

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra mechaniky



Dynamická analýza tribuny

Dynamic analysis of grandstand

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.

Jiří Hubka

Praha 2017



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hubka Jméno: Jiří Osobní číslo: 396654

Zadávací katedra: Katedra mechaniky k132

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Dynamická analýza tribuny

Název diplomové práce anglicky: Dynamic analysis of grandstand

Pokyny pro vypracování:

Realizace a vyhodnocení experimentu zaměřeného na vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání tribuny a na vynucené kmitání tribuny od diváků. Sestavení modelu tribuny, srovnání výsledků vypočtených a experimentálních.

Seznam doporučené literatury:

Miloš Pirner, Ondřej Fischer: Dynamika ve stavební praxi, Praha 2010

Miloslav Baťa, Václav Plachý, Vyšetřování dynamických účinků na stavební konstrukce, Praha 1978

Nuno Manuel Mendes Maia, Júlio Martins Montalvão e Silva, Theoretical and Experimental Modal Analysis, 1997

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 23.2.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017

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“.

23.2.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Tomáše Plachého, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, Ing. Tomáši Plachému, Ph.D. za pomoc při měření, za ochotu, za trpělivé jednání a za cenné rady při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Michalu Polákovi, CSc. A Ing. Martinu Vernerovi za výpomoc při měření, cenné rady a možnost podílet se na grantu GAČR 15-15728S „Analýza konstrukcí tribun“. Dále bych chtěl poděkovat firmě Peri spol. s.r.o. za příležitost k provedení experimentu a konkrétně Ing. Karlu Kovářovi.

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá experimentem na dynamickou analýzu montované tribuny postavené v Novém Městě na Moravě k příležitosti světového poháru v biatlonu. V první části je krátká rešerše dynamických experimentů provedených na tribunách. V druhé části je popis vlastního experimentu, vyhodnocení frekvencí a tvarů vlastního kmitání tribuny a vyhodnocení odezvy konstrukce na zatížení od diváků. Dále je v druhé části vytvoření konečněprvkového modelu, srovnání a ladění modelu s výsledky z experimentu. V závěru je provedeno shrnutí výsledků experimentu.

Klíčová slova: montovaná tribuna, modální analýza, vibrace, chování diváků

Abstract:

This diploma thesis deals with the experiment on the dynamic analysis of the demountable grandstand built in Nové Město na Moravě for the occasion of the World Cup in biathlon. In the first part there is a brief search of experiments carried out on grandstands. In the second part there is description of the experiment, evaluation of the natural frequencies and mode shapes of the grandstand, evaluation of the response of the structure on the load from the spectators. Creation of the finite element model, its comparison and verification with the experimental results. The conclusion summarizes the results of the experiment.

Keywords: Demountable grandstand, modal analysis, vibration, spectators' behavior

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Pojmy a zkratky	2
3 Platné normy a literatura.....	3
Nařízení vlády č. 272/2011 Sb.....	3
ČSN ISO 2631- Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím	3
ISO 10137 - Základy pro návrh konstrukcí - provozuschopnost budov a lávek proti	
vibracím	4
Zajímavá fakta dohledatelná v literatuře	6
4 Dosavadní experimenty ve světě	10
4.1 Kolaps konstrukcí	11
4.2 Příklady konstrukcí, u kterých se objevily problémy s vibracemi.....	11
4.3 Dosavadní experimenty	13
5 Způsoby měření	19
5.1 Jak a čím měříme vibrace	19
5.4 Modální analýza.....	21
FVT.....	23
AVT	23
5.4.1 Vyhodnocení a porovnání vlastních tvarů kmitání	24
Koeficient MAC	24
Koeficient COMAC.....	24
Koeficient CAMOSUC.....	25
6 Experiment.....	26
.1 Peri.....	26
6.1.1 Informace o projektu tribuny	26
6.1.2 Lešení PERI UP Rosett Flex.....	27
6.1.3 Popis konstrukce tribuny	28

2 Harmonogram experimentu	36
6.3 Modální Analýza.....	37
6.3.1 Použité přístroje	37
6.3.2 Popis měření	39
6.4 Měření odezvy od diváků	42
6.4.1 Použité přístroje	43
6.4.2 Popis měření	43
7 Vyhodnocení měření.....	47
7.1 Modální analýza, frekvence a tvary vlastního kmitání	47
7.1.1 Model.....	53
7.1.2 Porovnání modelu a skutečnosti	58
7.2 Vyhodnocení odezvy od diváků	64
7.2.1 Vyhodnocení chování diváků	64
7.2.2 Vyhodnocení extrému, které nastaly během závodu	69
7.2.3. Zajímavé situace, či situace, které mohli mít vliv na komfort diváků.....	74
7.2.4 Frekvence vypočtené z odezvy konstrukce	92
8 Závěr	96
9 Seznam použité literatury	97
10 Seznam obrázků.....	99
11 Seznam tabulek.....	103



1 Úvod

Síly vyvolané pohybem lidského davu mohou být u určitých typů konstrukcí kritické. Znatelná dynamická zatížení mohou být vyvolána i běžnými aktivitami, jako je chůze, běh, tanec, pochod nebo skákání. Lehké a pružné konstrukce, například lávky, mohou být na tento typ zatížení velice citlivé a v některých případech je dokonce může rozkmitat jedna osoba. Ještě větším problémem může být velká skupina lidí synchronně skákající, pohupující se nebo tančící na popových koncertech a sportovních utkáních. Vyvolané vibrace pak mohou být divákům nepříjemné, dokonce v nich vyvolávat pocity nevolnosti. Příliš velké vibrace pak mohou způsobit davovou paniku, či poškození konstrukce. Oboje pak může vést ke zraněním, až k úmrtím diváků. V nejhorším případě mohou nadměrné vibrace vést ke kolapsu konstrukce.

Jak již bylo naznačeno, lidé jsou schopni vyvolat mnohem větší dynamická zatížení pomocí intenzivních aktivit, jako je chůze, či běh, než zatížení statická svojí vlastní vahou. Tato dynamická zatížení se však obtížně předpovídají, jelikož jejich velikost a frekvenční složení je závislé na pohybech jednotlivých aktérů tvořících pohybující se masu.

Konkrétně pro tribuny nejsou v současnosti platných normách uvedena vhodná dynamická zatížení. Nicméně modely dynamického zatížení, které by simulovaly účinky davu diváku, jsou hledány. Experimenty potvrzující tyto modely už však tak časté nejsou.

Ve snaze zapojit se do zkoumání dané problematiky, byl proveden v prosinci 2016 experiment měření na konstrukci provizorní montované tribuny pro diváky na mistrovství světa v biatlonu v Novém Městě na Moravě. Cílem této práce je:

- Popsat experiment,
- zpracovat a vyhodnotit výsledky měření,
- pokusit se určit tuhosti jednotlivých prutů a styčnicků v konstrukci tribuny sladěním modelu s experimentem,
- zjistit frekvence a tvary vlastního kmitání konstrukce tribuny,
- vyhodnotit chování diváků a odezvu na toto chování.



2 Pojmy a zkratky

Bílý šum – má shodnou energii v jakémkoli frekvenčním pásmu konstantní šířky (nebo na jednotku šířky pásma) sledovaného spektra. Je to v podstatě náhodný signál s rovnoměrnou výkonovou spektrální hustotou.

BS – Britský standart, národní norma.

Fázor - komplexní číslo, jehož velikost značí amplitudu a jeho úhel fázi kmitání

FFT – Rychlá Fourierova transformace

Fourierovy koeficienty – koeficienty diskrétních harmonických složek Fourierovy řady.

FRF – Frequency Response Function, přenosová funkce. Frekvenčně závislý poměr fázoru odezvy pohybu k fázoru budící síly.

Harmonická (periodická veličina) – sinusoida, jejíž frekvence je celistvým násobkem základní frekvence

HZM a HZZ – Hromadný závod mužů a hromadný závod žen

ISO – International Organization for Standardization - Mezinárodní organizace zabývající se tvorbou norem

Kinetóza – nemoc z pohybu. Příznakem může být závrať, vyčerpání, či zvedání žaludku (například mořská nemoc)

Modální charakteristiky – frekvence a tvary vlastního kmitání, útlum

RMS zrychlení – neboli efektivní hodnota zrychlení, vzorec pro výpočet je

$$RMS \cong \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

T doba integrace,

a zrychlení,

t čas.

Vibrace – časová změna velikosti dané veličiny, která popisuje pohyb nebo polohu mechanické soustavy, je-li velikost střídavě větší, nebo menší než nějaká střední hodnota nebo referenční hodnota.



3 Platné normy a literatura

Tato kapitola bude věnována předpisům a normám, týkajícím se tématu diplomové práce, platným na našem území a faktům objevujícím se v další literatuře.

Platným předpisem je Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. A jednou z platných norem je ČSN ISO 2631-1 - Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím – Část 1: Všeobecné požadavky.

Nařízení vlády č. 272/2011 Sb.

V tomto nařízení jsou předpisy na:

- a) hygienické limity hluku a vibrací na pracovištích, způsob jejich zjišťování a hodnocení a minimální rozsah opatření k ochraně zdraví zaměstnance,
- b) hygienické limity hluku pro chráněný venkovní prostor, chráněné venkovní prostory staveb a chráněné vnitřní prostory staveb,
- c) hygienické limity vibrací pro chráněné vnitřní prostory staveb,
- d) způsob měření a hodnocení hluku a vibrací pro denní a noční dobu.

Toto nařízení však neobsahuje kritéria pro tribuny a proto se mu nebudeme dále věnovat

ČSN ISO 2631- Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím

Základním účelem této normy je definování metod kvantifikování celkových vibrací ve vztahu ke:

- zdraví a pohodlí člověka;
- pravděpodobnosti vnímání vibrací;
- výskytu nemoci z pohybu.

Uvažovaný frekvenční rozsah je 0,5 až 80 Hz pro zdraví, pohodlí a vnímání a 0,1 až 0,5 Hz pro nemoc z pohybu.

Norma uvádí návod k posouzení celkových vibrací s ohledem na zdraví. Je to použití vážené efektivní hodnoty zrychlení. V současnosti však panuje názor, že poškození zdraví jsou ovlivněna špičkovými hodnotami a je možné, že jsou podhodnocena metodami založenými pouze na průměrování efektivních hodnot. Proto v jistých situacích posuzuje špičkové hodnoty.



V další příloze norma uvádí společný názor na vztah mezi velikostí vibrací a pohodlím člověka. Vibrace se pak posuzují použitím efektivní hodnoty zrychlení, nebo v určitých případech na posouzení špičkových hodnot. Reakce na vibrační prostředí z hlediska pohodlí jsou závislé na mnoha faktorech (např. doba vystavení vibracím, zda osoba čte, konzumuje potraviny, nebo na hluku, teplotě, atd.) které se mění v každé situaci. A proto norma uvádí v odstavci C.2.3 přibližné údaje pravděpodobných reakcí na různé velikosti zrychlení v dopravních prostředcích.

Nižší než $0,315 \text{ m/s}^2$	nejsou nepohodlné
$0,315 \text{ m/s}^2$ až $0,63 \text{ m/s}^2$	trochu nepohodlné
$0,5 \text{ m/s}^2$ až 1 m/s^2	příjemně nepohodlné
$0,8 \text{ m/s}^2$ až $1,6 \text{ m/s}^2$	nepohodlné
$1,25 \text{ m/s}^2$ až $2,5 \text{ m/s}^2$	velmi nepohodlné
Vyšší než 2 m/s^2	extrémně nepohodlné

Norma však upozorňuje na to, že zkušenosti ukazují, že je velmi pravděpodobně, že pokud velikost vibrací i jen mírně překročí práh vnímání, budou si osoby v obytných budovách stěžovat.

Součástí normy je v příloze D pokyn pro posouzení účinků vibrací na výskyt nemoci z pohybu.

ISO 10137 - Základy pro návrh konstrukcí - provozuschopnost budov a lávek proti vibracím

Patří mezi dobrovolné mezinárodní normy ISO. Norma uvádí zdroje vibrací v budovách i mimo budovy a jedním z nich uvádí lidskou aktivitu. Jednou z možností buzení jsou opakované koordinované pohyby, jako jsou cvičení, tanec, běh skupiny lidí nebo pohyby diváků v halách či stadionech. Dále mohou lidé budit konstrukci chůzí nebo jednorázovým impulsem, jako je skákání po schodech, pád předmětu na zem nebo koordinovaná akce (např. na sportovní akci výskok diváků).

Norma dále hovoří o tom, jak vyhodnocovat odezvu, o metodách analýz nebo o vyhodnocování úrovně vibrací výpočtem, či měřením.

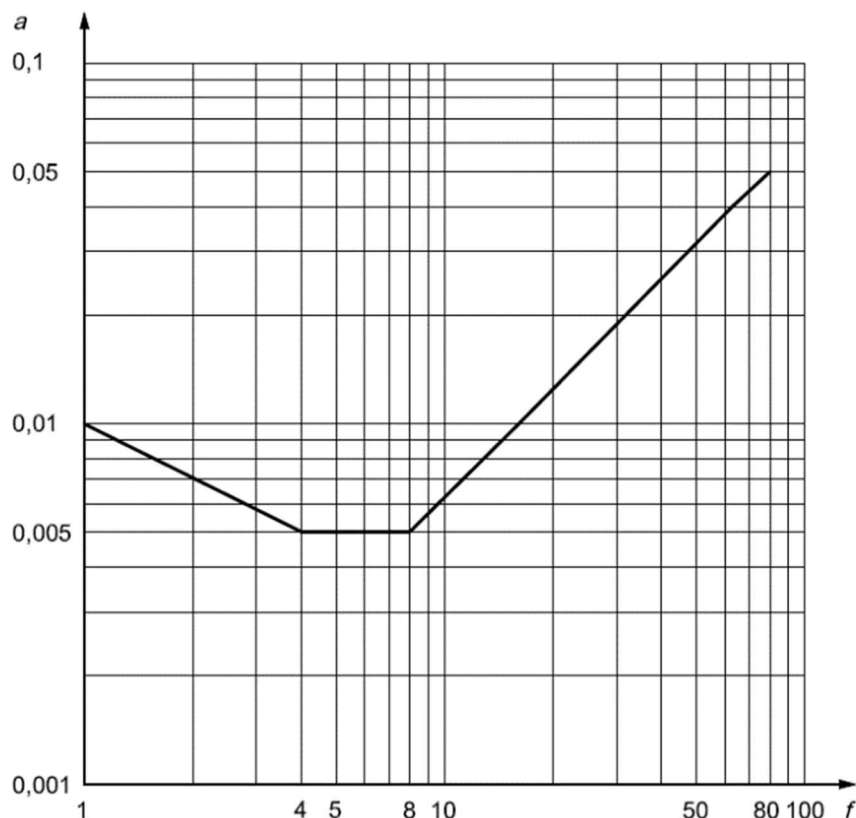
Norma se dále věnuje samotným lidským pohybům a frekvencím, jaké mohou jednotlivé aktivity vybudit. Například frekvence pohupování se pohybuje od 0,5 do 1,5 Hz nebo koordinované skákání od 1,5 do 3,5 Hz.



Pro tuto diplomovou část je důležitá část Annex C, kde jsou příklady kritérií pro vibrace, kde je kapitola o stadionech a halách určených ke shromáždění. Rozlišujeme podle ní osoby na pasivní a aktivní účastníky akce. Pasivní osoby jsou ty, které se neúčastní pohybu, ale jsou pro ně vibrace znatelné, aktivní osoby jsou pak ty, které se budících akcí účastí, ale pocítí až silné vibrace. Měla by se zvážít dvě kritéria vibrací. Prvním je komfort a pohodlí pasivní části publika, přijatelná úroveň vibrací však může být zkreslena nekontrolovatelnými parametry, jako jsou povětrnostní podmínky, hlučnost prostředí, atd. Maximální limity pro komfort pasivních diváků jsou pak uvedeny v grafu na obrázku 1 s násobícím faktorem 200.

Druhým kritériem je bezpečnost diváků. Velké amplitudy mohou totiž způsobit obavy jak u pasivních, tak i u aktivních diváků a v extrémních případech mohou způsobit i následnou paniku. Amplitudy zrychlení by neměli přesáhnout 400 násobek křivky z grafu na obrázku 1.

Pro výpočet RMS hodnoty z měření je pak doporučen čas 10 s pro komfortní kritérium a 1 sekunda pro kritérium paniky. [6]



Obrázek 1 - Vibrace budov, základní křivka zrychlení ve směru osy z (směr vibrací - od nohou k hlavě)

Legenda

- a zrychlení (RMS) m/s^2
 f frekvence, Hz

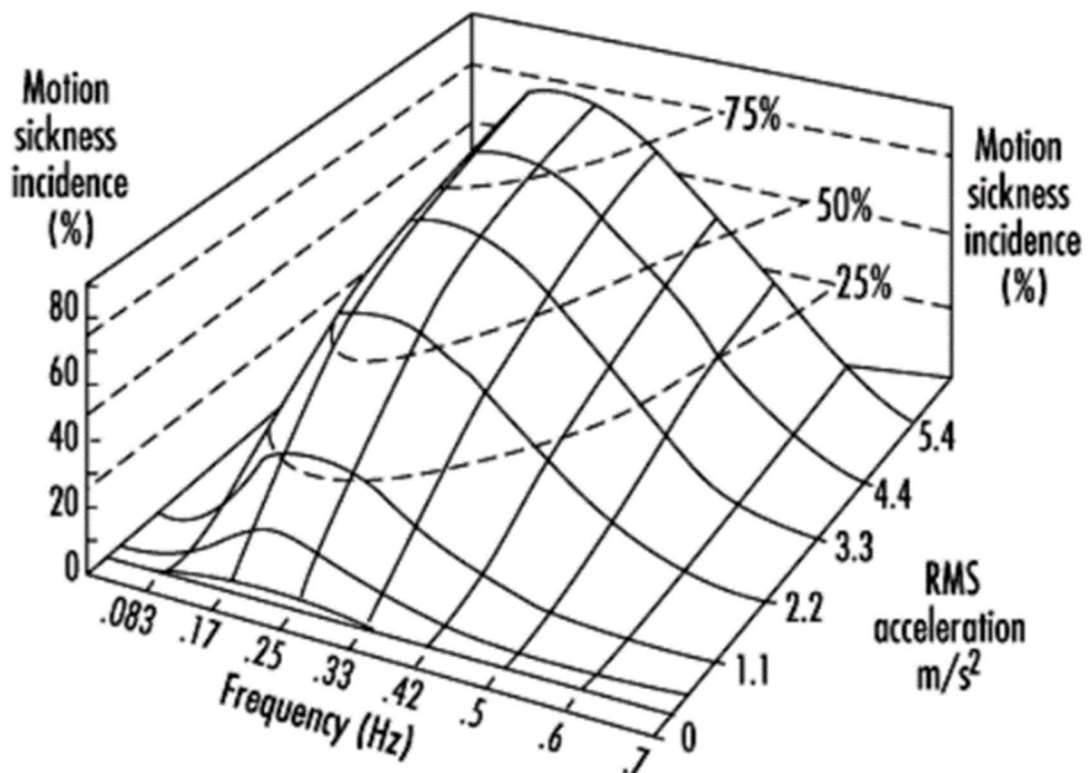


Zajímavá fakta dohledatelná v literatuře

Vibrace mohou kromě poškození konstrukce také ovlivnit komfort uživatele. Proto bylo zkoumáno, jak lidé reagují na různá zrychlení během vibrací. Literatura [9] uvádí, že 50% zdravých lidí dokáže pocítit vibrace se zrychlením asi $0,015 \text{ ms}^{-2}$. Jednotlivci však mají výrazně jiné schopnosti vnímat vibrace. Práh vnímání mírně klesá s prodlužující se dobou vystavení vibracím až do jedné sekundy a velmi málo s dalším prodloužením doby trvání. Přesto, že práh vnímání už nijak výrazně neklesá, neznamená to, že delší doba trvání nemá vliv na pohodlí uživatele.[9, 5]

V literatuře bychom také našli, že kinetózu můžou způsobovat vibrace mezi 0,1 až 0,5 Hz, ačkoli je nepravděpodobné, že by trvalá tribuna kmitala na takto nízkých frekvencích, nemělo by se však zapomínat na horizontální vlastní tvary, které se většinou objevují na nižších frekvencích, než tvary vertikální. [9, 5]

Graf ukazuje kolik procent lidí, vystavených určité frekvenci s určitou hodnotou RMS zrychlení, dostalo nemoc z pohybu.



