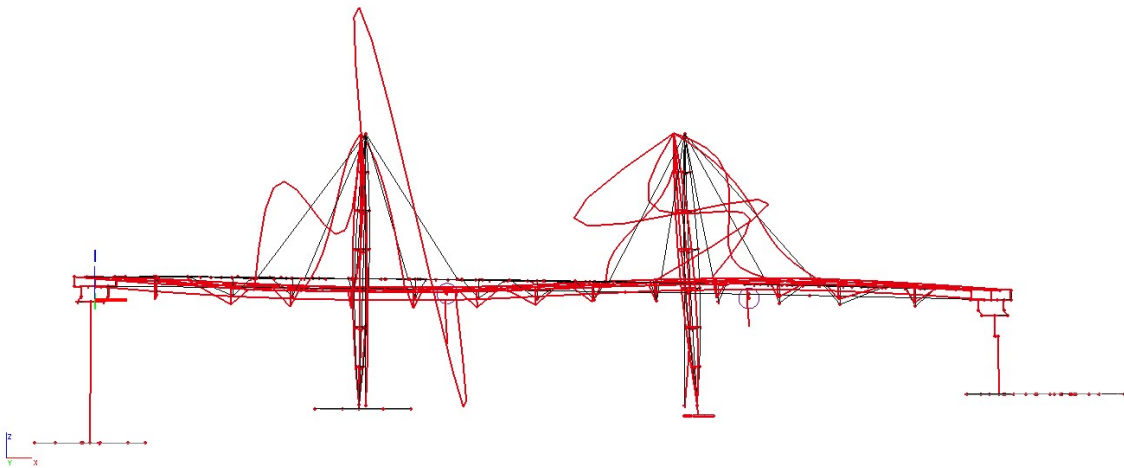
Vlastní tvar č.1 je svislý, částečně dochází ke kroucení, díky atypickému tvaru konstrukce. Frekvence prvního vlastního tvaru je  $f_1=1,84$  Hz.



*Obr. 19 První vlastní tvar lávky s TMD*

### 15.2.2. Druhý vlastní tvar lávky s TMD

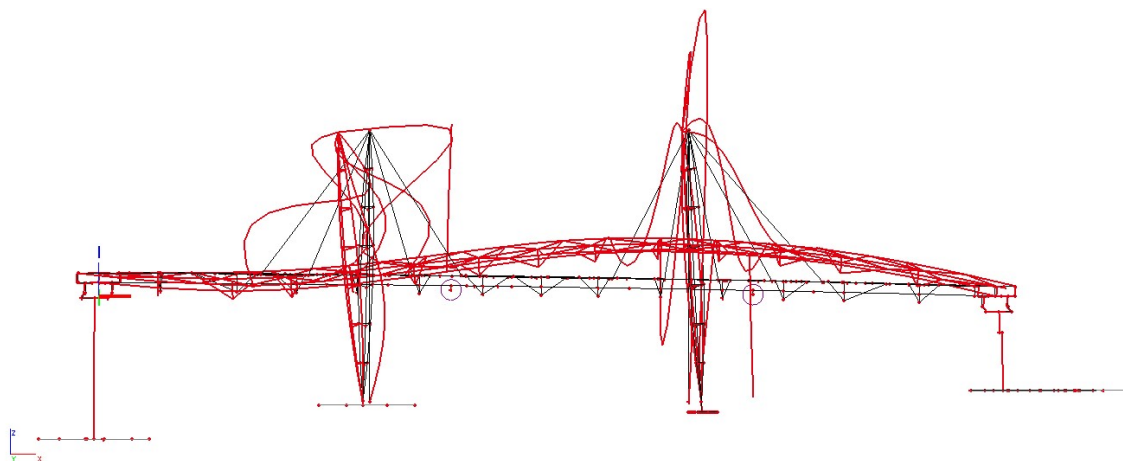
Vlastní tvar č.2 je svislý, částečně dochází ke kroucení, díky atypickému tvaru konstrukce. Frekvence druhého vlastního tvaru je  $f_2=2,12$  Hz.



*Obr. 20 Druhý vlastní tvar lávky s TMD*

### 15.2.3. Třetí vlastní tvar lávky s TMD

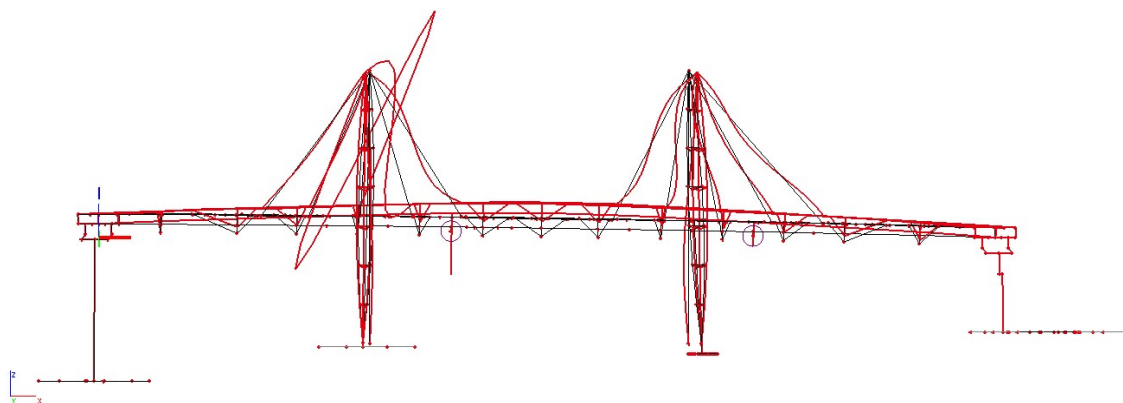
Vlastní tvar č.3 je svislý, částečně dochází ke kroucení, díky atypickému tvaru konstrukce. Frekvence třetího vlastního tvaru je  $f_3=2,26$  Hz.