Source: McCauley et al. 1976.

Obrázek 2 - Šance výskytu mořské nemoci v závislosti na zrychlení a frekvenci [9]

Motion sickness – nemoc z pohybu

Frequency – Frekvence

RMS acceleration – hodnota RMS zrychlení



Dalším zajímavým faktem, který je možné najít v literatuře [5] je poznatek, že lidé žijící v nízkých domech jsou občas lépe připraveni tolerovat vibrace. Může to být způsobeno přivyknutím na často projíždějící nákladní vozidla. Jimi způsobené vibrace však mohou lehce rozrušit návštěvníka takového domu. Z vlastní zkušenosti vím, že obdobný příklad zažívají lidé žijící poblíž letišť.

Národní kanadská norma [12] udává hodnoty zrychlení pro komfort lidí, pro kanceláře a obytné prostory to je 0,4 až 0,7 %g (0,04 až 0,07 ms⁻²). Prostory s rytmickou aktivitou, jako taneční sály 1,5 až 2,5 %g (0,15 až 0,25 ms⁻²) a nakonec stadiony a arény 10 až 18 %g (1,0 až 1,8 ms⁻²).

V knize [9], je řečeno, že lidé mohou na tribunách vybudit vibrace i tleskáním a pohupováním. Dále kniha poskytuje tabulku s činnostmi a frekvence, jaké dokáže daná činnost vybudit.

Reakce na stejné vibrace můžou být u různých osob rozdílné. Důležité jsou podmínky, ve kterých se nachází osoba pod vlivem vibrací. Podmínky ovlivňující lidskou citlivost jsou:

- pozice (ve stoje, v sedě, v leže)
- směr působení vůči pozici páteře
- vykonávaná činnost (odpočinek, chůze, běh)
- sdílení zážitku s dalšími lidmi
- stáří a pohlaví
- četnost výskytu a denní doba
- charakter vymizení vibrací

Intenzita vnímání pak bude záviset na následujících faktorech:

- amplitudě výchylky rychlosti a zrychlení
- doba působení vibrací
- frekvence kmitání

Intenzita vnímání byla zkoumána mnoha autory a v tabulce 1 jsou hodnoty, na kterých se hromadně shodují. Dalo by se říci, že ve frekvenčním rozsahu 1 až 10 Hz závisí vnímání na zrychlení a ve frekvenčním rozsahu 10 až 100 Hz závisí vnímání na rychlosti. Hodnoty však platí pro harmonické vibrace. [9]



Tabulka 1 - Indikace prahů vnímání člověka pro vertikální harmonické vibrace [9]

Popis	Frekvenční rozsah od 1 do 10 Hz	Frekvenční rozsah od 10 do 100 Hz
	RMS zrychlení [mm/s ²]	špičková rychlost [mm/s]
Postřehnutelné	34	0,5
Jasně pocítilné	100	1,3
Rušící/ nepříjemné	550	6,8
Netolerovatelné	1800	13,8

Tabulky 1 a 2 shrnují starší výsledky z experimentů, při porovnání všech výsledků jsou však hodnoty přibližně podobné.

Tabulka 2 - Porovnání výsledků z experimentů [5]

Autoři experimentů (rok)	Stupnice	Střední amplituda zrychlení		Situace
		(m/s ²)	RMS)	
Fothergill (1972)	Velice nepříjemné	2,5		Sedící osoby; velikost 8 Hz sinusové vibrace
	Nepříjemné	1,7		
	Středně nepříjemné	1,1		
	Ne nepříjemné	0,7		
	Pocítilné	0,3		
Jones a Saunders (1974)	Velice nepříjemné	3,7		Sedící osoby; velikost 10 Hz sinusové vibrace
	Velice nekomfortní	2,2		
	Nekomfortní	1,2		
	Hranice komfortu a nekomfortu	0,7		
Oborne a Clarke (1974)	Ne nekomfortní	0,33		Sedící osoby; velikost 10 Hz sinusové vibrace
	Velice nekomfortní	>2,3		
	Nekomfortní	1,2-2,3		
	Docela nekomfortní	0,5-1,2		
	Docela komfortní	0,23-0,5		
Fothergrill a Griffin (1977)	Komfortní	<0,23		Sedící osoby; velikost 10 Hz sinusové vibrace
	Velice nekomfortní	2,7		
	Nekomfortní	1,8		
	Mírně nekomfortní	1,1		
	Pocítilné, ale ne nekomfortní	0,4		



Typ aktivity		Rozsah použitelnosti			Typ konstrukce
označení	Definice	Frekvence [Hz]	Aktivita	Míra aktivity [Hz]	
"chůze"	Chůze s neustálým kontaktem s povrchem	1,6 až 2,4	Pomalá chůze Normální chůze Rychlá chůze	cca 1,7 cca 2,0 cca 2,3	Lávky pro pěší Kancelářské budovy
"běh"	Běh s chvilkami, kdy je celé tělo ve vzduchu	2,0 až 3,5	Pomalý běh Normální běh Rychlý běh	cca 2,1 cca 2,5 > 3,0	
"skákání"	rytmické skákání na místě	1,8 až 3,4	Fitness trénink se skákáním a běháním	cca 1,5 až 3,5	Tělocvičny, sportovní haly
"tanec"	skoro stejně, jako rychlá chůze	1,5 až 3,0	trénink jazzového tance společenské události s klasickým a moderním tancem	cca 1,8 až 3,5 cca 1,5 až 3,0	Taneční sály Koncertní haly a další komunitní haly bez pevně upevněných sedadel
"tleskání s pohupováním"	rytmické tleskání před hrudí, nebo nad hlavou s pohupováním dopředu a dozadu s pohybem kolennou kolem 50 mm	1,5 až 3,0	Popové koncerty s entusiastickým publikem	cca 1,5 až 3,0	Koncertní haly a tribuny s i bez pevně upevněných sedaček
"tleskání"	rytmické tleskání před hrudí	1,5 až 3,0	Koncerty klasické hudby a jemné popové koncerty	cca 1,5 až 3,0	Koncertní haly s pevně upevněnými sedadly
"pohupování"	Rytmické pohupování ze strany na stranu v sedě, nebo ve stoje	0,4 až 0,7	Koncerty a sociální události		Divácké galerie

Tabulka 3 - Typy aktivit a jim příslušný frekvenční rozsah



4 Dosavadní experimenty ve světě

V této kapitole jsou popsány experimenty prováděné výhradně na konstrukcích tribun. Proč se vlastně tyto experimenty provádějí a k jakým závěrům experimentátoři došli?

Stadiony, arény a areály mají v dnešní době daleko širší užití, než jen na sportovní utkání. Jsou používány i pro kulturní akce, jako divadla, taneční představení a popové koncerty. Některé akce mohou svým charakterem ovlivnit pohybové aktivity diváků. Při koordinaci pohybů větší části publika může tento pohyb způsobit nadměrné vibrace konstrukce. Na sportovních utkáních mají lidé tendenci se pohybovat nesynchronizovaným způsobem, významné budící účinky jsou pak primárně náhodné. Odpovídají například gólům, či jiným významným událostem (nástup oblíbeného hráče). Tyto špičky mají obvykle vysokou intenzitu a krátké trvání. Další významnou akcí, pořádanou na stadionech, při které se mohou vyskytnout silné vibrace, jsou popové koncerty. Tam je dav veden k synchronizovanému pohybu rytmem hraných skladeb, což může způsobit velké amplitudy vibrací a nekomfortní zážitek divákům.

Design samotných stadionů se také vyvinul. Diváci požadují nerušený výhled, přejí si být blíže k samotné akci a aktivně přispět do atmosféry dané události. To vedlo k prodloužení konzol a k odebrání svislých podpor, blokujících výhled. Tato kombinace dlouhých a ohebnějších konzol s živějším chováním publika, jaké známe například z popových koncertů, vedla k řadě problémů s vibracemi.

Pozornost prováděných experimentů je pak hlavně zaměřena na dynamické chování konstrukcí, jako jsou modální charakteristiky a na analýzu sil a frekvencí způsobených pohybující se davem. Jelikož je nemožné přímo změřit síly vyvolané davem, zjišťuje se dynamická odezva konstrukce způsobená pohybem diváků, to pak může pomoci k lepšímu porozumění tomuto fenoménu. Zatímco dynamická odezva u tribun je s přibývajícím daty z experimentů srozumitelnější, otázkou zůstává, jak zatížení od diváků modelovat.



4.1 Kolaps konstrukcí

Známým příkladem kolapsu kvůli dynamickému zatížení je zřícení litinového mostu v Broughtonu (Anglie) 1831 pod mechanickou rezonancí vyvolanou synchronizovaným pochodem sedmdesáti čtyř vojáků. To následně vedlo ke zrušení vojenského kroku, při pochodu přes most. [13]

V květnu roku 1982 spadla dočasná tribuna během natáčení televizní stanice BBC. Až 60 lidí bylo odvezeno do nemocnice. [3]

Novější příklad kolapsu konstrukce je z 5. května 1992 z francouzského města Bastia na ostrově Korsika. Na stadionu Armand Cesari měl být semifinálový fotbalový zápas o Francouzský pohár. Měl hrát tým Olympique de Marseille, který byl v té době nejlepším francouzským týmem a město chtělo využít této příležitosti k přidání velkokapacitních tribun k navýšení návštěvnosti až o 50%, což místní autority schválily bez omezení. Již hodinu a půl před začátkem hry projevovali diváci obavy o stabilitu tribuny. Tribuna se zřítila ještě před hrou, tragédie zabila 18 lidí a 2300 lidí bylo zraněno. [14]

4.2 Příklady konstrukcí, u kterých se objevily problémy s vibracemi

Stadion Maracanã v Rio de Janeiru byl postaven v pozdních čtyřicátých letech s kapacitou až 150,000 míst (v roce 1950 na finále mistrovství světa ve fotbale bylo přítomno 199,584 diváků) a je stále jeden z největších stadionů na světě. Má betonový vyztužený rám s dvěma tribunovými prstenci a střechu působící jako konzola dlouhou 30m. Horní tribunový prstenec je 21m dlouhá konzola a je podepřen pomocí trojúhelníkových betonových zdí s výškou až do třetího patra s přirozenou vlastní frekvencí 4,6 Hz.

Problémy, způsobené vibracemi vyvolanými lidmi, vyvolaly v devadesátých letech obavy u správců stadionu. Byla provedena experimentální měření a analýza modelu pomocí metody konečných prvků za účelem najít řešení zmíněného problému. [3]

Z laboratorních testů byly určeny první tři Fourierovy koeficienty pro skákání, pohupování, tančení a pro tzv. poga (hard rockový tanec). Nejvyšší naměřená hodnota nárazového faktoru (dynamická zátěž/ hmotnost diváků) byla 3.0. Autoři upozorňují na fakt, že obzvlášť Brazilci dokážou během fotbalového utkání skákat v podstatě



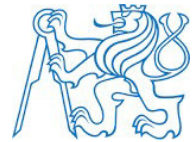
jednotně, což vede k obzvláště vysokému dynamickému zatížení, dokonce vyššímu než zaznamenanému během popových koncertů.

Použitím odvozených Fourierových koeficientů autoři předpovídali zrychlení a posunutí pro horní prstenec pomocí metody konečných prvků. Předpovídané zrychlení se pohybovalo kolem 20-30 ms⁻² s doprovodnou deformací 6,5 mm pro skákání fotbalových fanoušků a 3-4,6 ms⁻² s doprovodnou deformací 1mm pro dav na popovém koncertě. Tyto hodnoty byly porovnány s kritérii použitelnosti. Autory byly nastaveny limity na 5-6,5 ms⁻² pro krátkodobé vystavení vibracím 1-5 minutovým během fotbalového zápasu. Pro vibrace s dlouhodobým charakterem, jako jsou ty na popových koncertech, byla navržena horní hranice 20 %g (2 ms⁻²). Vypočtená odezva výrazně překročila tyto požadavky, proto byly navrženy nápravné práce.

Autoři článku [2] navrhovali řešení s využitím laděných tlumičů, ale díky časovým omezením, se správci stadionu rozhodli pro dočasné řešení, kdy vytvořili na konci konzolky bariéru, která bránila skákání diváků. V roce 2006 bylo žádáno odstranění těchto řešení kvůli lepšímu výhledu. Ale obavy z porušení konzolového nosníku vedly k provedení dalších měření. Sledování během několika fotbalových zápasů ukázalo špičkovou hodnotu zrychlení 2,6 ms⁻² při 2,6 Hz, v kombinaci s maximálním posunem 6mm, během krátkých intervalů 15-30 s při dobře koordinovaném skákání, které následovalo po vstřelení branky. Výsledky experimentu byly jasně nižší, než se původně předpokládalo a model byl naladěn podle sesbíraných dat. Poté bylo navrženo řešení pomocí více tlumičů kmitání s následnou instalací. Řešení efektivně snížilo vibrace o 50 %.[2, 3]

Dalším stadionem, kde se vyskytl problém s vibracemi, je Feyenoord v Nizozemském městě Rotterdam. Stejně, jako u předchozího stadionu má tento taky horní tribunový konzolový prstenec a konzolovou střechu. Konstrukce je ocelový rám, který podporuje betonové desky a jeho přirozená vlastní frekvence je 5,8 Hz ve vertikálním směru. Stadion byl postaven v roce 1936 a už od té doby se objevovaly vibrace s výkmitem 2-3 mm, které následovaly po vstřelení branky, avšak tyto vibrace rychle vymizely, takže se to nejevilo, jako problém.

V osmdesátých letech se začal stadion používat, jako místo pro konání popových koncertů. Netrvalo dlouho a hned po druhém koncertě byly vibrace tak silné, že členové publika byli vystrašení a bylo nařízeno okamžité vyšetřování konstrukce. Obavy kvůli velkým deformacím způsobených diváky, zapříčinily zásah autorit, které musely stáhnout



povolení stadionu na popové koncerty. Nechaly však možnost pro několik koncertů, aby mohla být provedena měření.

Během měření jedné čtvrtiny horního prstence byla naměřena dynamická deformace o velikosti 3 mm ještě k 10 mm od statického zatížení. Toto bylo doprovázeno špičkovou hodnotou zrychlení $1,3 \text{ ms}^{-2}$.

Změna konstrukce se ukázala příliš nákladná. Místo toho byl nainstalován trvalý monitorovací systém. Pokud během programu přesáhne výkyv 4mm nad statickou výchylku, je snížena hladina hlasitosti zvuku. V případě, že vibrace stále rostou až na 6mm, pak je zvuk vypnut úplně. V raném stádiu se vypnou obrazovky. Tato opatření se ukázala, jako účinná k zastavení rytmického pohybu diváků během pár vteřin. Mnoho koncertů proběhlo bez zásahu do hlasitosti zvuku, avšak během některých vystoupení musela být hladina zvuku snížena s tím, že by se mohla vypnout úplně. Zatím jen koncert kapely Guns 'n' Roses v roce 1992 byl během vystoupení málem vypnut. [4]

Problém s vibracemi u tribun se také objevil u tří prémiových klubů ve Velké Británii. Na stadionu Manchester United, Old Trafford, se v roce 1996 během popového koncertu objevily vibrace na horní, třetí tribuně [3]. Od té doby se tato tribuna užívá jen na fotbalová utkání. Arsenal na svém stadionu Highbury v Londýně zvolil po problémech s vibracemi jiné řešení, vybavil horní část tribuny North Bank laděnými hmotnostními tlumiči kmitání. [3]

Na Liverpoolskem stadionu Anfield byla v roce 2000 poměrně nová tribuna Anfield Road, během jednoho ze zápasů se objevily viditelné vibrace [3]. Jako opatření byly nainstalovány dodatečné sloupy, které zvedly vlastní frekvenci této tribuny. Obdobná situace se objevila i na Millennium Stadionu v Cardiffu, tam před popovými koncerty doplňují ocelové sloupky pro zpevnění konzoly. [3]

4.3 Dosavadní experimenty

Jak již bylo zmíněno, určit budící síly od pohybujícího se davu je velice obtížné. Z důvodu hlubšího nahlédnutí do tohoto problému byly provedeny dva experimenty na dvou rozdílných konstrukcích na dvou podobných kulturních akcích. Experimenty proběhly v létě roku 2004 na dvou koncertech kapely Red Hot Chili Peppers na stadionech G. Meazza v Miláně a na Etihad v Manchesteru o týden později. Mohli se



tak posoudit účinky budících sil na dvou konstrukcích během stejných skladeb, u kterých se předpokládá stejný rytmus.

Stadion v Manchesteru měl přirozenou vlastní frekvenci mezi 4 a 5 Hz a byla zde naměřena zrychlení 1 ms^{-2} s vrcholy dosahujícími až $1,25 \text{ ms}^{-2}$ a na Stadionu Meazza byla zrychlení $0,3 \text{ ms}^{-2}$ pro obdobné vlastní frekvence tribuny. Z výsledků bylo jasné, že vibrace byly celkově vyšší na stadionu v Manchesteru. To může být způsobeno rozdílnými tuhostmi konstrukcí, ale také by to mohlo být rozdílným přístupem diváků. Red Hot Chili Peppers je anglicky mluvící kapela a hypoteticky by mohli diváci snáze přijímat a tančovat na hudbu v jejich rodné řeči. Tato skutečnost byla pozorována již na několika akcích, například na koncertě italského zpěváka Vascy Rossi také v létě 2004, kdy byly naměřené nejvyšší vibrace na Milánském G. Meazza stadionu. Na milánském stadionu probíhalo měření na dvou tribunových prstencích, kde se druhý prstenec choval obdobným způsobem, jako druhý prstenec na stadionu v Manchesteru, ale zato třetí prstenec vykazoval naprosto jiné chování na stejné budící síly. Z toho vyplývá, že měřená zrychlení vysoce závisí na rezonancích daných konstrukcí. [1]

V roce 1983 v Kanadě byl proveden experiment na betonové terasové jednotce s délkou 18,8 m během 3 hodinového rockového koncertu. Po větší část koncertu publikum sedělo, dokonce i při podupávání, nebo tleskání. Ve více než čtvrtině skladeb vybudil synchronizovaný dav RMS zrychlení $0,01 \text{ ms}^{-2}$ na více než 30 s. Špičková hodnota zrychlení na těchto terasách s přirozenou vlastní frekvencí 3 Hz byla $0,3 \text{ g}$ ($3,0 \text{ ms}^{-2}$) vertikálně a $0,17$ ($1,7 \text{ ms}^{-2}$) horizontálně s maximálním výkyvem 12 mm během jedné skladby, což jasně vedlo k rezonanční odezvě. [3]

Další Anglický stadion byl monitorován během koncertu. Konzolová tribuna měla přirozenou vlastní frekvenci 4,5 Hz, která byla po zaplnění diváky snížena na 3,8 Hz. Naměřená špičková hodnota zrychlení byla 1 ms^{-2} a RMS hodnota, vypočtená během periody 5 minut v době největších vibrací, byla $0,6 \text{ ms}^{-2}$. [3]

V roce 1992 byl v Anglii zahájen rozsáhlý výzkumný program zaměřený na dynamickou odezvu trvalých, výsuvných a demontovatelných tribun. Byly testovány charakteristiky 50 prázdných demontovatelných tribun, 11 trvalých tribun a 6 tribun výsuvných a přibližně polovina z nich byla monitorována během popových koncertů,



sportovních utkání a jiných akcí. Tato měření jasně ukázala, že kritické je zatěžování rytmické. Výsledky (viz tab. 4) pak byly zahrnuty do pokynů k návrhu demontovatelných tribun a do Britských standardů. [3, 7, 8]

Tabulka 4 - souhrn měřených zrychlení z Littler 2000a, 2000b a 2000c

Typ tribuny	Přirozené frekvence [Hz]		Akce	Naměřená zrychlení [ms ⁻²] Filtr s dolní propustí 10 Hz	
	Vertikální	Horizontální		Vertikální	Horizontální
Demontovatelné	>9,0	>2,0	Popový koncert	2,1	12,7
	>9,0	>2,0	Popový koncert	0,9	1,5
	>9,0	>2,0	Popový koncert	1,5	0,7
	>9,0	>1,8	Fotbal	4,1	0,6
	>9,0	>1,8	Fotbal	2,8	1,3
	>9,0	>1,8	Fotbal	0,7	0,2
	>9,0	>1,8	Fotbal	0,7	0,4
	>7,9	>1,8	Závody motorek	0,4	0,3
	>7,9	>1,8	Závody motorek	2,2	0,6
	>7,9	>1,8	Závody motorek	0,3	0,2
	>7,9	>1,8	Závody motorek	0,1	0,1
	>7,9	>1,8	Závody motorek	0,2	0,2
	>7,9	>1,8	Závody koní	0,4	0,1
	>7,9	>1,8	Golf	0,7	0,1
	>7,9	>1,8	Golf	0,3	0,8
	>7,9	>1,8	Golf	0,2	>0,05
	>7,9	>1,8	Tennis	0,3	0,1
	>7,9	>1,8	Divadlo	0,1	0,1
Výsuvné	>9,5	cca 2,5	Popový koncert	3,7	3,2
	>9,5	cca 3,0	Popový koncert	1,2	1,2
Trvalé	5,7		Popový koncert	0,255	
	5,7		Popový koncert	0,2	
	4,93		Popový koncert	0,76	
	4,93		Popový koncert	0,474	
	4,69		Popový koncert	0,804	
	4,69		Popový koncert	0,555	
	4,76		Popový koncert	0,53	
	6,36		Popový koncert	0,307	
	6,79		Popový koncert	0,378	
	2,66		Sport	0,716	
	2,66		Sport	0,536	
	2,66		Sport	0,949	
	3,55		Sport	0,237	
	6,60		Popový koncert	0,206	
	6,60		Popový koncert	0,176	



Vlastní frekvence prázdných tribun byly stanoveny různými metodami. Konstrukce byly buzeny přirozeně větrem, nebo metodou umělého buzení. Vlastní frekvence pak byly určeny z frekvenčních spekter odezvy stanovené pomocí FFT. Pomocí testů, při nichž byla konstrukce buzena silou, se pak mohly určit vlastní tvary a tlumení konstrukce.

Pro 11 trvalých prázdných tribun byly spočteny vlastní frekvence ve svislém směru a pohybovaly se od 2,65 Hz do 6,79 Hz s mediánovou hodnotou 4,69 Hz. U výsuvných a demontovatelných tribun jsou problémem spíše horizontální vlastní frekvence. Ty se pohybovaly od 1,8 Hz do 6 Hz s tím, že výsuvné tribuny jsou tužší ve směru ze strany na stranu a demontovatelné zepředu dozadu. U všech těchto tribun kromě dvou byly vlastní frekvence ve svislém směru nad 9 Hz a u těch dvou to byly frekvence 7,6 Hz a 7,9 Hz.

Při měření vlastních tvarů tribuny bylo použito buzení nucenými vibracemi. Výsledky ukázaly, že zatímco některé tribuny se chovají jako celek, tak u jiných tribun se jejich části chovají samostatně. Obecně se ukázalo, že s plněním tribuny lidmi se snižuje její vlastní frekvence a zvedá se úroveň tlumení, ale je to závislé na velikosti davu a také, zda diváci sedí, či stojí. Některá snížení vlastních frekvencí byla doprovázena i změnou vlastních tvarů.

Na základě předpokladu, že lidské vnímání vibrací, je způsobeno citlivostí na zrychlení, byly na konstrukci umístěny snímače zrychlení a jen několik pozic bylo osazeno snímači deformací.

Výsledky byly vysoce závislé na aktivitě publika. Na klidnějších akcích, jako je golf, závody koní, tenis, ale i na některých koncertech byly zaznamenány špičkové hodnoty zrychlení při příchodu nebo odchodu. U sportovních událostí, jako je fotbal nebo ragby, byly zaznamenány špičkové hodnoty zrychlení, díky aktivitě diváků po důležitých událostech na hřišti, jako vstřelení branky, či získání bodu. A u popových koncertů byla nejvyšší zrychlení zaznamenána během skákání, či podupování do rytmu. Během sportovních utkání byly vibrace krátkodobé a nezpůsobily žádné zjevné obavy diváků. Během popových koncertů už vibrace vnímány byly a míra byla přímo ovlivněna živostí davu. Čím aktivnější byl dav, tím více pohybu měla tribuna a tím více stížností a komentářů bylo na tribunu.

U sportovních utkání byla pro trvalé konzolové tribuny naměřena špičková hodnota v rozsahu od $0,25 \text{ ms}^{-2}$ až $5,13 \text{ ms}^{-2}$ a obsahovala vysoké množství



vysokofrekvenčních vibrací. Zajímavé je, že tato maxima se většinou neobjevovala při vlastních přirozených frekvencích konstrukce. Když časový průběh odezvy vyfiltrovali 10Hz dolní propustí, byla pak špičková hodnota zrychlení $5,13 \text{ ms}^{-2}$ zredukována na $0,237 \text{ ms}^{-2}$. Odezva stejné tribuny na popovém koncertě byla jiná. Testy ukázaly, že jedna osoba skákající kolem rezonanční oblasti může vyprodukovat až 4% výkyvu, jako tisíce lidí na sportovních utkání. Zrychlení zaznamenaná během koncertů byla buď v rytmu hudby, nebo v jedné z jejich harmonických frekvencí. Pro koncerty se zrychlení pohybovala od $0,3 \text{ ms}^{-2}$ do $1,62 \text{ ms}^{-2}$ a po vyfiltrování dolní propustí 10Hz bylo zrychlení zredukováno na $0,8 \text{ ms}^{-2}$. Výsledky byly filtrovány dolní propustí 10Hz aby se odstranily prvky vyšších frekvencí. Je to proto, že lidské vnímání vibrací je citlivější pod 10 Hz, některé konstrukce měly však svislou vlastní frekvenci vyšší než 10Hz, takže mohlo být vhodnější zvolit filtr mezi 10 až 15Hz. Měření ukázalo, že předpoklad, kdy zrychlení $0,5 \text{ ms}^{-2}$ při vibracích narušuje komfort, je lehce konzervativní, jelikož při většině měření byla tato zrychlení překročena a i kdyby byla nastavena vyšší kritéria, můžou se vysoká zrychlení objevit lokálně. Autoři programu tedy navrhuji zahrnout do kritérií ještě váhu frekvence a délku trvání vibrací. [3, 7, 8]

Na naší univerzitě (ČVUT) proběhlo již několik experimentů na vibrace tribun. Jeden z nich byl proveden na fotbalovém stadionu klubu AC Sparta Praha v Praze na Letné v roce 2015. Experiment byl výhodný ze dvou důvodů. Tím prvním je silná aktivita fanoušků Sparty a druhá výhoda byla v nosné konstrukci, která je složena z hlavních ocelových nosníků, staticky působících, jako konzola a betonových příčných nosníků. Experiment byl prováděn v prvním patře stadionu, v oblasti, která je nejvíce citlivá na dynamické buzení. Tam se nacházela nejradikálnější skupina fanoušků. Místu se také říká „Kotel“, což je místo s největším potenciálním zdrojem dynamického zatížení. Na zápase bylo celkem 8502 diváků z toho 910 se nacházelo ve sledované části stadionu. Největší zrychlení bylo naměřeno při skákání, kdy se aktivně zapojilo 100% diváků zkoumaného sektoru a dosáhlo hodnoty $1,14 \text{ ms}^{-2}$. [10]

Při experimentech na naší univerzitě se sledují také typy chování diváků. Běžně rozeznáváme tyto druhy:

- a) Chůze a běh – chůze, nebo rychlejší chůze je pro člověka typický pohyb. Je to chování, které nastává většinou mimo danou sportovní událost (hrací doba u hokeje, fotbalu, závod). Toto chování se objevuje při plnění tribuny na začátku



akce, o přestávce, má-li akce přestávku a na konci při hromadném odchodu diváků. Během akce se tento jev objevuje ojediněle, případně u jednotlivců.

- b) Skákání – druhů skákání je hned několik. V průběhu sledování sportovních zápasů byly pozorovány čtyři typy skákání.
1. typ – Na sportovních utkáních je v České republice velice oblíben pokřik: „Kdo neskáče, není Čech! Hop! Hop! Hop!“, který podněcuje synchronizované skákání do rytmu tohoto pokřiku
 2. typ a 3. typ – Dalším typem je skákání, kdy se jednotlivé řady diváků chytí kolem ramen a začnou společně skákat. U 2. typu skáčou řady svisle. U 3. typu se řady ještě při skákání vodorovně posouvají zprava doleva, Nejčastěji se vodorovný posun koná ob řadu protisměrně.
 4. typ – Dalším typem je typ skákání „sedni a vyskoč (Sit and jump)“. Kdy si diváci sednou a na pokyn vyvolavače vyskočí a začnou poskakovat.
- c) Pohupování – Tento typ chování je podobný skákání, až na to, že při pohupování se neodlepí chodidla od povrchu tribuny. Při pohupování se člověk daleko lépe synchronizuje s kmitáním tribuny. Hrozí tedy větší riziko vzniku rezonance.
- d) Kymácení – při sportovních utkáních monitorovaných naší univerzitou bylo zjištěno, že tento typ pohybu vzniká nejčastěji při povzbuzování v součinnosti se sousední tribunou. Kdy jedna tribuna volala určité heslo a sousední odpovídala jiným (např. „Sparta“ „Praha“). Aby fanouškové pokřik umocnili, nakláněli se dopředu a celý pohyb doprovázeli pohybem ruky.
- e) Tleskání – nejběžnější typ povzbuzování nebo oslavy. Běžně se rozeznávají dva druhy tleskání, při jednom jsou ruce stále před hrudníkem a při druhém se tleská s rukama nad hlavou.
- f) Statické sledování utkání – Jelikož nejsou schopni diváci povzbuzovat sportovce celé utkání (nebo závod), jsou situace, kdy diváci staticky sedí nebo postávají a pasivně sledují akci.
- g) Ostatní typy chování – z fotbalových zápasů byly popsány další dva speciální typy chování diváků, které nejdou jednoznačně zařadit mezi již popsané druhy.
1. typ – chování fanoušků po skórování jejich týmu. Je to kombinace skákání, pohupování a potlesku.
 2. typ – tzv. mexická vlna, ve které se objevuje něco z pohupování, kymácení a „sedni a vyskoč“. Vlnu většinou dělají všichni diváci na tribunách.



5 Způsoby měření

Experimenty na zjištění dynamických vlastností konstrukcí jsou z oboru nedestruktivního testování. Pro měření odezvy konstrukce na dynamické zatížení se obecně využívá snímačů zrychlení, rychlosti a výchylek.

Odezvu měříme, abychom zjistili, jaká reálná zrychlení, rychlosti a výchylky se objevují na konstrukci (globální odezva) nebo na jejím prvku (lokální odezva). Dalším důležitým údajem jsou vlastní frekvence a frekvence, které budí daný činitel způsobující dynamické zatížení. Hodnoty pak porovnáváme s komfortními kritérii. V případě, že vibrace překračují kritéria komfortu (případně ohrožují stabilitu konstrukce), hledá se řešení, jak je zredukovat a k tomu je znalost neredukovaných vibrací potřeba.

5.1 Jak a čím měříme vibrace

Měřicí soustava pro měření dynamické odezvy se skládá ze snímačů, propojovacích vedení (kabelů), zesilovače, měřicí ústředny a řídicího počítače. Výsledky se zpracovávají v softwaru, který pomocí algoritmů zpracovává a eliminuje šumy na vstupu nebo na výstupu. Během měření se vyskytují okolnosti, se kterými by měl být experimentátor obeznámen, aby je byl schopen správně identifikovat a minimalizovat jejich vliv na výsledek. Mezi tyto okolnosti patří například mikrofoničnost snímačů, tj. vliv hluku, neustálení snímače na počátku měření, teplota.

Snímače

Zásadní rozdělení snímačů je na relativní a absolutní. Relativní snímač snímá dynamické výchylky měřené konstrukce vůči nějakému vhodně volenému na konstrukci nezávislému bodu, který není ovlivněn okolním neklidem nebo jiným zdrojem kmitání. Absolutní snímač snímá pohyb své hmoty vzhledem ke své schránce. Snímači můžeme měřit amplitudy výchylek, rychlosti a zrychlení. Budeme se zde věnovat pouze akcelerometrům.

Akcelerometry slouží k měření zrychlení. V podstatě přeměňují zrychlení (změnu deformace) na měřitelný elektrický signál. Běžně se používají tři typy:



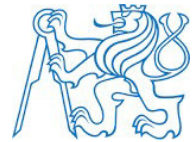
- **akcelerometry s proměnnou kapacitou (VC)** – využívá mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity,
- **piezoresistivní akcelerometry (PR)** – využívá mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu,
- **piezoelektrické akcelerometry (PE)** – využívají piezoelektrický krystal, který generuje náboj úměrný působící setrvačné síle, která během změny rychlosti působí na každý objekt.

Nejvhodnější volbou na měření odezvy na jakýkoli z parametrů (výchylky, rychlosti, zrychlení) jsou piezoelektrické akcelerometry. Jsou totiž lehké, mají dobrou linearitu, široký dynamický rozsah (až 160 dB), široký frekvenční rozsah, nízkou příčnou citlivost. Běžně se pro experimenty využívají akcelerometry, jelikož rychlosti a výchylky se dají získat integrací v post procesoru. Rozeznáváme akcelerometry „těžké“ a tedy citlivé s nízkofrekvenčním rozsahem nebo akcelerometry „lehké“ méně citlivé ale s vysokofrekvenčním rozsahem.

Snímače se ke konstrukci mohou připevnit několika způsoby. Nejlepším způsobem je čep ze závitové tyče z oceli. Snímače lze také připevnit například tenkou dvouvrstvou lepicí páskou při nižších úrovních vibrací a u malých snímačů je nejběžnějším a nejrychlejším způsobem včelí vosk (nevýhoda je, že při teplotách kolem 40 °C vosk měkne a hrozí odpadnutí snímače), tyto alternativní techniky mohou snížit užitný frekvenční rozsah akcelerometru. Dále se mohou snímače přidržet rukou (ruční sonda), magnetem, lepenkou, lepidlem, atd. U snímačů by v určitých případech měla být zajištěna izolace od elektřiny (pomocí plastové izolační hmoty) a ochrana od mechanického poškození (ochrana před vysokofrekvenčními otřesy). Snímače můžeme ještě připevnit ke stojánku, který je na konstrukci položen (například ocelové závaží).

Při instalaci snímače se musí dodržet několik základních pravidel. Musí se dát pozor na kolmost upevnění a spolehlivost, aby snímač zůstal po celou dobu měření ve stejné poloze. Hmotnost akcelerometru musí být menší než 1/10 hmotnosti měřené konstrukce, aby nevznikala dynamická zátěž (mohla by být ovlivněna hmotnost, tuhost i útlum). Umístění snímače bychom měli volit co nejpraktičtěji, například se vyhnout uzlům vlastních tvarů. Experimentátor nemá neomezené množství snímačů, musí proto pečlivě volit jejich umístění a směr měření.

Se snímači by se mělo zacházet opatrně, převážně se vyvarovat nárazům. Na čidlo mohou působit vnější vlivy prostředí, které mohou negativně ovlivnit výsledek.



Nepříjemným vlivem může být akustický šum v okolí, magnetické pole zasahující do snímače, vlhkost, korozivní látky atd.

Vlastnosti akcelerometrů:

Dynamický rozsah: maximální velikost zrychlení, kterou lze snímačem měřit.

Frekvenční odezva: Je určena hmotností snímače, vlastnostmi piezoelektrického krystalu a rezonanční frekvencí krytu snímače. Má maximální dovolenou odchylku $\pm 5\%$.

Horní frekvenční limit: Frekvence, při které výstupní signál překročí dovolenou odchylku, souvisí s mechanickou rezonancí.

Dolní frekvenční limit: Frekvence, při které výstupní signál začne klesat pod dovolenou mez a přesnost se snižuje. Citlivost s nízkými frekvencemi rychle klesá.

Rezonanční frekvence: Frekvence, při které snímač rezonuje. Veškerá měření musí být prováděna pro frekvenční pásmo nižší, než je tato frekvence.

Citlivost: Akcelerometry se dělí do dvou skupin. Akcelerometry s nízkou citlivostí se používají pro vibrace s vysokou amplitudou zrychlení a naopak snímače s vysokou citlivostí pro měření vibrací s malou amplitudou.

Hmotnost: Jak již bylo zmíněno, nesmí překročit $1/10$ hmotnosti testovaného vzorku

Teplotní rozsah: běžně se pohybuje od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.4 Modální analýza

Modální analýza je obor dynamiky, popisující kmitání stavebních konstrukcí pomocí rozkladu do vlastních tvarů. Na experimentální sledování a zjišťování vlastních frekvencí a vlastních tvarů konstrukce a tlumení tohoto kmitání se používá metoda zvaná experimentální modální analýza. Metoda využívá měření odezvy na zatížení v jednotlivých bodech konstrukce a na základě naměřených hodnot odezvy a normovaných budících sil jsme schopni určit vlastní frekvence konstrukce a díky naměřeným hodnotám ve stejném časovém okamžiku v jednotlivých bodech můžeme vykreslit i vlastní tvary konstrukce. Každá konstrukce má nekonečně mnoho vlastních frekvencí a jim odpovídajících vlastních tvarů. V praxi se zabýváme jen několika prvními vlastními frekvencemi a jejich tvary, které mohou mít vliv na stabilitu konstrukce. Proto pro úlohy dynamiky konstrukce zjednodušíme, hmoty diskretizujeme a zavádíme konkrétní počet stupňů volnosti, abychom mohli matematicky určit námi hledané vlastní



frekvence a jim odpovídající tvary. Počet vlastních frekvencí závisí na počtech stupňů volnosti konstrukce.

Znalost modálních charakteristik nám umožňuje určit nebezpečné provozní stavy konstrukce. V případě, že se frekvence budící síly pohybuje kolem vlastní frekvence konstrukce, může dojít ke stavu rezonance, to může vést k nadměrnému rozkmitu, poškození konstrukce a v nejhorším případě i ke kolapsu.

Změřené hodnoty můžeme porovnat s konečněprvkovým modelem, abychom zjistili podobnost a model případně naladili na základě naměřených dat z experimentu.

Vibrace měříme i pro možnou lokalizaci a následné řešení problému, např. pomocí tlumení či izolování zdroje vibrací. Znalost vlastních frekvencí a míst s největšími výchylkami nám může pomoci v úpravách konstrukce přidáním prvků za účelem eliminace kmitání v různých částech konstrukce.

Modální charakteristiky nás většinou zajímají u konstrukcí, kde dynamická zatížení mohou mít vliv na únosnost (únavovou pevnost), použitelnost nebo stabilitu konstrukce. Nejčastějšími konstrukcemi s těmito problémy jsou průmyslové konstrukce, lávky pro pěší, mosty, komíny, věže, taneční sály nebo tribuny stadionů.