Obr. 21 Třetí vlastní tvar lávky s TMD

#### 15.2.4. Čtvrtý vlastní tvar lávky s TMD

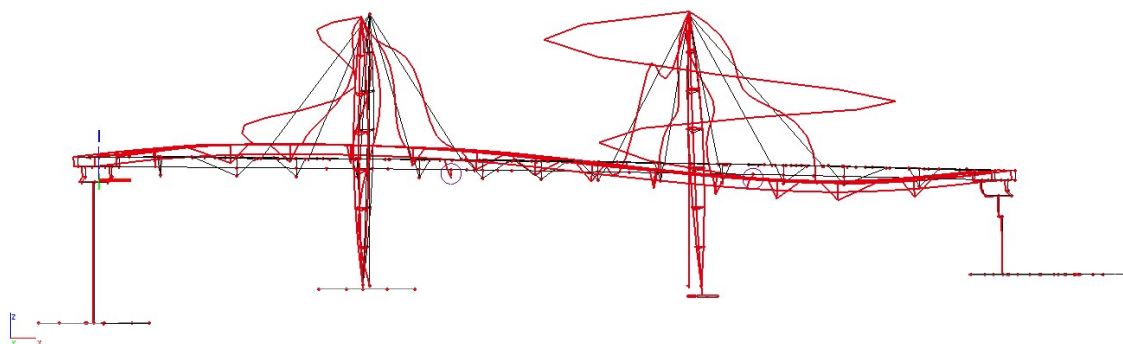
Vlastní tvar č.4 je svislý. Frekvence čtvrtého vlastního tvaru je  $f_4=2,72$  Hz.



Obr. 22 Čtvrtý vlastní tvar lávky s TMD

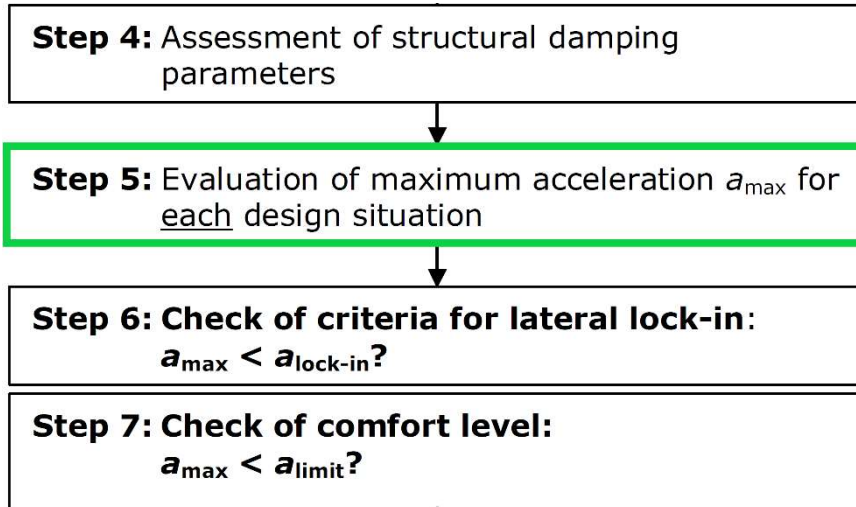
#### 15.2.5. Pátý vlastní tvar lávky s TMD

Vlastní tvar č.5 je svislý. Frekvence pátého vlastního tvaru je  $f_4=4,34$  Hz.



Obr. 23 Pátý vlastní tvar lávky s TMD

## 16. Vyhodnocení amplitud zrychlení lávky s TMD



### 16.1. Zatěžovací stavy na lávce s TMD

Zatěžovací stavy jsou určeny stejným postupem jako v 11.1..

#### 16.1.1. Zatěžovací stavy pro návrhovou situaci 1 na lávce s instalovanými TMD

Zatěžovací stavy pro Návrhovou situaci 1 jsou vázány s kombinací hmot C2 N1 + TMD.

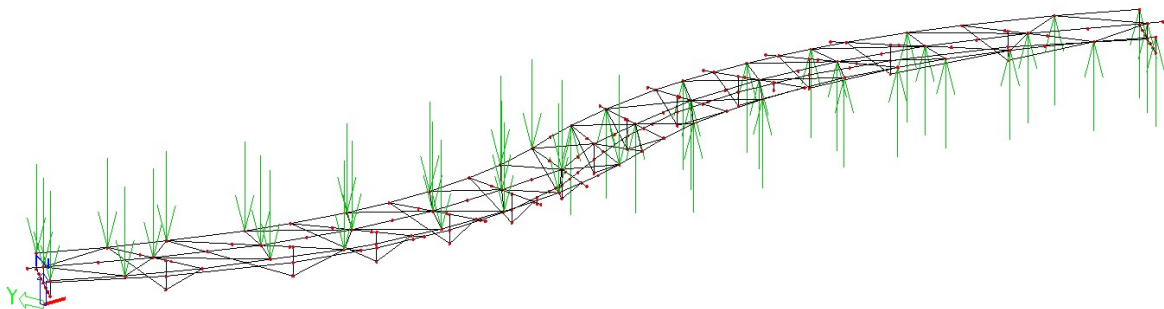
##### 16.1.1.1. N1\_f1\_TMD

První vlastní frekvence pro první návrhovou situaci má hodnotu  $f_1=1,79\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_1} = 1,00 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_1 * t) * 0,05 * 1 = 13,77 * \cos(2\pi f_1 t) \left[\frac{N}{m^2}\right]$$

$$F_{N1,f1,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 13,77 * \cos(2\pi f_1 t) * \frac{132,7}{46} = 39,71 * \cos(2\pi f_1 t) [N]$$



Obr. 24 Zatěžovací stav N1\_f1\_TMD

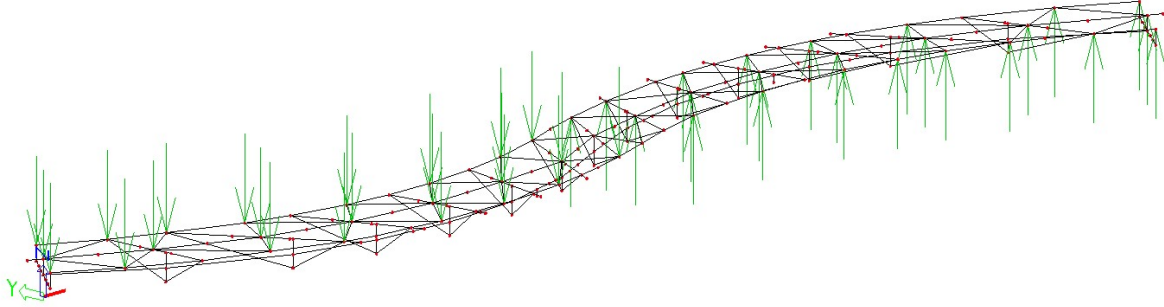
#### 16.1.1.2. *N1\_f2\_TMD*

Druhá vlastní frekvence pro první návrhovou situaci má hodnotu  $f_2=2,04\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_2} = 1,00 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_2 * t) * 0,05 * 1 = 13,77 * \cos(2\pi f_2 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N1,f_2,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 13,77 * \cos(2\pi f_2 t) * \frac{132,7}{46} = 39,71 * \cos(2\pi f_2 t) [N]$$



*Obr. 25 Zatěžovací stav N1\_f2\_TMD*

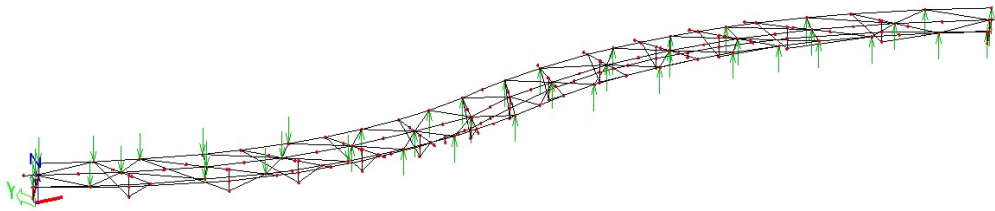
#### 16.1.1.3. *N1\_f3\_TMD*

Třetí vlastní frekvence pro první návrhovou situaci má hodnotu  $f_3=2,20\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_3} = 0,50 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_3 * t) * 0,05 * 0,50 = 6,88 * \cos(2\pi f_3 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N1,f_3,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 6,88 * \cos(2\pi f_3 t) * \frac{132,7}{46} = 19,86 * \cos(2\pi f_3 t) [N]$$



*Obr. 26 Zatěžovací stav N1\_f3\_TMD*

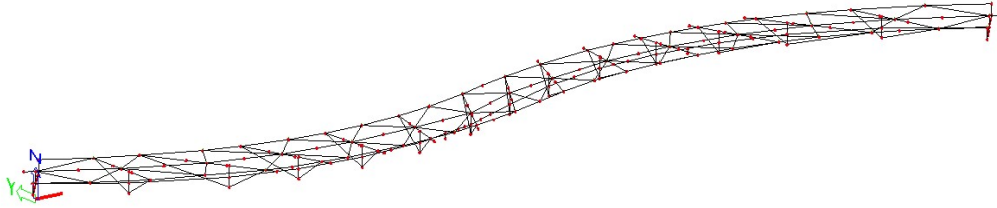
#### 16.1.1.4. *N1\_f4\_TMD*

Čtvrtá vlastní frekvence pro první návrhovou situaci má hodnotu  $f_4=2,61\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti druhé harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_4} = 0,03 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_4 * t) * 0,05 * 0,03 = 0,42 * \cos(2\pi f_4 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N1,f_4,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 0,42 * \cos(2\pi f_4 t) * \frac{132,7}{46} = 1,21 * \cos(2\pi f_4 t) [N]$$



*Obr. 27 Zatěžovací stav N1\_f4\_TMD*

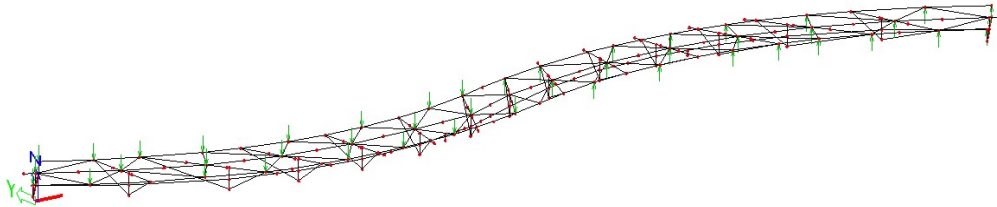
#### 16.1.1.5. N1\_f5\_TMD

Pátá vlastní frekvence pro první návrhovou situaci má hodnotu  $f_5=4,10\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti druhé harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_5} = 0,25 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_5 t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_5 * t) * 0,05 * 0,25 = 3,44 * \cos(2\pi f_5 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N1,f_5,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 3,44 * \cos(2\pi f_5 t) * \frac{132,7}{46} = 9,93 * \cos(2\pi f_5 t) [N]$$



*Obr. 28 Zatěžovací stav N1\_f5\_TMD*

#### 16.1.2. Zatěžovací stavy pro návrhovou situaci 2 na lávce s instalovanými TMD

Zatěžovací stavy pro Návrhovou situaci 2 jsou vázány s kombinací hmot C3 N2 + TMD.