Pro popis struktury využívá metoda modální analýzy odezvový model. Ten vychází z matice funkcí FRF (Frequency Respond Function), přenosové funkce. Pro její získání používáme FFT, která pomocí matematických operací a algoritmů transformuje funkci z časové oblasti do frekvenční oblasti a pak můžeme dojít k přenosové funkci. Frekvenční přenosová funkce je v podstatě rezonanční křivka, jelikož je to poměr odezvy konstrukce ku na budící síle. Přenosové funkce jsou funkce komplexní a běžně se také vyjadřují svojí velikostí a fázovým posunem. Dynamickou odezvu pak měříme ve formě zrychlení, rychlost kmitání, nebo výchylku.

Konstrukci můžeme budit dvěma způsoby a to tzv. FVT (Forced vibration tasting), nebo AVT (Ambient vibration tasting).



FVT

Známe velikost budící síly a odezva je pak normována k budící síle. Metodou dostaneme více informací o konstrukci, ale je náročnější na přípravu a jsou situace, kdy nejde použít.

Pro měření zrychlení (rychlosti, výchylky) se konstrukce rozkmitává měřitelnou budící dynamickou silou. Budící síly mohou být generovány různými druhy přístrojů (budičů). Běžně uvažujeme základní rozdělení na budiče připojené a na budiče nepřipojené. Mezi budiče připojené patří elektromagnetické budiče, elektrohydraulické budiče nebo nevyvážené rotující hmoty. Dříve se používali i impulzní raketové motory. Mezi nepřipojené budiče patří typicky rázové kladívko, velké rázové kyvadlo a rázovadla. Akustických budičů nemůže být použito, jelikož s nimi nejsme schopni kontrolovat směr ani bod buzení. Ale mohou být použity pro zjišťování vlastních frekvencí.

Budící síla je běžně měřená pomocí piezoelektrického snímače síly, výhodou je obdobně jako u snímačů zrychlení velmi dobrá linearita, malá hmotnost (minimálně ovlivní hmotnost, tuhost, tlumení), široký frekvenční a dynamický rozsah.

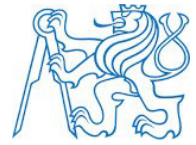
U budící síly bychom chtěli, aby měla frekvenční rozsah od 0 Hz až do zkoumaných frekvencí. Typy buzení:

- harmonická budící síla (energie na jediný tvar),
- sweep, nebo swept – lineárně proměnná budící síla
- nahodilá budící síla (random)
- budící síla generovaná ve speciálním tvaru
- vibration control systém (VCS)

Asi nejoblíbenějším způsobem buzení je buzení rázem. Ráz můžeme vyvolat například úderem kladívka. Výhodou je široký frekvenční rozsah, dále je to rychlost, jelikož nemusíme budič nijak fixovat nebo přenášet těžké zařízení budiče.

AVT

Druhým způsobem buzení konstrukce je tzv. AVT (Ambient vibration tasting), kdy je konstrukce buzena přirozenými účinky, jako je vítr, mikroseismicita, pohyby chodců nebo od dopravy. U metody se použije jeden snímač, jako referenční a k jeho odezvě se pak normují ostatní měřené odezvy.



5.4.1 Vyhodnocení a porovnání vlastních tvarů kmitání

Jsou případy, kdy potřebujeme porovnávat vlastní tvary kmitání. Například po změně vlastností konstrukce (např.: stářím, nebo umělým zásahem – rekonstrukcí), po nějakém zásahu vnějšího činitele (povodně), kvůli přiřazení tvarů z modelu skutečnému experimentu nebo kvůli ladění modelu na výsledky experimentu a obdobné situace.

Koeficient MAC

Koeficient korelace modální analýzy. Slouží k vyhodnocení změny vlastních tvarů kmitání mezi jednotlivými měřeními vzorky, nebo verifikaci konstrukce a modelu. Výsledná hodnota koeficientu se pohybuje v rozmezí 0 a 1. Při dokonalé shodě je MAC roven 1. Jsou-li tvary navzájem nezávislé, je jejich MAC roven 0.

$$MAC_{(j)} = \frac{\left(\{r_{(j)}\}_{obs,XX}^T \{r_{(j)}\}_{obs,YY}\right)^2}{\left(\{r_{(j)}\}_{obs,XX}^T \{r_{(j)}\}_{obs,XX}\right) \left(\{r_{(j)}\}_{obs,YY}^T \{r_{(j)}\}_{obs,YY}\right)}$$

$\{r_{(j)}\}_{obs,XX}$ vektor vlastního tvaru prvku XX ,

$\{r_{(j)}\}_{obs,YY}$ vektor vlastního tvaru prvku YY .

Pomocí koeficientu MAC můžeme porovnávat míru shody mezi tvary, jak dvěma změřenými, tak tvarem spočteným a tvarem změřeným.

Koeficient COMAC

V případě, že chceme zjistit, ve kterém místě se dva porovnávané tvary liší, využíváme koeficient korelace modální analýzy po jednotlivých měřených bodech COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion). Rozdíl mezi koeficientem MAC a COMAC je hlavně v tom, že míra korelace COMAC se určuje v každém zkoumaném bodě konstrukce a je průměrována přes všechny dvojice vlastních tvarů. Koeficient MAC porovnává pouze dva vlastní tvary jako celek.

$$COMAC_{(x)} = \frac{\left(\sum_{j=1}^n \{r_{(j),x,XX} r_{(j),x,YY}\}\right)^2}{\left(\sum_{j=1}^n \{r_{(j),x,XX}^2\}\right) \left(\sum_{j=1}^n \{r_{(j),x,YY}^2\}\right)}$$



- $r_{(j),x,XX}$ je pořadnice j -tého vlastního tvaru v x -tém měřeném bodě prvku ve stavu XX ,
- $r_{(j),x,YY}$ je pořadnice j -tého vlastního tvaru v x -tém měřeném bodě prvku ve stavu YY ,
- n je počet porovnávaných dvojic vlastních tvarů [5, 6].

Koeficient CAMOSUC

CAMOSUC je dalším způsobem porovnání změřených tvarů, které byly navzájem přiřazeny na základě hodnoty MAC. Metoda slouží k popisu změny křivosti porovnaných vlastních tvarů v jednotlivých bodech zkoumané konstrukce. Pomocí tohoto koeficientu lze lokalizovat místa, kde jsou největší rozdíly mezi porovnávanými vlastními tvary.

$$CAMOSUC_{(j),x} = \left| \frac{r_{(j)XX,x+1} - 2r_{(j)XX,x-1} + r_{(j),XX,x-1}}{h^2} - \frac{r_{(j)YY,x+1} - 2r_{(j)YY,x} + r_{(j)YY,x-1}}{h^2} \right|$$

- $r_{(j),XX,x}$ je pořadnice j -tého vlastního tvaru v x -tém měřeném bodě prvku ve stavu XX ,
- $r_{(j),x,YY}$ je pořadnice j -tého vlastního tvaru v x -tém měřeném bodě prvku ve stavu YY ,
- h je rozměr sítě sledovaných bodů ve směru, ve kterém je rozdíl křivosti porovnávaných tvarů vlastního kmitání vyhodnocován [5, 6].



6 Experiment

Experiment byl součástí grantu GAČR 15-15728S „Analýza konstrukcí tribun“

Experiment byl proveden pro ověření použitelnosti demontovatelné tribuny pro diváky od firmy Peri postavené v Novém Městě na Moravě pro sportovní událost BMW IBU světový pohár v biatlonu 2016. Pro experiment byla vybrána reprezentativní část tribuny, kde byla provedena modální analýza a následně měření odezvy během závodů.



Obrázek 3 - Měřená část tribuny

.1 Peri

Peri je firma založená v roce 1969 a je jedním z největších výrobců bednění a lešení na světě. Firma dále vyrábí inženýrské konstrukce, jako jsou bednicí vozy pro spřažené mostní konstrukce. Peri navrhuje lešení a bednění i pro konkrétní stavby a poskytuje své modulové armovací lešení PERI UP Rosett a PERI UP Rosett Flex pro koncertní pódia nebo tribuny pro diváky.

6.1.1 Informace o projektu tribuny

Sportovní areál Vysočina Aréna v Novém Městě na Moravě pořádal v roce 2016 světový pohár v biatlonu. S úspěšnými tuzemskými reprezentanty v tomto sportu se zvětšila i fanouškovská základna, a proto bylo třeba navýšit kapacitu tribun v této aréně o 11 500 diváků. Dalším požadavkem byla propustnost vstupů na tribuny a možnost výstavby tribun v nepřístupném terénu, 10 konstrukcí pro LED televizory a stavba nové



tribuny u VIP stanu s průjezdem pro závodníky. Zákazníkem byl WCH Biathlon 2013, s.r.o.. PERI na tento projekt dodalo 560 tun lešení PERI UP Rosett Flex.

6.1.2 Lešení PERI UP Rosett Flex

Lešení je mimořádně všestranné a adaptabilní na místní podmínky a splňuje nejprísnější požadavky na bezpečnost práce na zřízených pracovištích. Jeho montáž i demontáž je rychlá a samotné prvky jsou velice lehké. Rozměry základních součástí modulového systému jsou 25 případně 50 cm. Lešení je ocelové. Konstrukce lešení je složena ze sloupků $\text{Ø}48,3 \times 3,2$. Sloupky lešení jsou vybaveny rozetami s čtyřmi otvory, které slouží pro zaháknutí horizontál (viz obr. 4). Rozety jsou od sebe po půl metru. Prvek spojující sloupky ve vodorovném směru se nazývá horizontála a má rozměry $60 \times 30 \times 2$ mm. Prvky pro diagonální ztužení s $\text{Ø}42,4$ mm a další prvky, jako jsou podlážky, ke kterým bohužel nemáme technické informace. Firma uvádí, že díky velké tuhosti styčnicků, stačí ke ztužení velkého množství konstrukcí pouze horizontální prvky a diagonální lze vynechat. Velká tuhosti styčnicku je pak způsobena délkou tlačené oblasti klínku horizontály, který zapadá do otvoru rozety (viz obr. 4).



Obrázek 4 - Detail klínku horizontály zapojeném do rozety sloupku a ukázka vedení kabelů ke snímačům odezvy



6.1.3 Popis konstrukce tribuny

Zkoumaná tribuna má 23 řad sloupků, kdy v každé řadě je 5 sloupků. Za 23. řadou má tribuna ještě konzolu ve výšce 6,5 m vysunutou na 2,5 m. Nejvyšší stupeň tribuny je ve výšce 13,5 m. Délka tribuny bez konzoly je 25,5 m, s konzolou má tribuna délku 28 m. Šířka tribuny je 8,5 m. Konstrukce je ztužena ve vodorovném směru pomocí diagonál (viz obr. 9). Konstrukce má pouze jednu diagonálu ve vodorovné rovině a to ve spodní části konzoly.

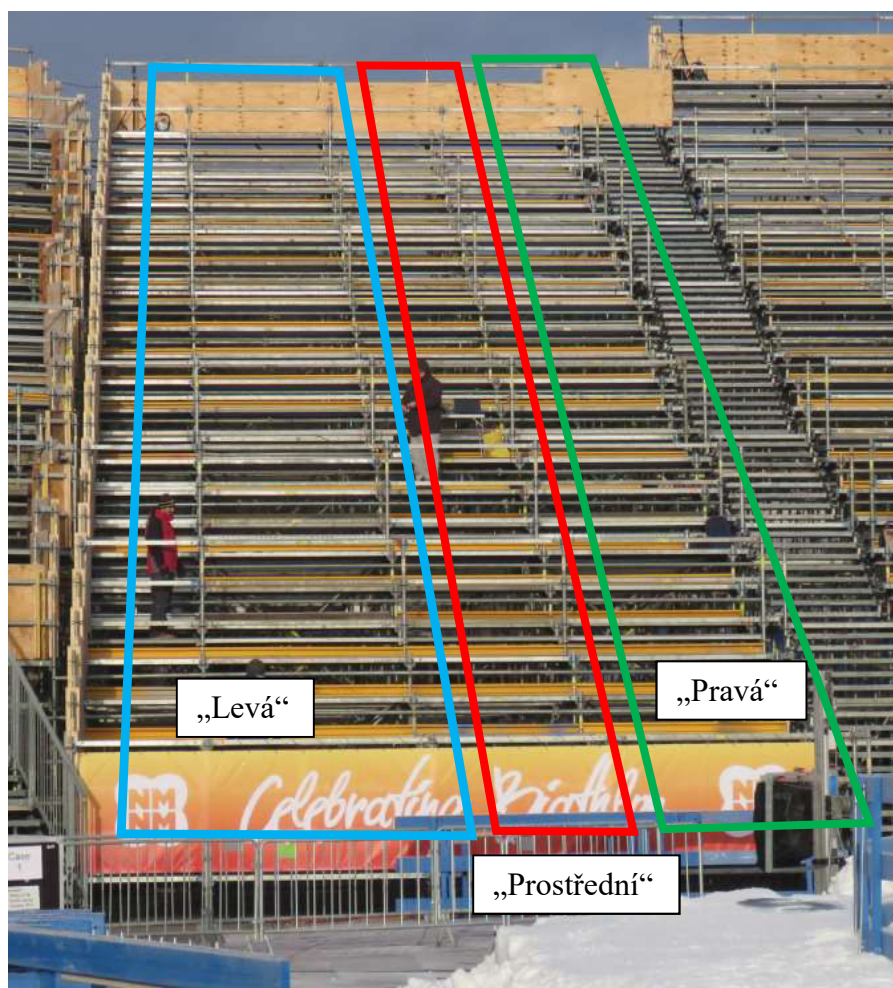
Pro představu je zde návrhový řez a půdorys konstrukce. Výkresy poskytl PERI spol. s r.o.. Skutečná konstrukce výkresům však přesně neodpovídala. U reálné konstrukce chyběly některé diagonály, horizontály, či jiné prvky, naopak někde byly prvky přidány, nebo například u diagonál byl změněn směr. (pozn. výkresy nejsou v měřítku). Tribuna je spojena s vedlejší tribunou a se schodištěm pomocí ocelových trubek (viz obr. 6). Sloupy jsou z velké části uloženy na asfaltové vozovce, část je uložena na šterku a část sloupů u připojených okolních tribun je uložena na zemině. Pod patkami sloupů jsou dřevěné podložky.

Od 15. řady sloupků dál se mění charakter konstrukce. Tribuna je nesena podpěrnými věžemi s modulem 2,5 m. Věže mají buď společný střední sloupek, nebo jsou spojeny propojkami v podobě horizontál dlouhých 1 m. Celou tuto oblast budeme nazývat „zadní“ (vysoká) část tribuny. Zbylou (nízkou) část budeme nazývat „přední“ část tribuny. Podlázky podpěrných věží jsou položeny na horizontály podepřené sloupky. Tyto sloupky jsou postaveny na dlouhou perforovanou horizontálou (2x „U profil“ 80x20x3) podepřenou vzpěrami. Vzpěry roznášejí zatížení do hlavních sloupků konstrukce. Již během experimentu vznikly obavy, zda vlastní tvary „zadní části tribuny“ nebudou vůči „přední“ vykazovat nějaké anomálie.

Při pohledu na tribuny z areálu budeme označovat ještě „levou“ část tribuny, „prostřední“ část tribuny a „pravou“ část tribuny, podle obrázku 5.

Některé podlázky jsou umístěny na horizontálu, která není na sloupky připevněna v místě rozety, ale mezi rozetami pomocí speciálních svorek (viz obr. 13).

Pro lepší představu konstrukce tribuny jsou v práci dále fotky.



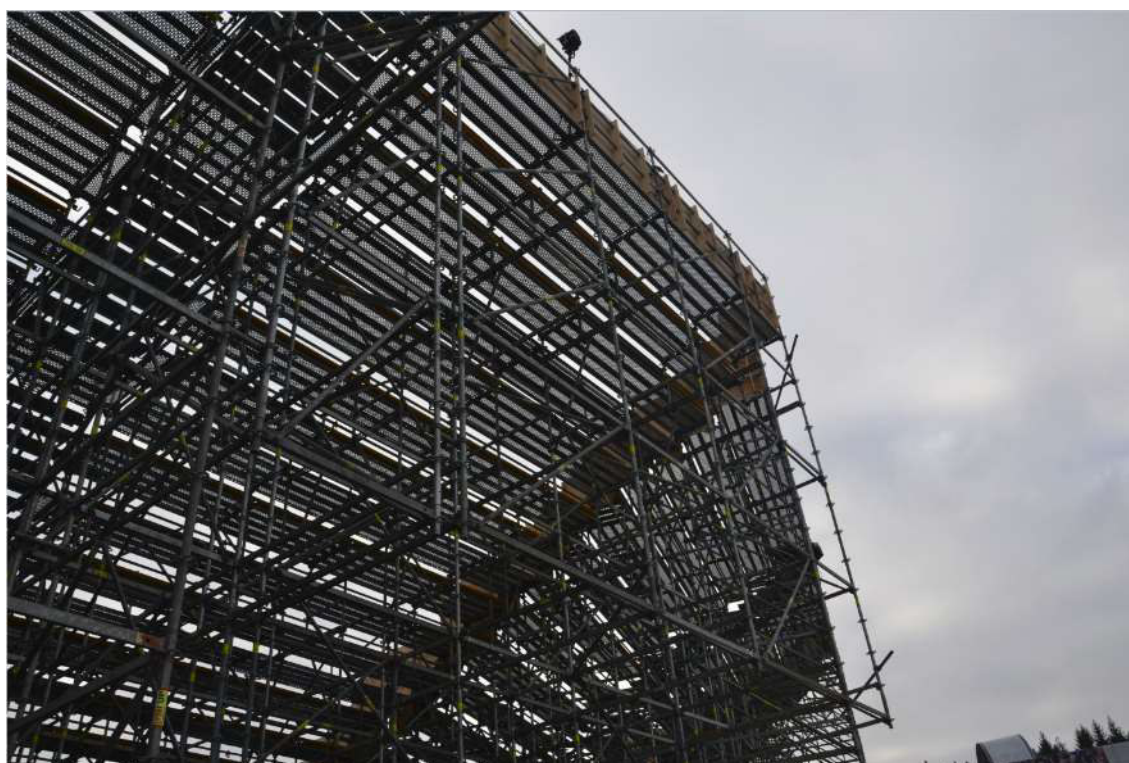
Obrázek 5 - „Levá“, „prostřední“ a „pravá“ část tribuny



Obrázek 6 - Spojení tribuny se schodištěm pomocí ocelové trubky, ukázka rozety na sloupku