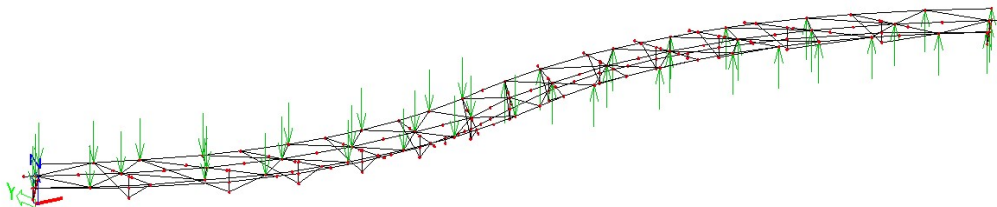
##### 16.1.2.1. N2\_f1\_TMD

První vlastní frekvence pro druhou návrhovou situaci má hodnotu  $f_1=1,84\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_1} = 1,00 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_1 t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_1 * t) * 0,05 * 1 = 8,71 * \cos(2\pi f_1 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N2,f_1,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 8,71 * \cos(2\pi f_1 t) * \frac{132,7}{46} = 25,12 * \cos(2\pi f_1 t) [N]$$



*Obr. 29 Zatěžovací stav N2\_f1\_TMD*

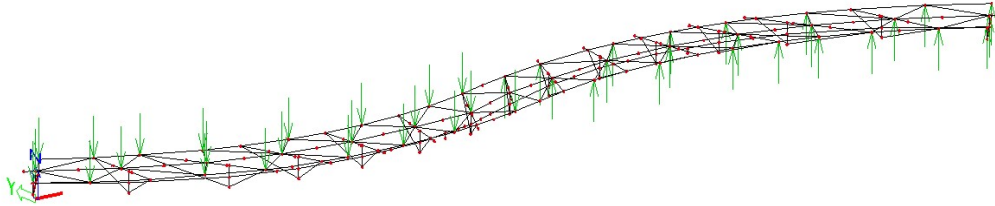
#### 16.1.2.2. $N2\_f2\_TMD$

Druhá vlastní frekvence pro druhou návrhovou situaci má hodnotu  $f_2=2,12\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_2} = 0,90 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_2 * t) * 0,05 * 0,90 = 7,84 * \cos(2\pi f_2 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N2,f2,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 7,84 * \cos(2\pi f_2 t) * \frac{132,7}{46} = 22,60 * \cos(2\pi f_2 t) [N]$$



*Obr. 30 Zatěžovací stav  $N2\_f2\_TMD$*

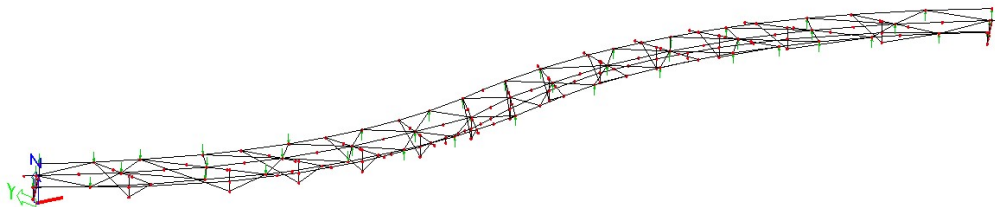
#### 16.1.2.3. $N2\_f3\_TMD$

Třetí vlastní frekvence pro druhou návrhovou situaci má hodnotu  $f_3=2,26\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_3} = 0,20 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_3 * t) * 0,05 * 0,20 = 1,74 * \cos(2\pi f_3 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N2,f3,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 1,74 * \cos(2\pi f_3 t) * \frac{132,7}{46} = 5,02 * \cos(2\pi f_3 t) [N]$$



*Obr. 31 Zatěžovací stav  $N2\_f3\_TMD$*

#### 16.1.2.4. $N2\_f4\_TMD$

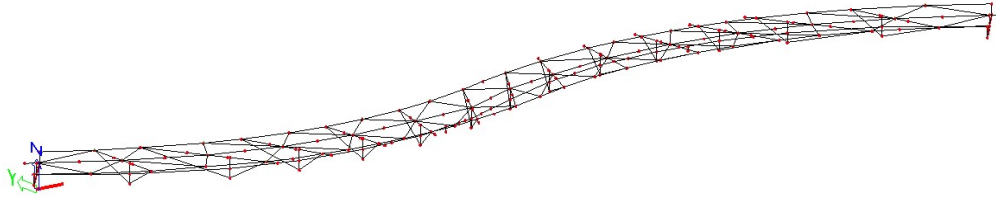
Čtvrtá vlastní frekvence pro druhou návrhovou situaci má hodnotu  $f_4=2,72\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti druhé harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f_4} = 0,06 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_s t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_4 * t) * 0,05 * 0,06 = 0,53 * \cos(2\pi f_4 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N2,f4,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 0,53 * \cos(2\pi f_4 t) * \frac{132,7}{46} = 1,53 * \cos(2\pi f_4 t) [N]$$





Obr. 32 Zatěžovací stav N2\_f4\_TMD

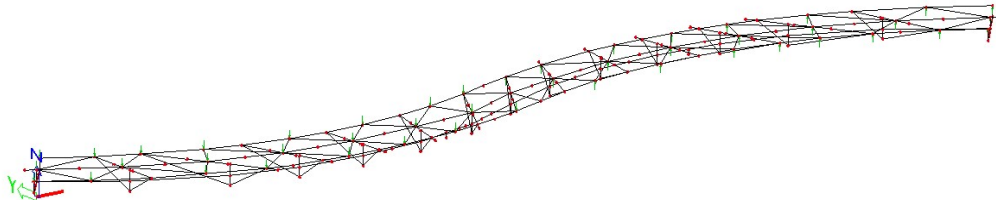
### 16.1.2.5. N2\_f5\_TMD

Pátá vlastní frekvence pro druhou návrhovou situaci má hodnotu  $f_4=4,32\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti druhé harmonické frekvence lidského kroku.

$$\psi_{f5} = 0,18 \quad [-]$$

$$p_v(t) = P * \cos(2\pi f_5 t) * n' * \psi = 280 * \cos(2\pi * f_5 * t) * 0,05 * 0,05 = 1,52 * \cos(2\pi f_5 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{N2,f5,TMD} = p(t) * \frac{S}{46} = 1,52 * \cos(2\pi f_5 t) * \frac{132,7}{46} = 4,40 * \cos(2\pi f_5 t) [N]$$



Obr. 33 Zatěžovací stav N2\_f5\_TMD

## 16.2. Amplitudy zrychlení na lávce s TMD

POZN.: Po provedení lineárního výpočtu v programu SCIA jsou výsledné amplitudy zrychlení pro jednotlivé zatěžovací stavy uvedeny v nabídce Výsledky > Dynamika > Zrychlení uzlů.

### 16.2.1. Návrhová situace 1 - Otevření lávky

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_1=1,80\text{Hz}$ :

$$a_{v,N1,f1,TMD} = 0,4\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda svislého zrychlení}$$

$$a_{h,N1,f1,TMD} = 0,3\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda vodorovného zrychlení}$$

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_2=2,03\text{Hz}$ :

$$a_{v,N1,f2,TMD} = 0,4\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda svislého zrychlení}$$

$$a_{h,N1,f2,TMD} = 0,3\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda vodorovného zrychlení}$$

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_3=2,22\text{Hz}$ :

$$a_{v,N1,f3,TMD} = 0,1\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda svislého zrychlení}$$

$$a_{h,N1,f3,TMD} = 0,1\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda vodorovného zrychlení}$$

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_4=2,63\text{Hz}$ :

$$a_{v,N1,f4,TMD} = 0,0\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda svislého zrychlení}$$

$$a_{h,N1,f4,TMD} = 0,0\text{m/s}^2 \quad \text{amplituda vodorovného zrychlení}$$

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_3=4,11\text{Hz}$ :

$a_{v,N1,f_3,TMD} = 0,1\text{m/s}^2$                       amplituda svislého zrychlení

$a_{h,N1,f_3,TMD} = 0,1\text{m/s}^2$                       amplituda vodorovného zrychlení

### 16.2.2. Návrhová situace 2 – Běžný provoz

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_1=1,82\text{Hz}$ :

$a_{v,N2,f_1,TMD} = 0,2\text{m/s}^2$                       amplituda svislého zrychlení

$a_{h,N2,f_1,TMD} = 0,1\text{m/s}^2$                       amplituda vodorovného zrychlení

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_2=2,09\text{Hz}$ :

$a_{v,N2,f_2,TMD} = 0,3\text{m/s}^2$                       amplituda svislého zrychlení

$a_{h,N2,f_2,TMD} = 0,2\text{m/s}^2$                       amplituda vodorovného zrychlení

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_3=2,25\text{Hz}$ :

$a_{v,N2,f_3,TMD} = 0,1\text{m/s}^2$                       amplituda svislého zrychlení

$a_{h,N2,f_3,TMD} = 0,0\text{m/s}^2$                       amplituda vodorovného zrychlení

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_4=2,68\text{Hz}$ :

$a_{v,N2,f_4,TMD} = 0,1\text{m/s}^2$                       amplituda svislého zrychlení

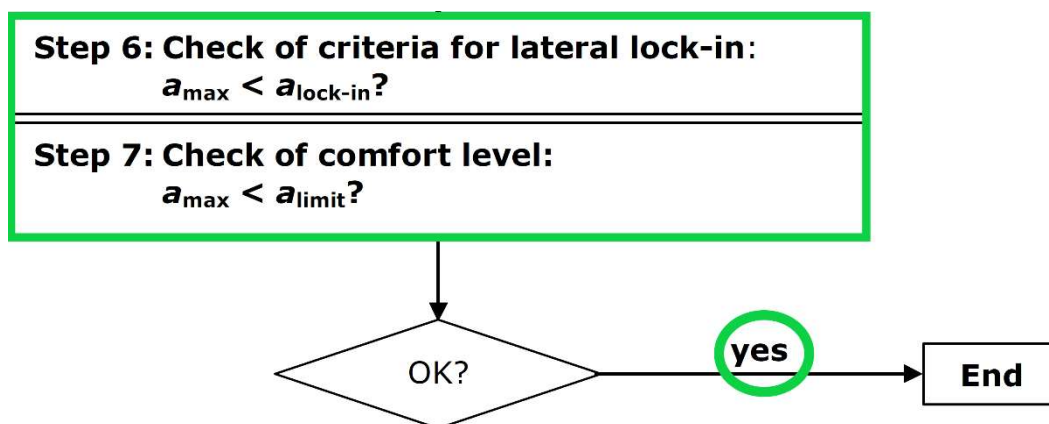
$a_{h,N2,f_4,TMD} = 0,0\text{m/s}^2$                       amplituda vodorovného zrychlení

Amplitudy zrychlení při harmonickém zatížení chodci synchronizovanými ve frekvenci  $f_5=4,25\text{Hz}$ :

$a_{v,N2,f_5,TMD} = 0,0\text{m/s}^2$                       amplituda svislého zrychlení

$a_{h,N2,f_5,TMD} = 0,0\text{m/s}^2$                       amplituda vodorovného zrychlení

## 17. Vyhodnocení hodnot zrychlení na lávce s TMD



## 17.1. Lock-in efekt

Hodnoty vlastních frekvencí nejsou z hlediska příčného kmitání v nebezpečné oblasti. Kmitání lávky v příčném směru nenastává. Riziko vzniku efektu „lock-in“ je vyloučeno.

### 17.1. Splnění mezních hodnot zrychlení

#### 17.1.1. Návrhová situace 1 – Otevření lávky

Hodnoty zrychlení v první návrhové situaci vyhovují určeným mezním hodnotám, viz **Tab.8**.

Návrhová situace 1 Otevření lávky		Zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]		Podmínka
		Model	Mez	$a_{\text{model}} < a_{\text{mez}}$
		$a_{\text{model}} =$	$a_{\text{mez}} =$	
pro $f_1$ :	svislé:	0,4	1,0	Vyhovuje
	vodorovné:	0,3	0,4	Vyhovuje
pro $f_2$ :	svislé:	0,4	1,0	Vyhovuje
	vodorovné:	0,3	0,4	Vyhovuje
pro $f_3$ :	svislé:	0,1	1,0	Vyhovuje
	vodorovné:	0,1	0,4	Vyhovuje
pro $f_4$ :	svislé:	0,0	1,0	Vyhovuje
	vodorovné:	0,0	0,4	Vyhovuje
pro $f_5$ :	svislé:	0,1	1,0	Vyhovuje
	vodorovné:	0,1	0,4	Vyhovuje

Tab. 8 Vyhodnocení hodnot zrychlení při návrhové situaci 1 na lávce s TMD

#### 17.1.2. Návrhová situace 2 – Běžný provoz

Hodnoty zrychlení v první návrhové situaci vyhovují určeným mezním hodnotám, viz **Tab.9**.