Obrázek 7 - Konzola tribuny



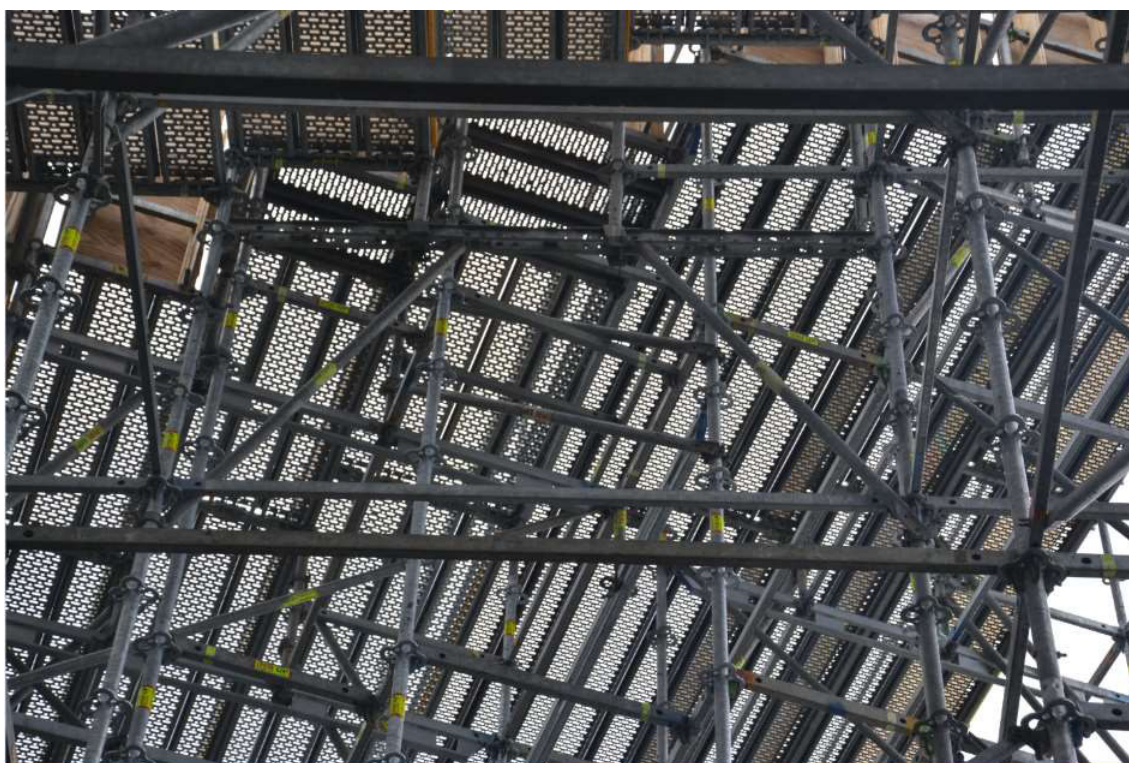
Obrázek 8 - Pohled na konzolu



Obrázek 9 - Diagonály ztužující tribunu



Obrázek 10 - Část bez diagonál, uložení na štěrku a asfaltu



Obrázek 11 - Vzpěry podporující horizontálu, která drží sloupky tvořící menší tribunu



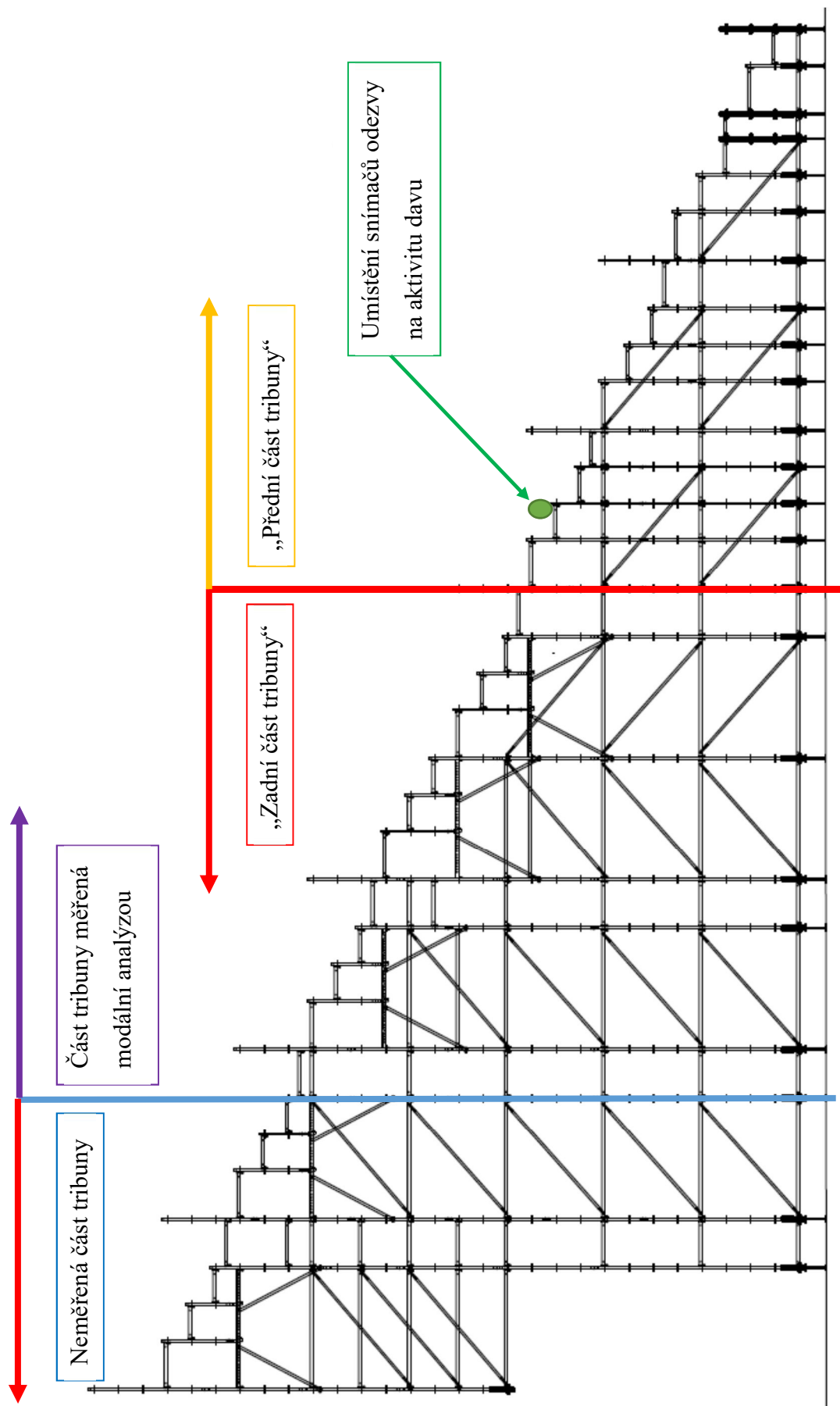
Obrázek 12 - Uložení sloupků na asfaltu a na zemině, ukázka podepření dřevěnými podložkami



Obrázek 13 - Podlážky položeny na horizontále, připevněné pomocí speciálních svorek, ne rozet.



Obrázek 14 - Ilustrační výkres půdorysu tribuny [zdroj PERI spol. s.r.o.], výkres není v měřítku



Obrázek 15 - Ilustrační výkres řezu tribunou [zdroj PERI spol. s.r.o.], výkres není v měřítku



2 Harmonogram experimentu

1. Den: Pondělí 12. 12. 2016

Pracovníci: Bc. Hubka J.
Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.
Prof. Ing. Michal Polák, CSc.
Ing. Martin Verner

Počasí: 0-2°C, občasné přeháňky, vysoká vlhkost

Činnost: Příprava experimentu, instalace snímačů odezvy, zakreslení a ofocení stávajícího stavu tribuny

3. Den: Úterý 13. 12. 2016

Pracovníci: Bc. Hubka J.
Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.
Prof. Ing. Michal Polák, CSc.
Ing. Martin Verner

Počasí: kolem 0°C

Činnost: Modální analýza

4. Den: Sobota 17. 12. 2016

Pracovníci: Bc. Hubka J.
Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.
Ing. Martin Verner

Počasí: -3°C

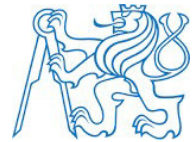
Činnost: Zajištění stanoviště měřicí ústředny, měření odezvy během závodů

5. Den: Neděle 18. 12. 2016

Pracovníci: Bc. Hubka J.
Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.
Ing. Martin Verner

Počasí: -2°C, sněhové srážky

Činnost: Zajištění stanoviště měřicí ústředny, měření odezvy během závodů, úklid měřicího řetězce



6.3 Modální Analýza

Prováděli jsme experimentální měření modální analýza kvůli zjištění vlastních frekvencí a jim odpovídajících vlastních tvarů. Následně byl vytvořen model v programu Dlubal, se kterým jsme měření porovnávali a model se snažili upravit tak, aby co nejvíce odpovídal skutečnosti. Cíl byl nalézt tuhost, kterou by mohly mít spoje horizontál se sloupky. Vlastní frekvence prázdné tribuny však nebudou odpovídat vlastním frekvencím po naplnění tribun diváky.

Orientace os u modelu je obrácená, než u měření. Jelikož měříme vibrace, směr nehraje roli.

6.3.1 Použité přístroje

Pro experiment jsme byli limitováni počtem kanálů na měřicích ústřednách, které jsme měli k dispozici, tj. 9 kanálů. Pro experiment bylo použito osm snímačů značky Brüel & Kjær typu 8344 a jeden snímač 4507 B 005. Jeden z nich byl použit jako referenční, zbývajících sedm jsme použili na měření v bodech. Pro měření ve třech bodech a pro každý bod ve třech směrech, bychom potřebovali devět snímačů plus jeden referenční. Proto byl v jednom bodě vynechán směr měření v z-ovém směru (směr gravitace). Snímače byly umístěny na závaží, které nám umožňuje snadný přesun snímačů do jiného měřeného bodu se zachováním vzájemných poloh snímačů. Měřilo se ve třech směrech a to v X-ovém (směr kolmý na směr pohledu diváků), v Y-ovém (směr proti pohledu diváků) a Z-ovém (směr gravitace).



Obrázek 16 - směr os pro modální analýzu

Snímače typu 8344 jsou piezoelektrické akcelerometry. Snímač má citlivost 250 mV/ms^{-2} s citlivostní tolerancí $\pm 20 \%$. Rozsah zrychlení je $\pm 26 \text{ ms}^{-2}$ a frekvenční rozsah pro měření je od $0,2 \text{ Hz}$ do 3 kHz . Tyto snímače byly upevněny k stojanu (závaží) pomocí magnetu.

Snímač typu 4507 B 005 má citlivost 100 mV/ms^{-2} s citlivostní tolerancí $\pm 10 \%$, měřicí rozsah zrychlení je 70 ms^{-2} v návaznosti na citlivost napětí. Frekvenční rozsah pro měření odezvy je od 2 Hz do 6 kHz a fázový 2 Hz až 5 kHz s odchylkou $\pm 5 \%$. Snímače jsou u hran vybaveny třemi sadami drážek, pomocí nichž se snímač upevňuje do plastové montážní svorky, která je přidělena ke konstrukci (v našem případě přilepena k závaží). Se snímačem je možné provádět trojosé měření postupným upevňováním akcelerometru do svorky ve třech na sebe kolmých směrech.

K experimentu jsme používali dvě měřicí ústředny také od firmy Brüel & Kjær. První linka má označení 3560 B, linka má pět kanálů, které jsme pro měření využili všechny. Druhá použitá linka má označení 3560 C, má čtyř kanálový modul. Obě měřicí ústředny byly napájeny elektrickým zdrojem, jsou však vybaveny i vnitřní baterii, díky které je umožněna i práce v terénu. Rozsah obou měřících centrál je od 0 Hz do $25,6 \text{ kHz}$. Linky pracují spolu se softwarem Pulse, kde se naměřené hodnoty zaznamenávají, a měření se vyhodnocuje.



6.3.2 Popis měření

Referenční snímač jsme umístili na dvanáctou „příčnou“ (řady s orientací ve směru X) řadu sloupků a to na druhou „podélnou“ (řady s orientací ve směru Y) řadu sloupků od schodiště (viz obr. 17) snímač byl umístěn vodorovně šikmo přibližně pod 45° (viz obr. 18) vzhledem k „podélným i příčným“ řadám. Konstrukci jsme budili v osmnácté řadě sloupů a to na třetím sloupcu od schodiště (viz obr. 17). Budili jsme silovými impulsy, na které byla použita gumová palice. Impulzy působily opět vodorovně šikmo přibližně pod 45° vzhledem k „podélným i příčným“ řadám (viz obr. 19).

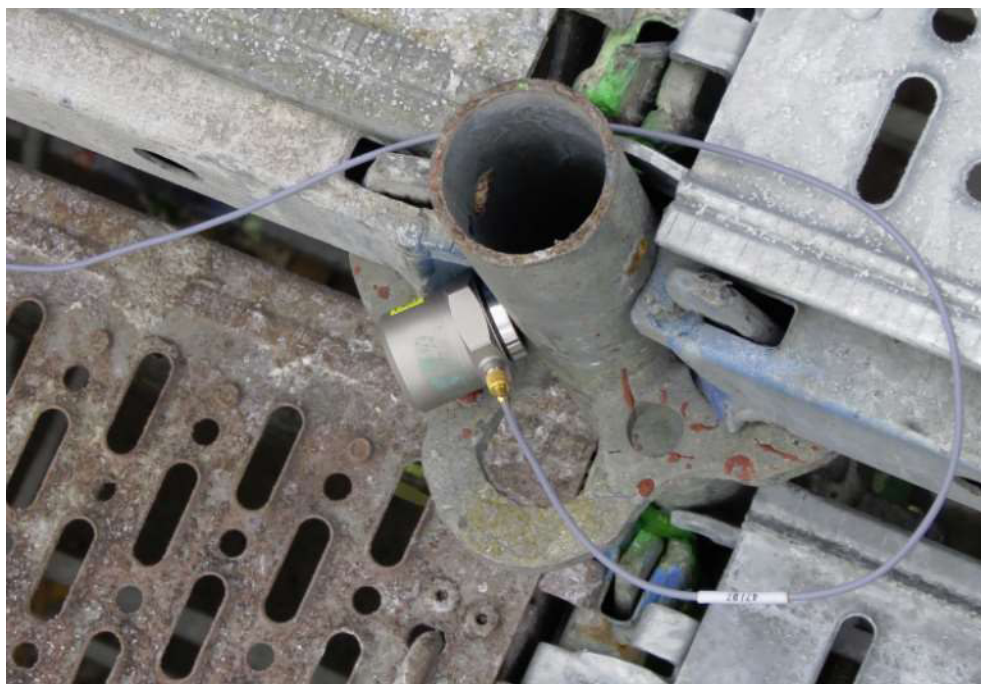


Obrázek 17 - Pozice budícího bodu (BB) a referenčního bodu (RB), modré šipky značí cestu nahoru, žluté šipky značí cestu dolů



Měřicí ústředna byla umístěna na podlážce mezi 14 a 15 řadou sloupů, pozice byla volena tak, aby kabely nesoucí signál od snímačů do ústředny dosáhly až na nejnižší (1.) stupeň tribuny.

Měřilo se do vzdálenosti dosahu kabelů, což pro nás bylo 25 řad. Závaží se snímači byla vždy položena na podlážce v místě horizontály přibližně uprostřed tribunového stupně. Závaží bylo vždy na 1., 3. a 4. horizontále od schodiště (viz obr. 17 (modré šipky) a 20). Poloha snímačů byla volena tak, aby byl po vyhodnocení jasný charakter tvaru. Závaží se umisťovala tak, aby se nijak nekývala, aby nebyla měření zatížena chybou. Během měření odezvy stál na tribuně pouze měřič ovládající ústřednu a osoba, která budila impulsy, aby nebyly výsledky ovlivněny přidanou hmotností v podobě další osoby. Po změření jedné řady se snímače posunuly o tribunový stupeň výš (cesta nahoru). Po dosažení maximální délky kabelu při 25 měřené řadě jsme změnili pozici bodů, opět změřili odezvu na impuls a posunuly snímače o dva tribunové stupně níž (redukce počtu měřených řad byla zvolena kvůli nedostatku potřebného času s tím, že amplitudy zbylých bodů se určí interpolací z okolních bodů až při vyhodnocení). Nová poloha snímačů byla volena tak, aby zpracované odezvy v bodech dokreslily charakter vlastních tvarů tribuny. Jedno závaží se snímači bylo umístěno na 2. horizontále od schodiště. Další závaží se snímači bylo uprostřed podlážky, aby bylo vidět, zda podlážky kmitají lokálně, nebo při vlastních frekvencích tribuny dokreslují charakter odpovídajícího vlastního tvaru celé tribuny. Poslední závaží se snímači bylo umístěno na schodiště, za účelem zjištění, zda se vibrace přenášejí a zda schodiště kmitá samo, nebo spolupůsobí s měřenou tribunou. Nová poloha závaží pro cestu dolů je zobrazena na obrázku 17 (žluté šipky) a 21.



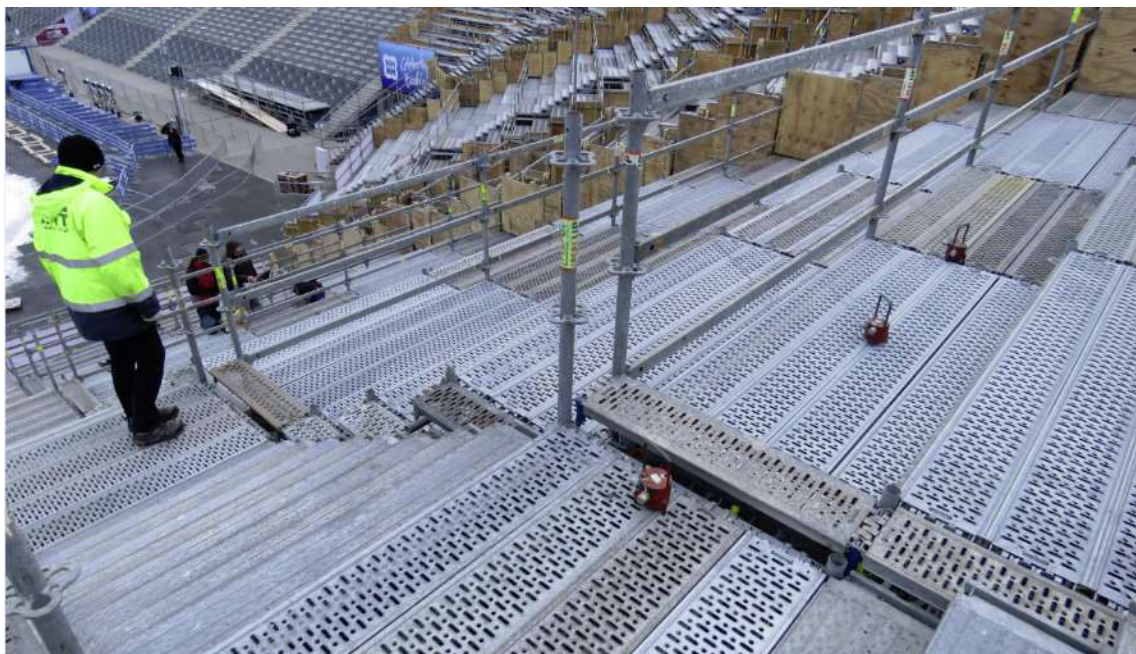
Obrázek 18 - Poloha referenčního bodu



Obrázek 19 - poloha budícího bodu



Obrázek 20 – 1. pozice (cesta nahoru) závaží se snímači v jedné měřené řadě ve směru X



Obrázek 21 - 2. pozice (cesta dolů) závaží se snímači ve směru X

6.4 Měření odezvy od diváků

Během samotného závodu jsme měřili odezvu na zatížení od diváků. Následně jsme vyhodnocovali extrémní zrychlení a odezvu tribuny na různé druhy chování diváků.



6.4.1 Použité přístroje

Na měření odezvy během závodu jsme používali snímače typu 4507 B 005, jejichž charakteristiky jsou popsány v kapitole 6.3.1, zapojeny byly do stejných měřících linek, jako u modální analýzy. Snímače byly ke konstrukci přichyceny pomocí magnetu.