Návrhová situace 2 Běžný provoz		Zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]		Podmínka
		Model	Mez	$a_{\text{model}} < a_{\text{mez}}$
		$a_{\text{model}} =$	$a_{\text{mez}} =$	
pro $f_1$ :	svislé:	0,2	0,7	Vyhovuje
	vodorovné:	0,1	0,2	Vyhovuje
pro $f_2$ :	svislé:	0,3	0,7	Vyhovuje
	vodorovné:	0,2	0,2	Vyhovuje
pro $f_3$ :	svislé:	0,1	0,7	Vyhovuje
	vodorovné:	0,0	0,2	Vyhovuje
pro $f_4$ :	svislé:	0,1	0,7	Vyhovuje
	vodorovné:	0,0	0,2	Vyhovuje
pro $f_5$ :	svislé:	0,0	0,7	Vyhovuje
	vodorovné:	0,0	0,2	Vyhovuje

Tab. 9 Vyhodnocení hodnot zrychlení při návrhové situaci 2 na lávce s TMD

## 18. Vandalismus na lávce s TMD

Vlastní tvary kmitání jsou svislé. Kmitání je buzeno ve svislém směru.

### 18.1. Zatěžovací stavy k vyhodnocení účinků vandalismu

Zatěžovací stavy jsou určeny stejným postupem jako v 13.1..

#### 18.1.1. Vlastní tíha

Zatížení vlastní tíhou je generováno softwarem SCIA Engineer.

#### 18.1.2. Předpětí

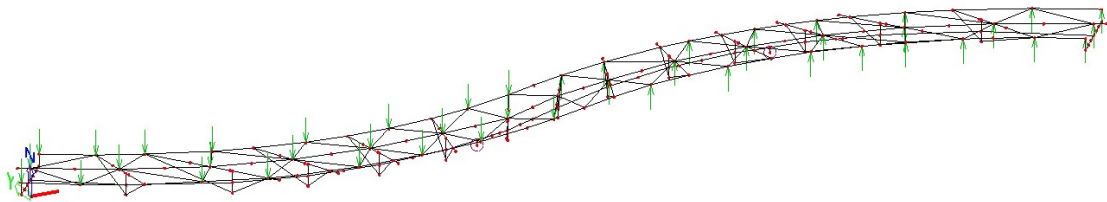
Pro vyhodnocení účinků vandalismu na konstrukci je potřeba znát i účinky předpětí závěsů lávky. Hodnoty předpětí jsou zadány dle [5].

#### 18.1.3. Vandal $f_1$ \_TMD

První vlastní frekvence lávky s uvážením hmoty davu vandalů má hodnotu  $f_1=1,74\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$p_v(t) = 700 * \cos(2\pi * f_1 * t) = 700 * \cos(2\pi f_1 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{V,f_1} = p(t) * \frac{S}{46} = 700 * \cos(2\pi f_1 t) * \frac{132,7}{46} = 2019,35 * \cos(2\pi f_1 t) [N]$$



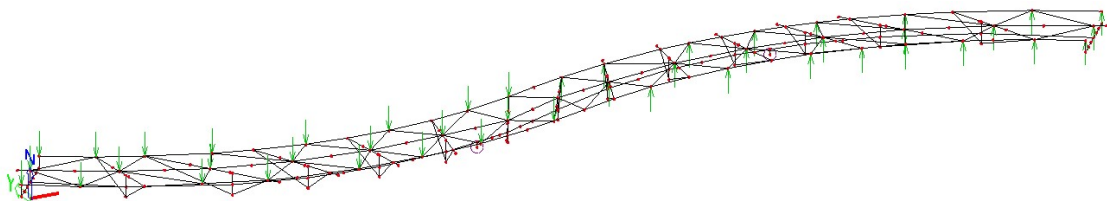
Obr. 34 zatěžovací stav Vandal  $f_1$ \_TMD

#### 18.1.4. Vandal $f_2$ \_TMD

Druhá vlastní frekvence lávky s uvážením hmoty davu vandalů má hodnotu  $f_2=1,97\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$p_v(t) = 700 * \cos(2\pi * f_2 * t) = 700 * \cos(2\pi f_2 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{V,f_2} = p(t) * \frac{S}{46} = 700 * \cos(2\pi f_2 t) * \frac{132,7}{46} = 2019,35 * \cos(2\pi f_2 t) [N]$$



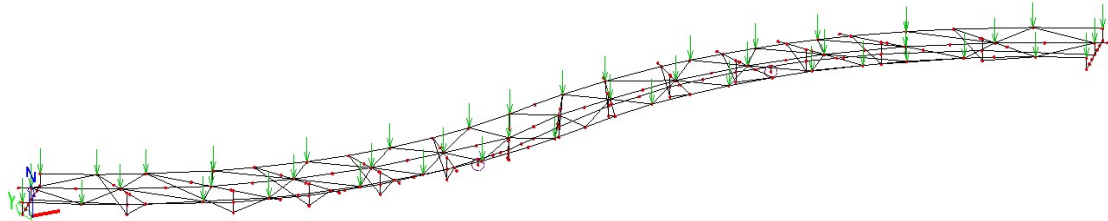
Obr. 35 zatěžovací stav Vandal  $f_2$ \_TMD

### 18.1.5. Vandal $f_3$ \_TMD

Třetí vlastní frekvence lávky s uvážením hmoty davu vandalů má hodnotu  $f_3=2,14\text{Hz}$ . Nachází se tedy v oblasti první harmonické frekvence lidského kroku.

$$p_v(t) = 700 * \cos(2\pi * f_3 * t) = 700 * \cos(2\pi f_3 t) \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$F_{V,f_3} = p(t) * \frac{S}{46} = 700 * \cos(2\pi f_3 t) * \frac{132,7}{46} = 2019,35 * \cos(2\pi f_{31} t) [N]$$