6.4.2 Popis měření

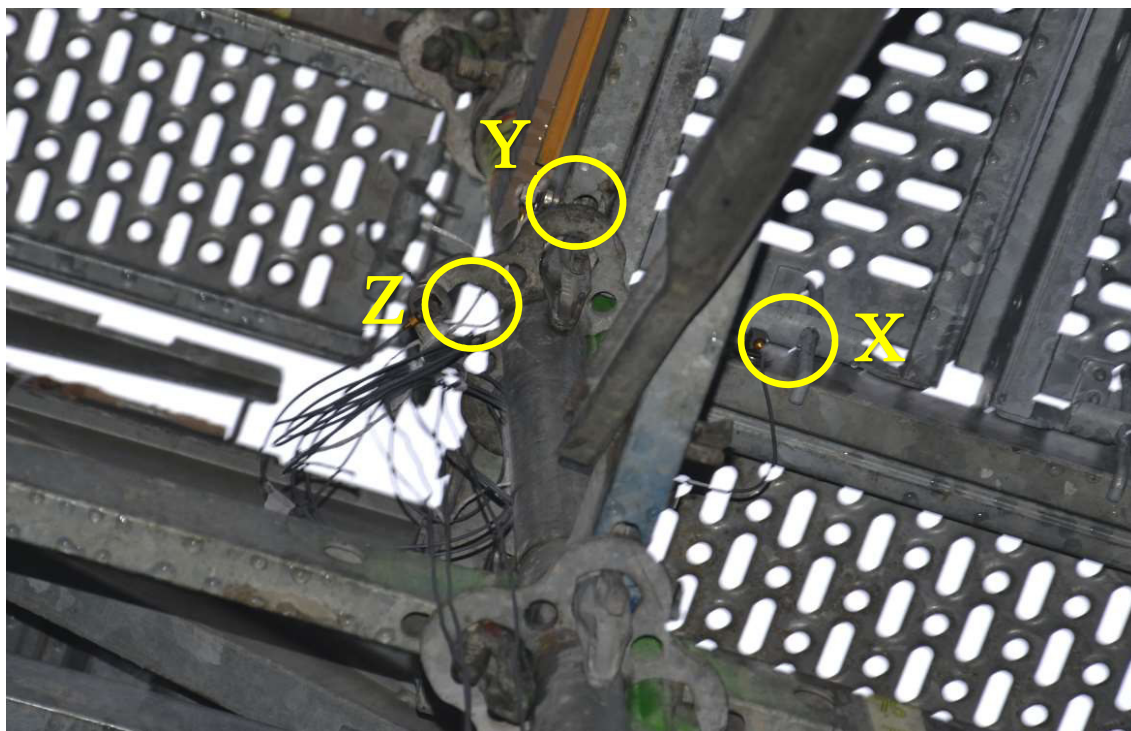
Snímače byly umístěny na třinácté „příčné“ řadě sloupů ve třech pozicích. Měřili jsme opět ve třech směrech X, Y a Z, které však měly opačnou orientaci, než u modální analýzy.



Obrázek 22 - Pozice snímačů pro měření odezvy během závodu

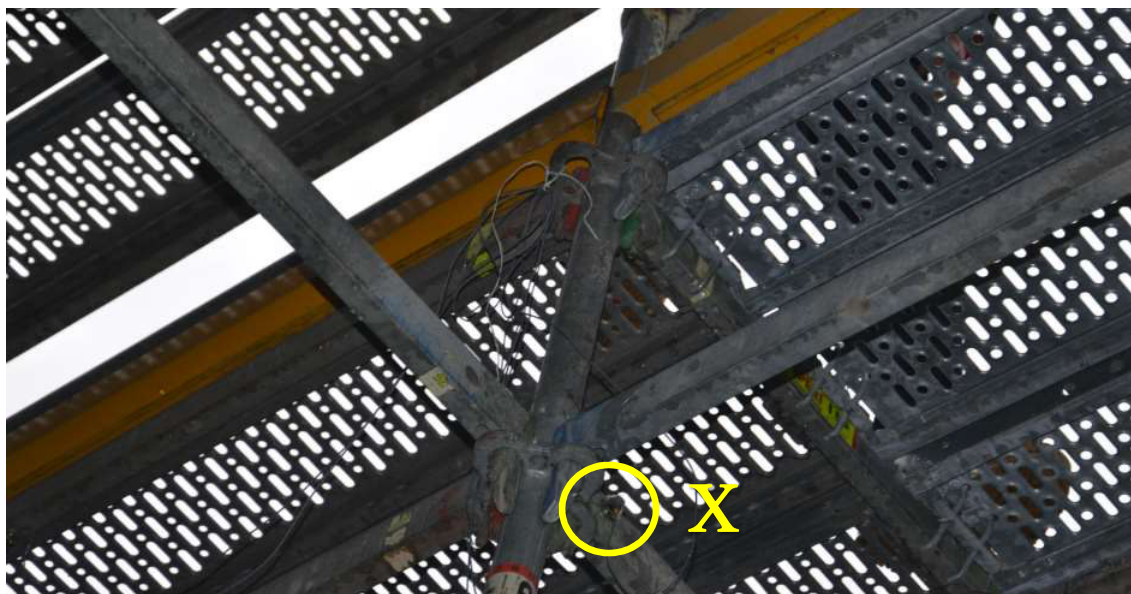


První pozice (viz obr. 22) byla na první „podélné“ řadě sloupků od schodiště. Snímač ve směru osy X byl umístěn na horizontále asi 120 mm od sloupku, snímač ve směru osy Y byl umístěn na horizontále těsně vedle sloupku a snímač ve směru os Z byl umístěn na rozetě sloupku (viz obr. 23).



Obrázek 23 - pozice 1. snímačů na odezvu od diváků

Druhá pozice (viz obr. 22) byla mezi druhou a třetí „podélnou“ řadou sloupků od schodiště. Snímač ve směru osy X však nebylo možno umístit doprostřed, proto byl umístěn u třetí „podélné“ řady sloupků od schodiště a to na první horizontálu pod podlázkou (viz obr. 24). Snímač ve směru osy Y byl umístěn doprostřed horizontály mezi druhou a třetí „podélnou“ řadou sloupků a snímač ve směru osy Z byl umístěn stejně, pouze zespod tohoto prvku (viz obr. 25).

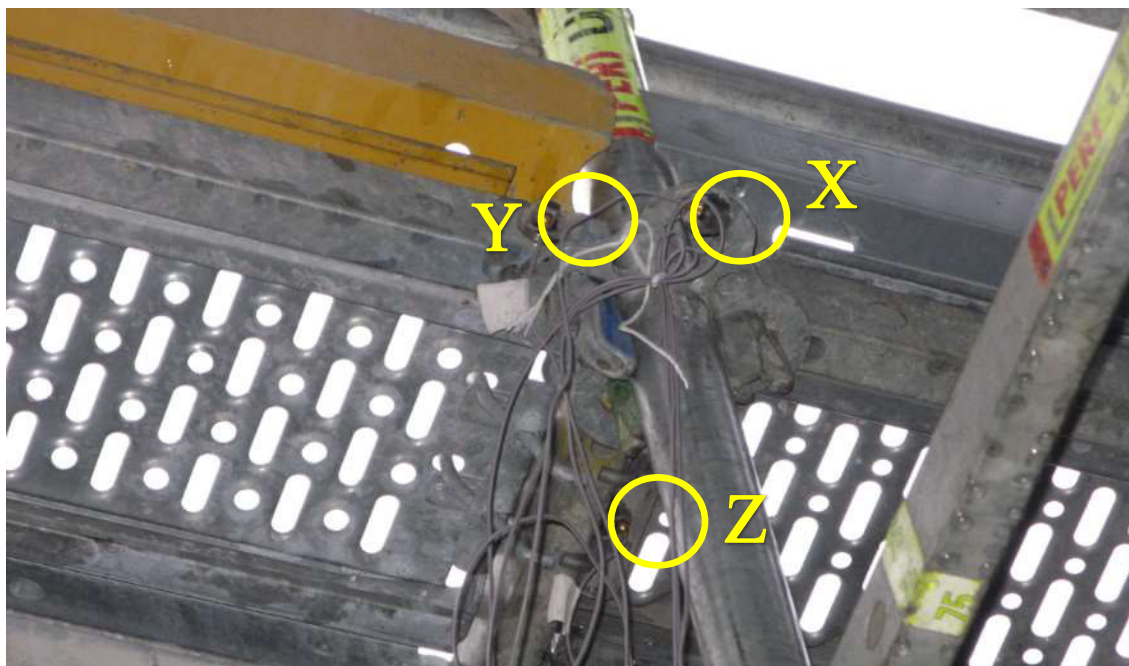


Obrázek 24 - pozice 2. snímačů na odezvu od diváků (směr X)



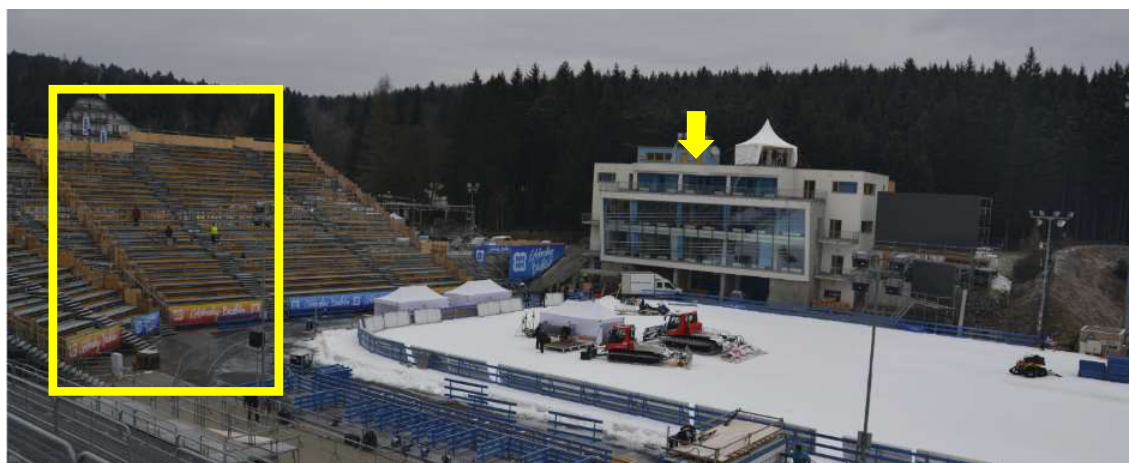
Obrázek 25 - pozice 2. snímačů na odezvu od diváků (směr Y a Z)

Třetí pozice (viz obr. 17) byla na čtvrté „podélné“ řadě sloupků od schodiště. Snímač ve směru osy X byl umístěn na horizontále asi 120 mm od sloupku, snímač ve směru osy Y byl umístěn na horizontále těsně vedle sloupku a snímač ve směru osy Z byl umístěn na rozetě sloupku (viz obr. 26).



Obrázek 26 - pozice 3. snímačů na odezvu od diváků, šipky neukazují směr os, ale pozici snímače

Odezvu jsme měřili před závodem, při plnění tribuny, během závodu a po závodě, během odchodu diváků z tribuny. Program byl nastaven tak, aby automaticky prováděl pětiminutové záznamy odezvy po celý závod. Celý závod se nahrával na kameru umístěnou cca 100 m od tribuny. Z videa se následně vyhodnocovaly typy chování diváků. Po synchronizaci videa se záznamem můžeme přiřadit významné úseky odezvy k určitým typům chování, nebo vybrat určité situace závodu a určit dynamický účinek od reakce diváků na tuto situaci (např. po úspěšné střelbě českého reprezentanta). Měřicí linka byla umístěna pod betonovou tribunou přibližně 50 m od snímačů. Linka byla umístěna a schována ve stanu.



Obrázek 27 - Žlutá šipka ukazuje umístění nahrávacího zařízení, žlutý obdelník označuje námi měřenou tribunu



7 Vyhodnocení měření

7.1 Modální analýza, frekvence a tvary vlastního kmitání

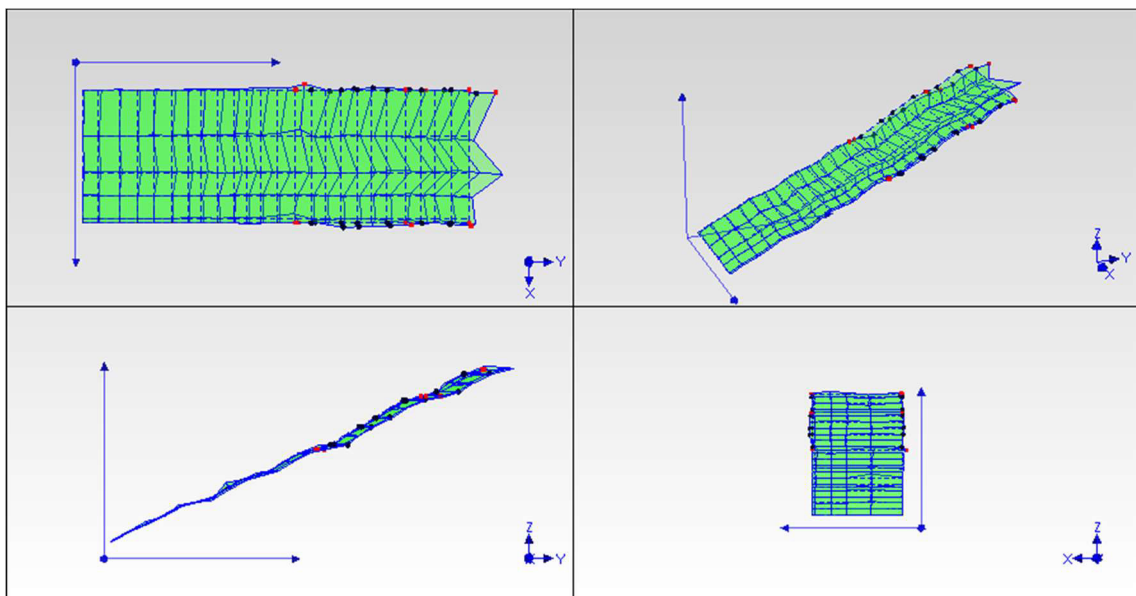
Vlastní frekvence a jim příslušně vlastní tvary jsem vyhodnocoval v programu MeScope. Po Fourierově transformaci odezvy z časové oblasti do oblasti frekvenční jsem vybral rezonanční špičky odpovídající vlastním frekvencím (největší pořadnice zrychlení). Bylo vyhodnoceno devět vlastních frekvencí (viz tab. 5) a jim příslušných vlastních tvarů (viz obr. 28 až 36). Tvary na vyšších frekvencích už bylo obtížné identifikovat, vykazovaly mnoho anomálií.

Tabulka 5 - Vyhodnocené vlastní frekvence

Pořadí	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Frekvence [Hz]	3.00	3.22	3.45	4.09	4.50	5.25	5.63	6.61	6.94

Vnější kraj pravé strany tribuny jsou body měřené na schodišti (v obrázcích kraj ležící dále od osy Y je pravá strana tribuny), druhá „podélná“ řada od schodiště jsou body měřené uprostřed podlažky.

Červené body na obrázcích značí polohy snímačů na podlažkách, připevněných pomocí speciálních svorek.



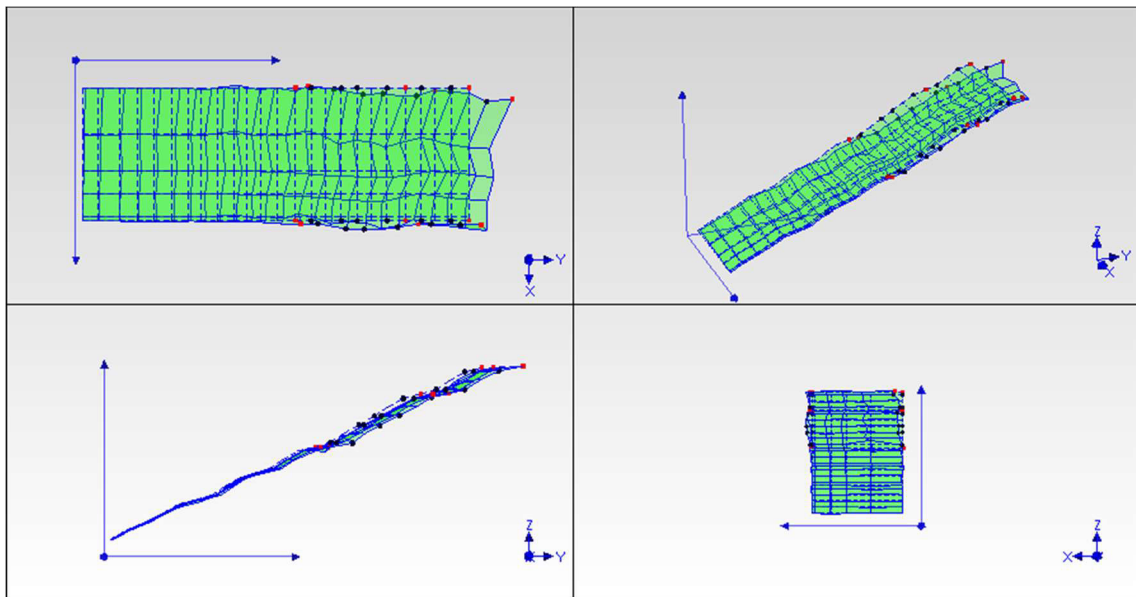
Obrázek 28 - 1. vlastní tvar $f = 3\text{Hz}$



První vyhodnocený vlastní tvar kmitá na frekvenci 3 Hz.

Kmitá výhradně podélně v Y směru (směr pohledu diváků). „Přední část tribuny“ kmitá s malými výchylkami, ty se s rostoucí výškou zvětšují a od 15. řady sloupků, tj. v místě přechodu na „zadní“ část tribuny skokově rostou.

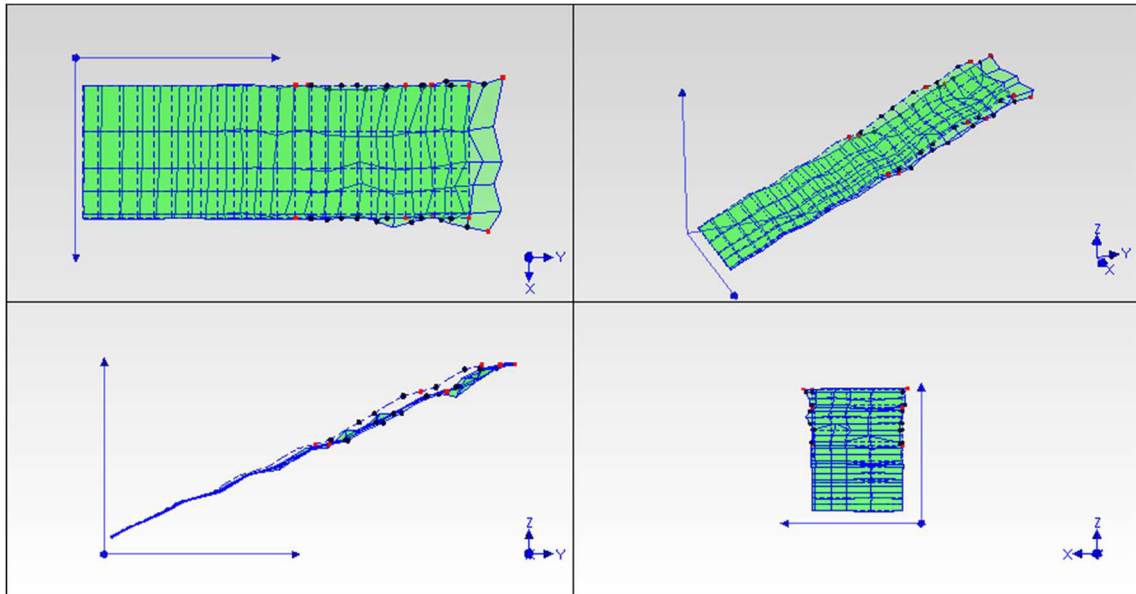
„Podélné“ řady sloupů se vůči sobě chovají nezávisle, to je pravděpodobně způsobeno tím, že v prostředním poli (mezi 2. – 3. řadou od shora, viz obr. 40) chybí diagonální ztužidla ve směru X. Tvar pak odpovídá tomu, že se krajní části chovají samostatně.