*Obr. 36 zatěžovací stav Vandal  $f_3$ \_TMD*

## 18.2. Kontrola vynuceného kmitání (zrychlení)

Hodnoty zrychlení dosažené vynuceným kmitáním vandaly jsou následující:

Amplitudy zrychlení dosažené vynuceným kmitáním vandaly synchronizovanými ve frekvenci  $f_1=1,74\text{Hz}$ :

$$a_{v,f_1,TMD} = 25,1 \text{ m/s}^2 \quad \text{amplituda svislého zrychlení}$$

$$a_{h,f_1,TMD} = 18,3 \text{ m/s}^2 \quad \text{amplituda vodorovného zrychlení}$$

Amplitudy zrychlení dosažené vynuceným kmitáním vandaly synchronizovanými ve frekvenci  $f_2=1,97\text{Hz}$ :

$$a_{v,f_2,TMD} = 15,6 \text{ m/s}^2 \quad \text{amplituda svislého zrychlení}$$

$$a_{h,f_2,TMD} = 17,4 \text{ m/s}^2 \quad \text{amplituda vodorovného zrychlení}$$

Amplitudy zrychlení dosažené vynuceným kmitáním vandaly synchronizovanými ve frekvenci  $f_3=2,160\text{Hz}$ :

$$a_{v,f_3,TMD} = 32,7 \text{ m/s}^2 \quad \text{amplituda svislého zrychlení}$$

$$a_{h,f_3,TMD} = 8,7 \text{ m/s}^2 \quad \text{amplituda vodorovného zrychlení}$$

Hodnoty vybuzeného svislého zrychlení překračují hodnotu  $\frac{1}{2}g$ , hodnoty vodorovného zrychlení přesahují  $\frac{1}{10}g$ . Vzhledem k tomu, že prováděný výpočet je lineární, jsou velikosti zatížení pro zatěžovací stavy sníženy v přímé úměře tak, aby zrychlení na lávce dosáhlo buď maximálně  $4,9 \text{ m/s}^2$  ve svislém směru nebo  $0,98 \text{ m/s}^2$  ve směru vodorovném.

### 18.2.1. Upravené hodnoty zatížení

Pro zatěžovací stav Vandal  $f_{1\_TMD}$ :

$$F_{V,f1,N} = \frac{F_{V,f1} \cdot 0,1g}{a_{h,f1,TMD}} = \frac{2019,35 \cdot 0,98}{18,3} = 98,2 * \cos(2\pi f_1 t) [N]$$

Pro zatěžovací stav Vandal  $f_{2\_TMD}$ :

$$F_{V,f2,N} = \frac{F_{V,f2} \cdot 0,1g}{a_{h,f2,TMD}} = \frac{2019,35 \cdot 0,98}{17,4} = 103,3 * \cos(2\pi f_2 t) [N]$$

Pro zatěžovací stav Vandal  $f_{3\_TMD}$ :

$$F_{V,f3,N} = \frac{F_{V,f3} \cdot 0,1g}{a_{h,f3,TMD}} = \frac{2019,35 \cdot 0,98}{8,7} = 206,6 * \cos(2\pi f_3 t) [N]$$

## 18.3. Mimořádná kombinace zatížení – Vandalismus

Pro zjištění vnitřních sil při mimořádné návrhové situaci – Vandalismu, je sestavena kombinace zatěžovacích stavů dle rovnice 6.11b z [6] ČSN EN 1990 ed.2 2011.

$$E_d = G_k + P + A_d$$

$E_d$	Návrhové zatížení
$G_k$	Zatížení stálé (v tomto případě vlastní tíha konstrukce)
$P$	Předpětí
$A_d$	Mimořádné zatížení (v tomto případě vandalismus)

## 18.4. Posouzení účinků vandalismu na lávce s TMD

Nejvíce namáhaným prvkem lávky při působení vandalů je závěs. Jedná se o první vnější závěs na pylonu u tlumiče prvního vlastního tvaru kmitání. Průřez závěsu je posouzen na vnitřní síly od kombinace zatížení stálého (včetně předpětí) a zatížení vyvolané vandalismem.

Závěs je z oceli S460, plného kruhového průřezu o průměru 30mm.

Vnitřní síly:

Mimořádná kombinace - Vandalismus

N	Vy	Vz	Mx	My	Mz
[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
62,17	0,01	0,31	0,00	1,01	0,01

Charakteristiky průřezu:

Ocel	S460	-	<i>materiál</i>
$f_y$ =	460	MPa	<i>-mez kluzu</i>
$f_u$ =	560	MPa	<i>-mez pevnosti</i>
$E$ =	210 000	MPa	<i>-Younguv modul pružnosti</i>
$G$ =	81 000	MPa	<i>-modul pružnosti ve smyku</i>

**Rozvojové projekty MŠMT**  
**Rozvojové projekty mladých týmů 2018**

$\varepsilon = \sqrt{(235 \cdot 210\,000) / (f_y \cdot E)}$			-materiálový součinitel
$\varepsilon =$	0,715	-	
$d =$	30	mm	-průměr
$A =$	706,86	mm <sup>2</sup>	-plocha
$W_{pl,y} =$	4500	mm <sup>3</sup>	-elastický průřezový modul k ose y
$W_{pl,z} =$	4500	mm <sup>3</sup>	-elastický průřezový modul k ose z
$i_y =$	7	mm	-poloměr setrvačnosti k ose y
$i_z =$	7	mm	-poloměr setrvačnosti k ose z
$I_y =$	39761	mm <sup>4</sup>	-moment setrvačnosti k ose y
$I_z =$	39761	mm <sup>4</sup>	-moment setrvačnosti k ose z
$I_t =$	79522	mm <sup>4</sup>	-moment setrvačnosti v kroucení

**Zatřídění průřezu:**

Prvek je posouzen plasticky. (1.třída)