Obrázek 29 - 2. vlastní tvar $f = 3,22$ Hz

Druhý vlastní tvar kmitá na frekvenci 3,22 Hz.

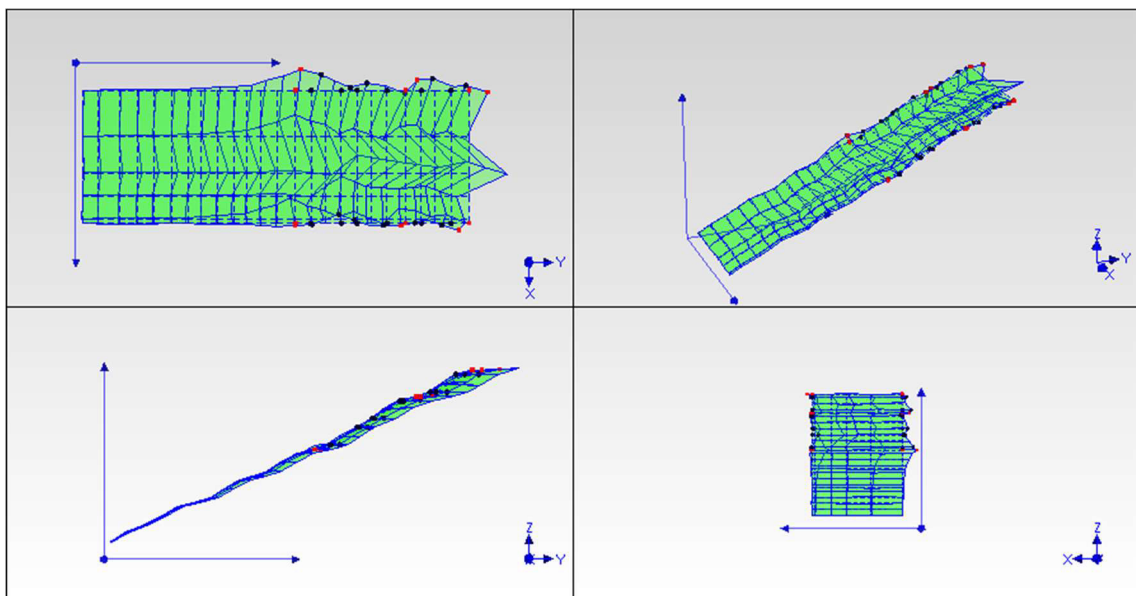
Stejně jako u předchozího tvaru, „přední“ část konstrukce s nízko položenými podlahkami a s hustěji rozmístěnými sloupky kmitá méně a prakticky jen ve směru Y. „Zadní část tribuny“ začíná kmitat ve směru X s většími výchylkami.



Obrázek 30 - 3. vlastní tvar $f= 3,45$ Hz

Třetí vlastní tvar kmitá na frekvenci 3,45 Hz.

Má obdobný charakter jako druhý vlastní tvar. Výchylky ve směru X jsou nižší, než u 3. vlastního tvaru.



Obrázek 31 - 4. vlastní tvar $f= 4,09$ Hz

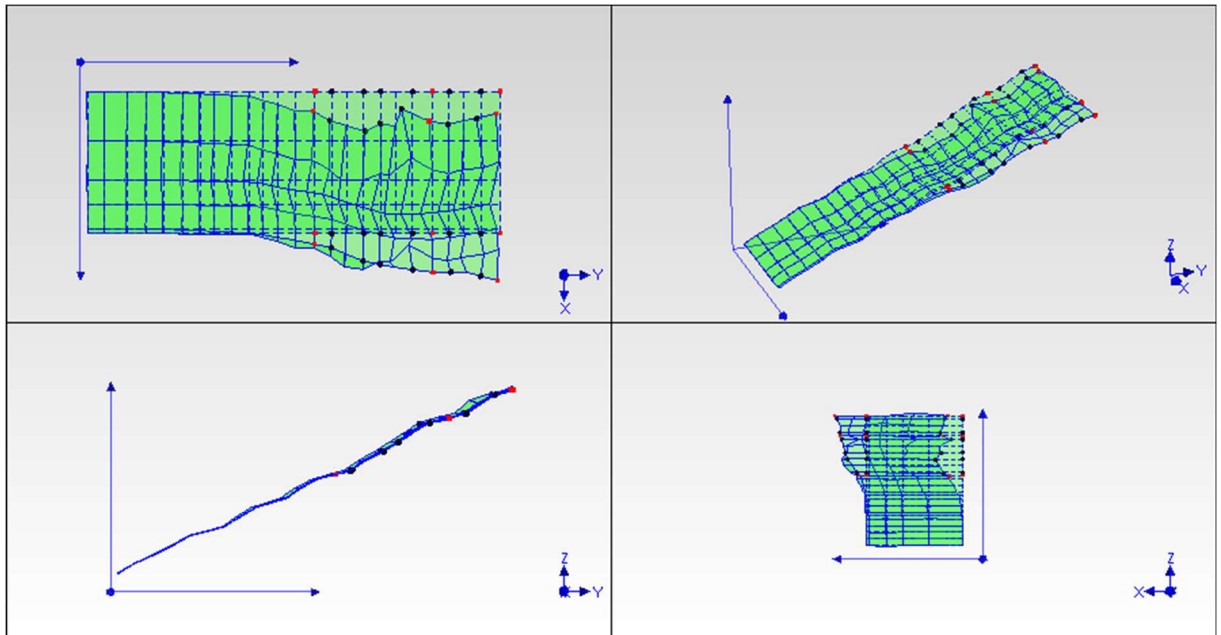
Čtvrtý vlastní tvar má vlastní frekvenci 4,09 Hz.

Rozhraní „přední“ a „zadní“ části tribuny kmitá převážně ve směru X se složkou ve směru Y. Chování tohoto místa odpovídá tomu, že je zde konstrukce poddajnější



a chová se jinak než zbytek konstrukce. Z obrázku 39 je jasné, že v místě této anomálie je podpěrná věž s modulem 2,5 m bez zavětrování ve směru Y. To může způsobit další rozdělení konstrukce na jednotlivé celky. Zbytek „zadní části tribuny“ kmitá převážně ve směru Y.

„Podélné“ řady sloupů se chovají nezávisle.



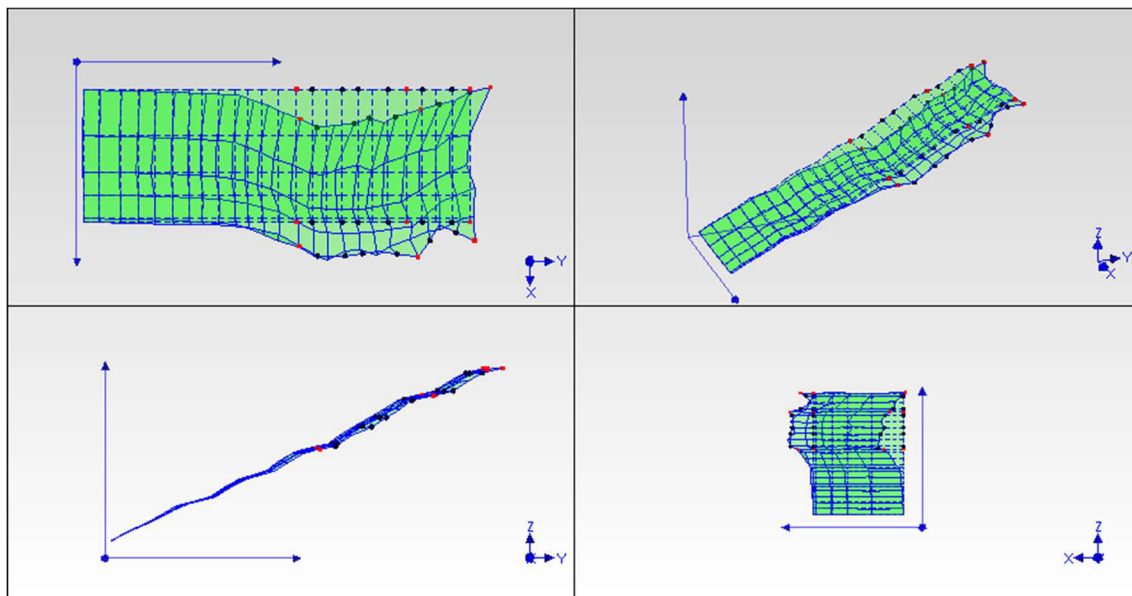
Obrázek 32 - 5. vlastní tvar $f = 4,5$ Hz

Pátý vlastní tvar má vlastní frekvenci 4,5 Hz.

Kmitá výhradně „zadní část“ a to ve směru X, několik posledních řad z „přední části“ kmitá taktěž. Z tvaru je patrné, že předpoklad tužší „přední“ části tribuny je pravdivý.

Na rozdíl od předchozích vlastních tvarů je zde vidět, že schodiště ve směru X kmitá nezávisle na tribuně.

Šestý bod zleva má výrazně nižší amplitudu výchylky, než zbývající body a tvoří v tvaru jakousi špičku. Ta je prokopírovaná skrz ostatní měřené body ve směru X, kromě třetí „podélné“ řady od schodiště. Je to tím, že výchylka u tří bodů z každé druhé řady byla iterována ze dvou nejbližších bodů (viz kapitola 6.3.2). Na páté vlastní frekvenci vzniká v této řadě nějaká anomálie, která může být způsobena místními konstrukčními rozdíly.

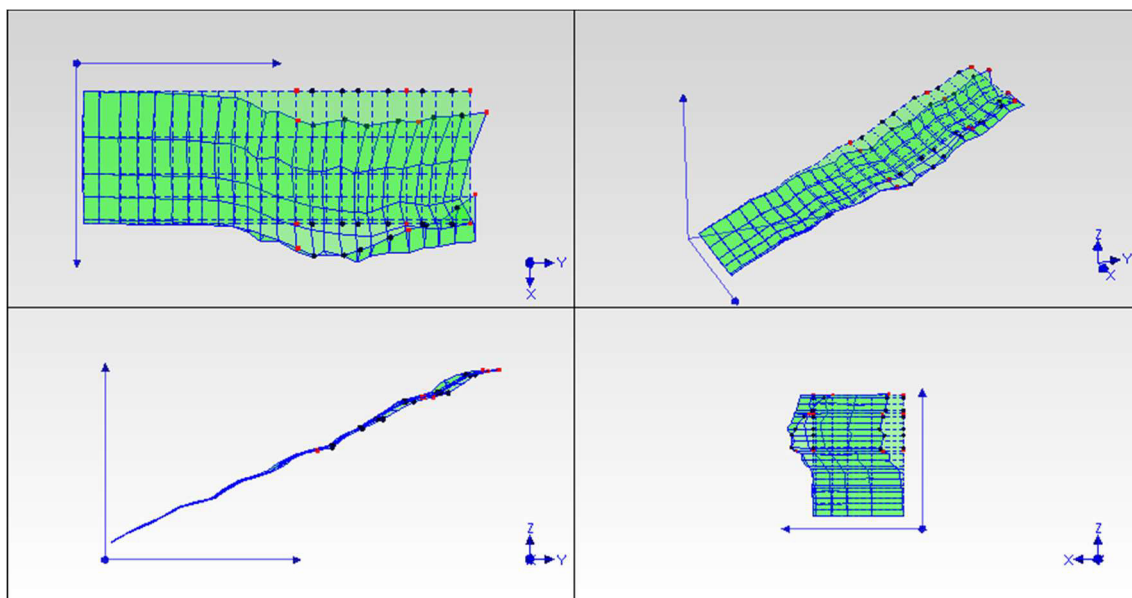


Obrázek 33 - 6. vlastní tvar $f = 5,25$ Hz

Šestý tvar má vlastní frekvenci 5,25 Hz.

Šestý vlastní tvar kmitá také ve směru X. Ale v poslední měřené „příčné“ řadě sloupků je pravděpodobně uzel tohoto tvaru.

Schodiště kmitá nezávisle na tribuně.



Obrázek 34 - 7. vlastní tvar $f = 5,63$ Hz

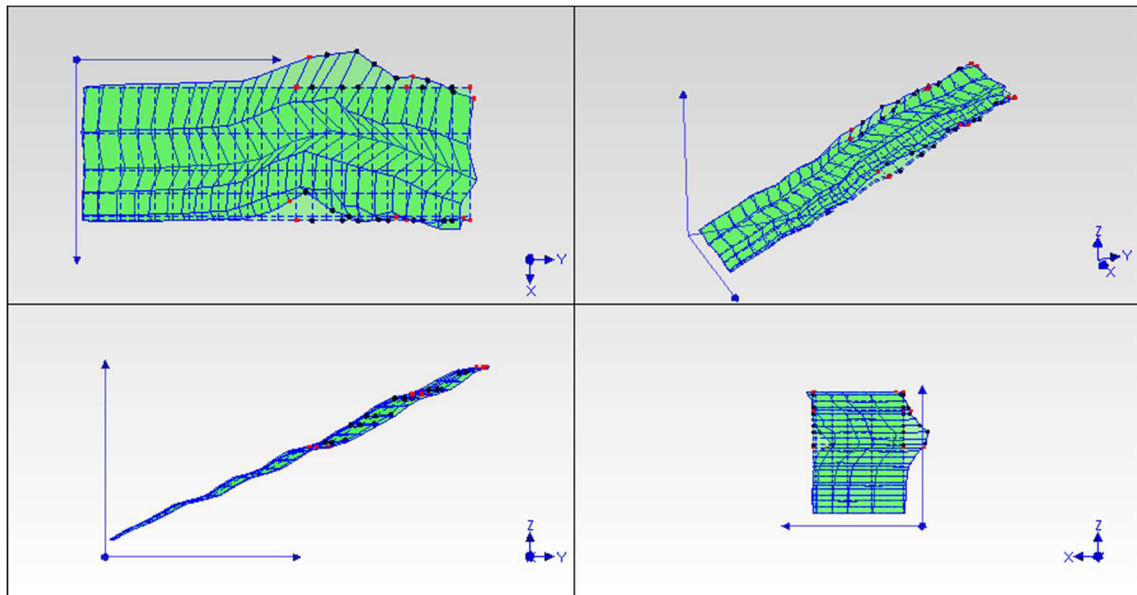


Vlastní frekvence sedmého tvaru je 5,63 Hz.

Tvar má obdobný charakter, jako šestý vlastní tvar. Poukazuje však na to, že uzel vlastního tvaru je až za měřenou částí tribuny.

V „zadní části“ se opět objevují lehké anomálie způsobené konstrukcí zadní částí tribuny.

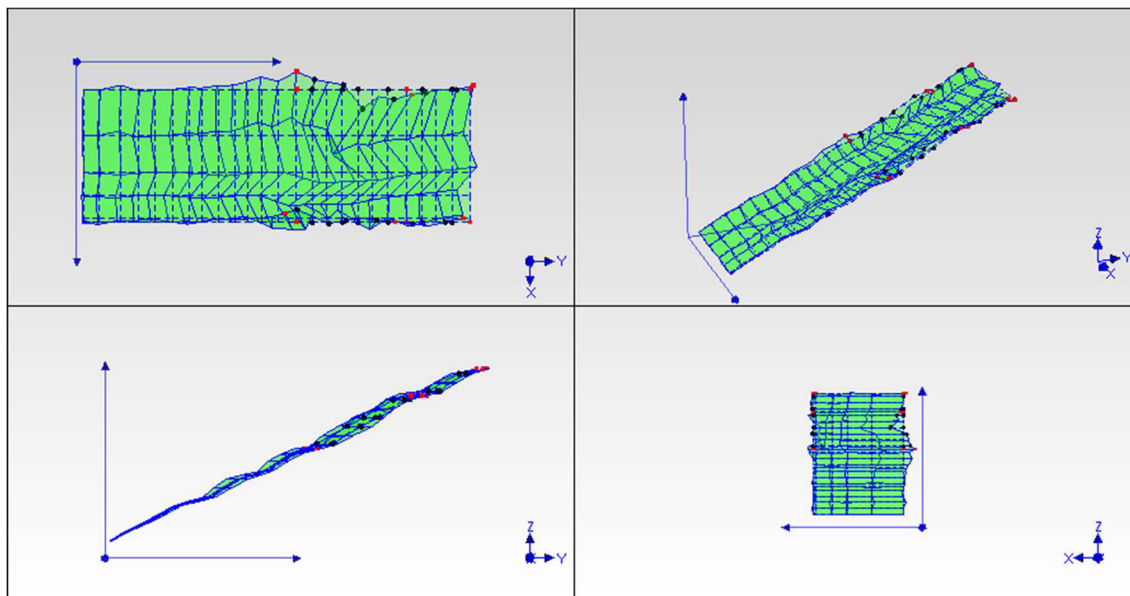
Schodiště kmitá samo.



Obrázek 35 - 8. vlastní tvar $f = 6,61$ Hz

Osmý vlastní tvar kmitá na frekvenci 6,61 Hz.

Tvar kmitá ve směru osy X. V předposledním měřeném bodě je uzel tohoto tvaru.



Obrázek 36 - 9. vlastní tvar 6,94 Hz

Devátý vlastní tvar kmitá na frekvenci 6,94 Hz.

Tento vlastní tvar je tvořen dvěma vlnami s výchylkou ve směru X a dvěma vlnami s výchylkou do směru Y. Přibližně uprostřed tribuny vzniká anomálie, způsobená pravděpodobně stejně, jako anomálie u čtvrtého vlastního tvaru.

Z výsledků je patrné, že „zadní část tribuny“ kmitá jinak než část „přední“. Na pomezí 15. řady sloupků vznikají anomálie. Konstrukce se pravděpodobně chová, jako několik samostatných celků, jako je „přední část tribuny“, podpěrné věže, „levá“ a „pravá“ část tribuny, tyto celky jsou spojeny pouze pomocí horizontál a podlážek, nikoli zavětrovány pomocí diagonál. V některých měřených bodech kmitají místní prvky lokálně.

7.1.1 Model

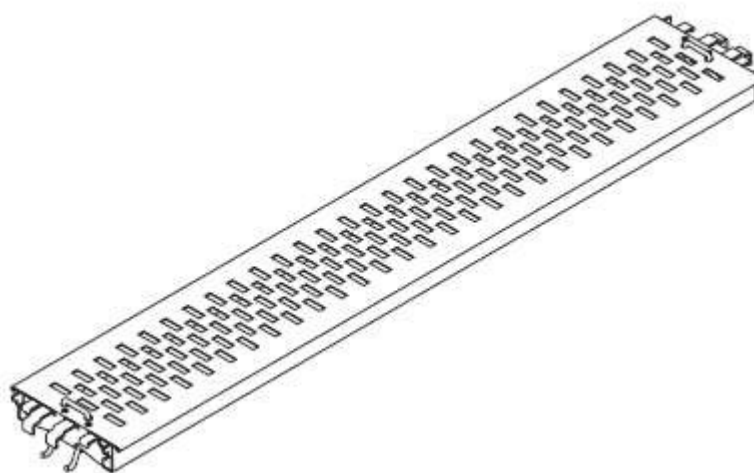
V programu Dlubal jsem vytvořil konečněprvkový model tribuny, se snahou zachytit co nejpřesněji skutečnost. Tribuna má však spoustu neznámých, proto jsem model zobecňoval a zjednodušoval.

U několika průřezů jsem neznal přesné rozměry (know-how firmy Peri). Ty pak byly voleny na základě známých vnějších průměrů, délek a hmotností prvku, následně srovnávány s fotografiemi. Podpory byly modelovány jako pevné klouby. Přípoje



horizontál se stojkami byly modelovány kloubově s tím, že se bude upravovat jejich tuhost k přiblížení vlastních frekvencí z modelu a skutečného experimentu. Diagonály byly modelovány s kloubovým připojením. Propojení tribuny se schodištěm a vedlejší tribunou bylo modelováno, jako pružné podpory s náhodnou tuhostí, kterou jsem následně upravoval tak, aby se vlastní tvary z modelu co nejvíce přiblížily skutečnosti.