**Posouzení tlaku:**

$N_{Ed} =$	62,17	kN	-osová síla
$N_{Rd} = A f_y / \gamma_{M0}$			-návrhová elastická únosnost plného průřezu
$N_{Rd} =$	325,16	kN	

$N_{Ed} =$	62,17	≤	325,2	= $N_{pl,Rd}$	<b>VYHOVUJE</b>
Využití:	19,12%	≤	100,00%		

**Posouzení smyku:**

$V_{ed,y} =$	0,01	kN	-smyková síla ve směru osy y
$V_{ed,z} =$	0,31	kN	-smyková síla ve směru osy z
$A_{v,y} =$	636,17	mm <sup>2</sup>	-smyková plocha ve směru osy z
$A_{v,z} =$	636,17	mm <sup>2</sup>	-smyková plocha ve směru osy y
$V_{Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$			
$V_{Rd,y} =$	168,95	kN	-smyková únosnost ve směru osy y
$V_{Rd,z} =$	168,95	kN	-smyková únosnost ve směru osy z

$V_{Ed,y} =$	0,01	≤	169,0	= $V_{Rd,y}$	<b>VYHOVUJE</b>
Využití:	0,01%	≤	100,00%		

$V_{Ed,z} =$	0,31	≤	169,0	= $V_{Rd,z}$	<b>VYHOVUJE</b>
Využití:	0,18%	≤	100,00%		

Jedná se o **malý** smyk, nemusí být uvažován vliv smyku na ohybovou únosnost.

**Posouzení ohybového momentu:**

$M_{ed,y} =$	1,01	kNm	-ohybový moment okolo osy y
$M_{ed,z} =$	0,01	kNm	-ohybový moment okolo osy z
$M_{Rd} = W_{el} f_y / \gamma_{M0}$			
$M_{el,Rd,y} =$	2,07	kNm	-moment únosnosti okolo osy y
$M_{Rd,z} =$	2,07	kNm	-moment únosnosti okolo osy z

$M_{ed,y} =$	1,01	≤	2,1	= $M_{Rd,y}$	<b>VYHOVUJE</b>
Využití:	48,79%	≤	100,00%		

$M_{ed,z} =$	0,01	≤	2,1	= $M_{Rd,z}$	<b>VYHOVUJE</b>
Využití:	0,48%	≤	100,00%		

**Celková únosnost průřezu:**

$$N_{Ed}/A(f_y/\gamma_{M0}) + V_{y,Ed}/(\sqrt{3})A(f_y/\gamma_{M0}) + V_{z,Ed}/(\sqrt{3})A(f_y/\gamma_{M0}) + M_{y,Ed}/(\chi_{LT}W_{el,y}(f_y/\gamma_{M0})) + M_{z,Ed}/W_{el,z}(f_y/\gamma_{M0}) \leq 1$$

$\sigma_{x,ed} =$	0,69	≤	1,0	<b>VYHOVUJE</b>
Využití:	68,58%	≤	100,00%	

**Průřez závěsu vyhoví na dané zatížení.**

## 19. Závěr

Výpočtem vlastních frekvencí bylo zjištěno, že je nutné provést dynamickou analýzu lávky. Před výpočtem odezvy na normové zatížení byly stanoveny návrhové situace, které mohou nastat během životnosti lávky. Dalším výpočtem bylo zjištěno, že samotná konstrukce lávky nevyhoví na stanovené meze zrychlení, proto bylo přistoupeno k návrhu dodatečných tlumičů kmitání.

Navrženy jsou dva tlumiče TMD, tlumící první a druhý vlastní tvar kmitání lávky. Po opětovném vyhodnocení dynamické odezvy lávky s instalovanými tlumiči kmitání se mezní hodnoty zrychlení nacházejí ve stanovených mezích. V rámci dynamické analýzy bylo dále zjištěno, že efekt „lock-in“ nenastává a účinky vandalismu na lávce poruchu nezpůsobí.

Na závěr je třeba doporučit majiteli i správci lávky dodržení stanovených návrhových situací provozu na lávce a případné změny v užívání lávky konzultovat se specialisty.

V Praze dne 31.12.2018

Ing. Jakub Vůjtěch



## **20. Reference**

- [1] ČSN EN 1991-2-Z4
- [2] JRC, 2009, Design of Lightweight Bridges for Human Induced Vibrations
- [3] Sétra: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, 2006
- [4] Fib bulletin 32: Guidelines for the design of footbridges, 2005
- [5] Vybudování pěší lávky přes ulici K Barrandovu, Příloha 10-Statický výpočet, 2006
- [6] ČSN EN 1990 ed.2. 2011
- [7] Dynamická zatěžovací zkouška lávky pro pěší přes ulici „K Barrandovu“ v Praze 5, 2006

## 21. Příloha 1: Měřené vlastní frekvence lávky

V červnu roku 2006 po výstavbě lávky byla provedena dynamická zatěžovací zkouška na lávce na ulici K Barrandovu. Pro zajímavost jsou v následující tabulce uvedeny naměřené hodnoty vlastních frekvencí uvedené v [7]. Jejich korespondence s vypočítanými hodnotami je v průměru více než 92%.

Poř. č.	Vlastní frekvence		Frekvence útlumu	Logarit. dekrement	Poměrný útlum
(j)	$f_{(j)}$ [Hz]		$f_{b(j)}$ [Hz]	$\mathcal{D}_{b(j)}$ útlumu	$b_{r(j)}$
(1)	2.47	$\pm 0.02$	0.020	0.052	0.008
(2)	2.66	$\pm 0.02$	0.022	0.052	0.008
(3)	4.38	$\pm 0.02$	0.009	0.013	0.002
(4)	4.59	$\pm 0.02$	0.013	0.017	0.003
(5)	5.25	$\pm 0.02$	0.032	0.038	0.006
(6)	6.12	$\pm 0.02$	0.031	0.032	0.005
(7)	6.84	$\pm 0.02$	0.030	0.027	0.004

*Tab. 10 Vlastní frekvence lávky zjištěné při dynamické zatěžovací zkoušce v roce 2006*