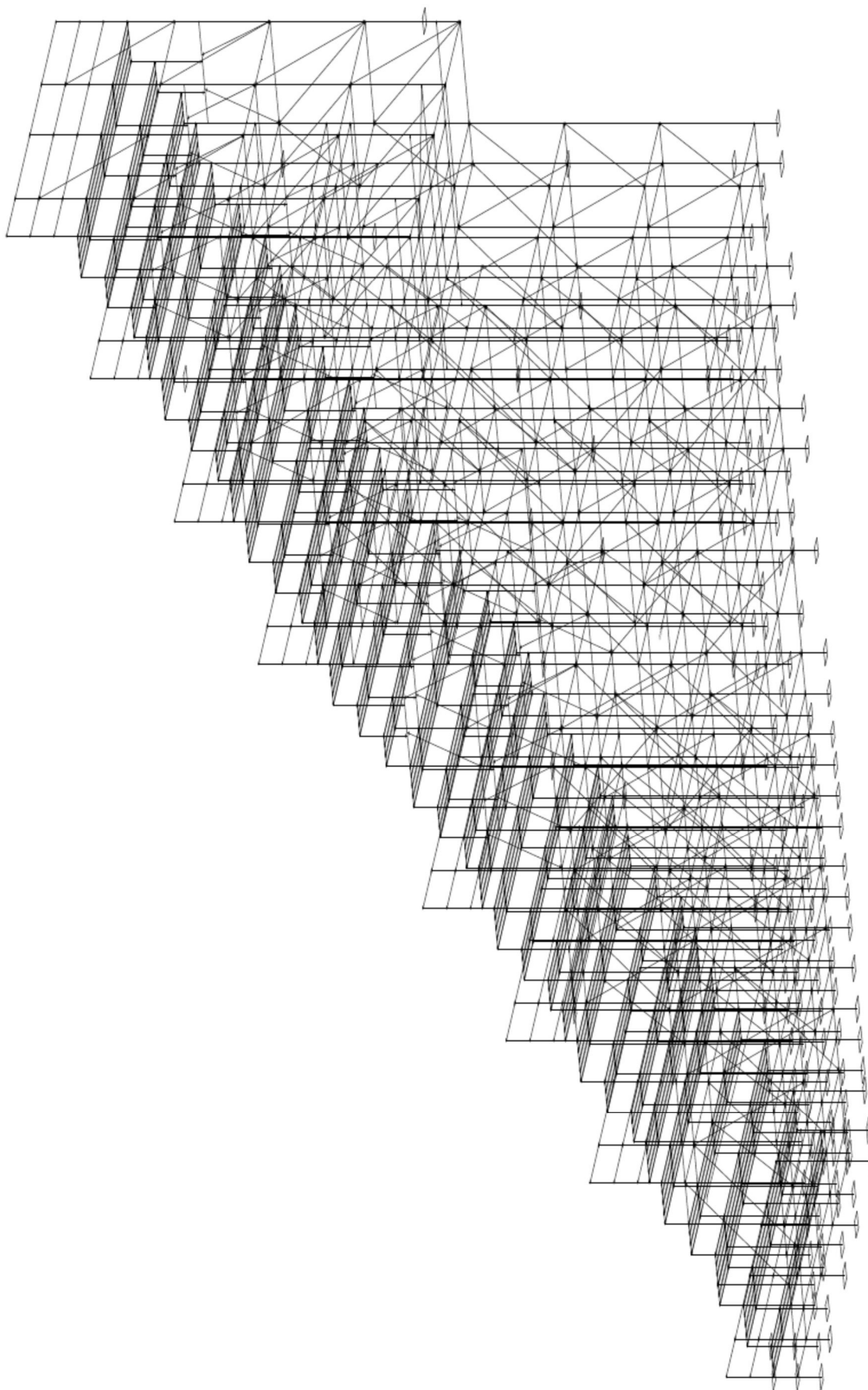
Podlážky jsem v modelu nahrazoval dvěma pruty, které tvořily boky podlážky, vlastnosti horní desky byly zanedbány. Pruty nahrazující podlážku (viz obr. 37) jsou připojeny kloubově s velkou tuhostí kolem osy Z. Ve skutečnosti jsou totiž pruty spojeny deskou a natočení prutu kolem osy Z, by pak bránilo tuhé spojení s druhým prutem skrz nemodelovanou desku.



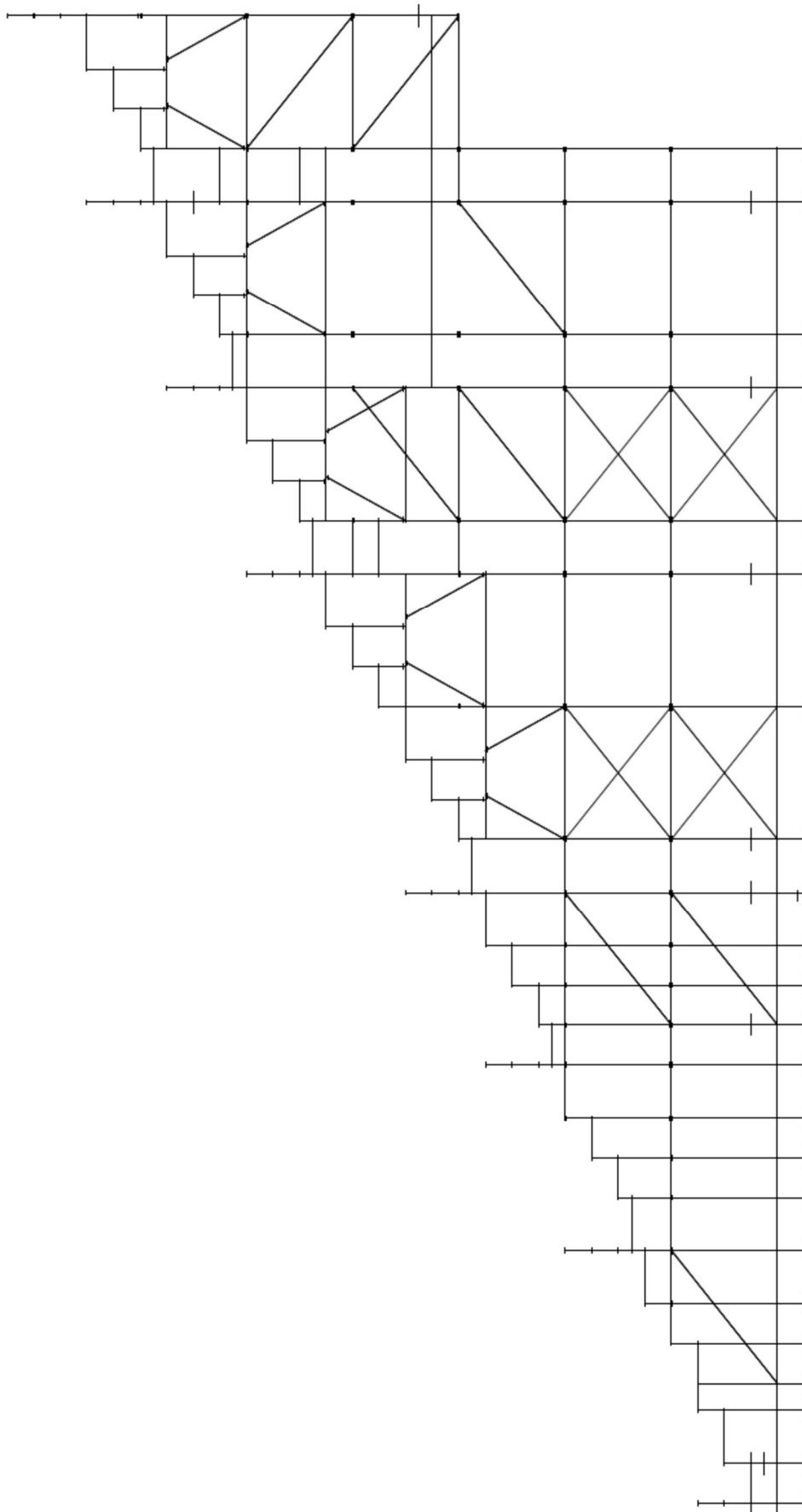
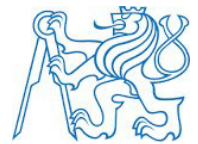
Obrázek 37 – Schéma podlážky lešení

Napojení horizontály na sloupek tribuny pomocí speciální svorky jsem zanedbával, tuhost kloubů je pak stejná, jako u horizontál připojených ke sloupku v místě rozety.

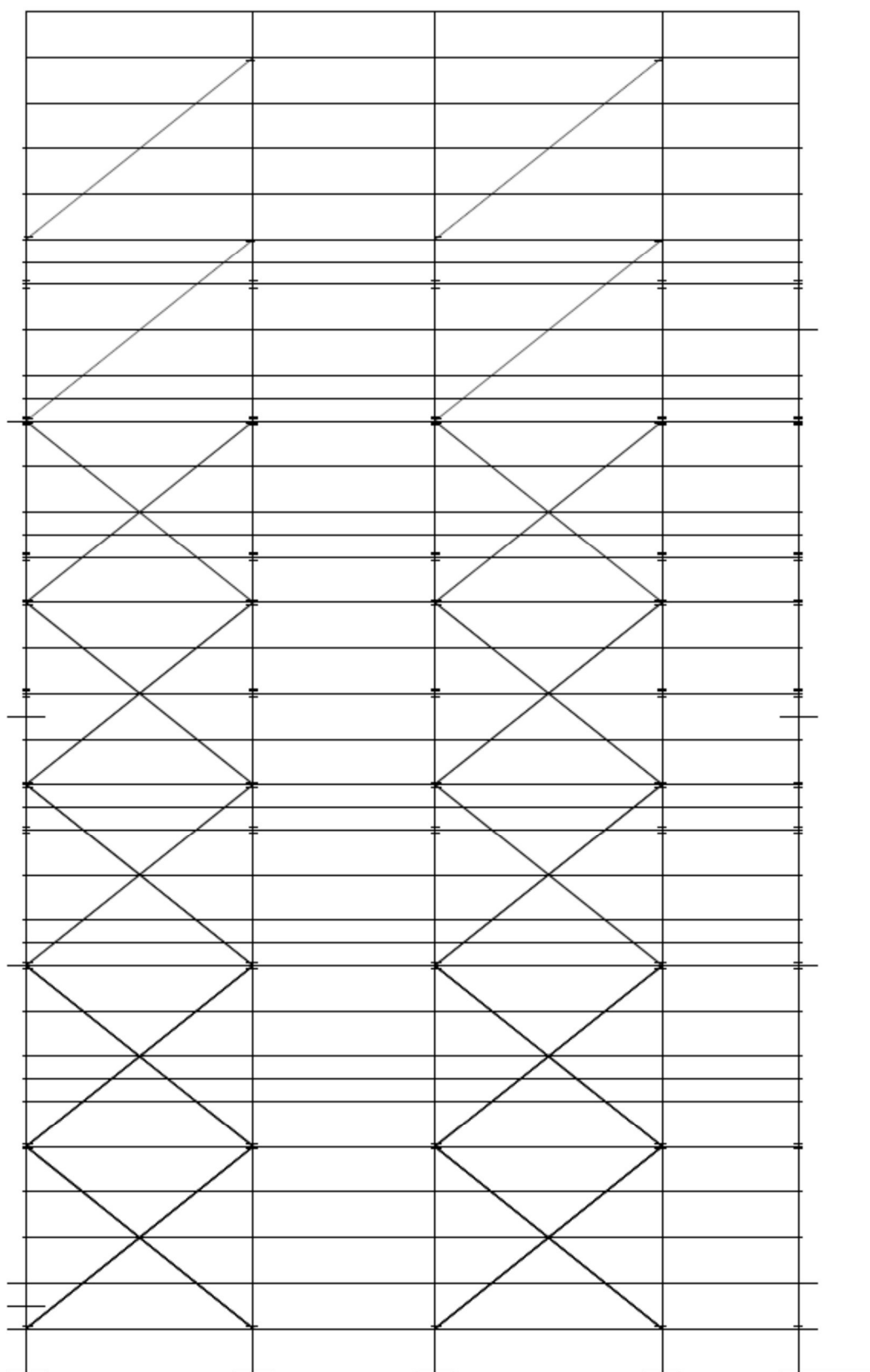
Na následujících obrázcích je export modelu z programu Dlubal, tvar odpovídá skutečnosti (obrázky nejsou v měřítku).



Obrázek 38 - Tribuna (z programu Dlubal)



Obrázek 39 - Řez modelem konstrukce (z programu Dlubal)



Obrázek 40 - Pohled zezadu (z programu Dlubal)



7.1.2 Porovnání modelu a skutečnosti

Program Dlubal umožňuje export pořadnic vlastních tvarů v zadaných bodech. V modelu jsem tedy určil body odpovídající pozicím bodů měřených. Exportované body jsem potom importoval do programu MeScope, kde jsem vypočtené tvary následně porovnával s výsledky z experimentu, pomocí koeficientu MAC.

Již při prvním pouze vizuálním porovnání bylo jasné, že kloubové spojení u horizontál bude mít nějakou tuhost. Postupně jsem tedy přidával tuhost. Upravoval jsem i tuhost vodorovných podpor (nahrazujících vodorovné spojení tribuny se schodištěm a s vedlejší tribunou). V případě, že jsem tuhosti u všech kloubů horizontál měnil dohromady, shodu vykazovaly pouze dva vlastní tvary s prvním a pátým vyhodnoceným tvarem. Nejlepší shoda pak byla u prvního tvaru, který měl frekvence cca o 0,5 Hz vyšší než tvar z experimentu, ale naopak u pátého tvaru byla vlastní frekvence cca o 0,5 Hz nižší, než u vyhodnoceného tvaru reálné konstrukce. Z toho jsem vyvodil, že konstrukce je ve směru Y poddajnější než ve směru X. Následně jsem tuhosti kloubů horizontál ve směru Y měnil nezávisle na tuhostech kloubů horizontál ve směru X, přičemž tuhosti kloubů horizontál ve směru X budou mít nějakou tuhost, která bude celkově nižší, než tuhosti kloubů horizontál ve směru Y.

K přiblížení podobnosti tvarů jsem měnil také tuhostí podpor, nahrazujících propojení se schodištěm a vedlejší tribunou. Podpory jsem i ubíral, případně přidával (neznalost přesného umístění. Místa byla špatně viditelná a nepřístupná.).

Sloupky jsou položeny na dřevěných podložkách, nebo podkládané různými odřezky bednění pro vyrovnání výšky. To vede také k rozdílným podmínkám pro uložení sloupků.

Nevýhodou modelování takovéto konstrukce je také to, že tuhost každého styčníku se může lišit. Například při montáži může pracovník umístit dva sloupky s projektovanou vzdáleností 2 m s odchylkou +/- 5 mm. V případě menší světlé vzdálenosti sloupků pak doléhá klínek horizontály lépe ke stěně sloupku a tím zajišťuje větší ohybovou tuhost, v případě větší osové vzdálenosti nemusí klínek horizontály doléhat celou svojí délkou ke sloupku a ohybovat tuhost spoje je potom nižší. V případě vnesení vodorovné síly do konstrukce (u menší konstrukce by se stačilo o konstrukci pouze opřít) se konstrukce lehce zdeformuje a tuhosti jednotlivých spojů se opět změní. Tuhosti kloubových spojů mohou být tedy různé.



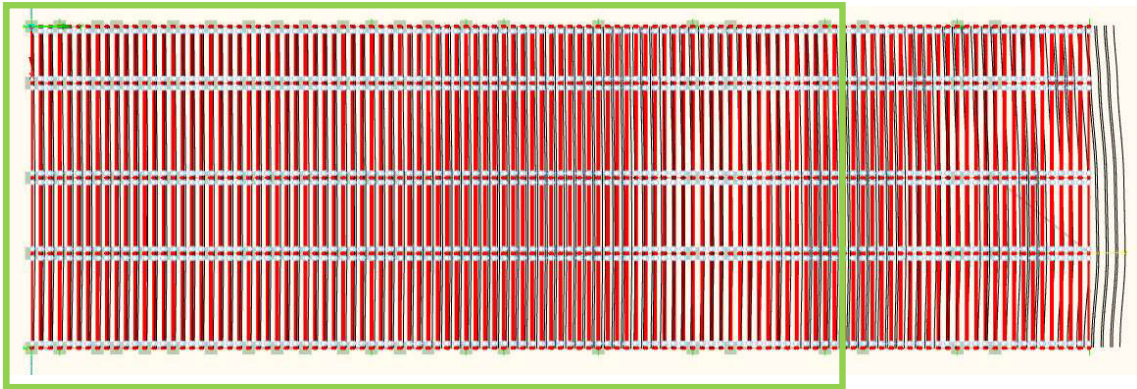
Další problém je tuhost spojů tribuny se schodištěm a vedlejší tribunou. Tuhost spoje je ovlivněna tuhostí dalších tribun a schodišť připojených k tribuně námi zkoumané. Určit potom tuhost alespoň řádově je velice obtížné. Vlastní tvary u reálné konstrukce mohou být pak ovlivněny vlastními tvary vedlejší připojené tribuny a vedlejšího schodiště. Připojená tribuna vlevo má tvar klínu (viz obr. 40) a mění se pomocí ní směr pohledu diváků, bude mít tedy rozdílné vlastní frekvence a tvary, které mohou ovlivnit tvary naší konstrukce. Také každé propojení bude mít velice pravděpodobně jinou tuhost, i kvůli způsobu propojení (viz obr. 6), která může být ovlivněna například použitou silou při utáhnutí objímky držící propojovací trubku.



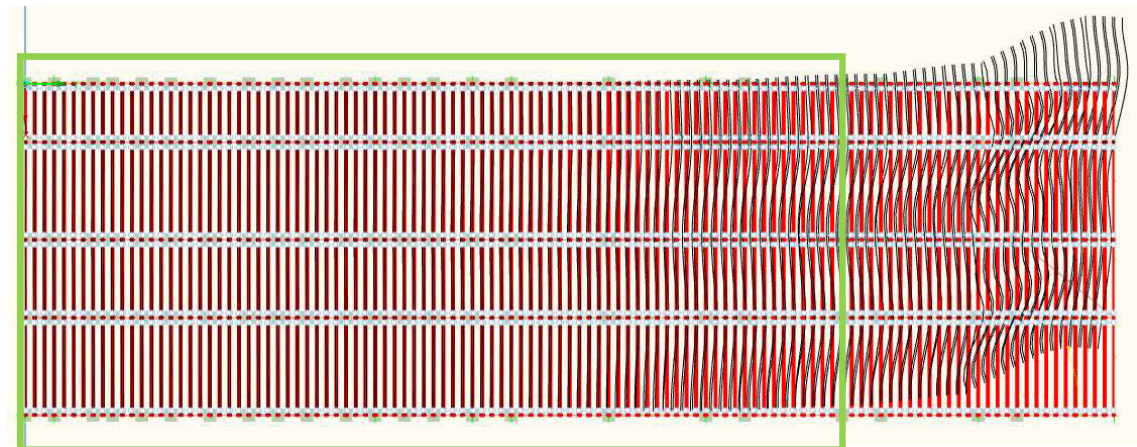
Obrázek 41 - Pohled na celou tribunu

Kvůli výše uvedeným důvodům a již provedeným několika změnám tuhostí spojů v modelu jsem usoudil, že se s podobností tvarů příliš nepřiblížím. Klouby horizontál ve směru X měly ve finální verzi modelu tuhost 100 kNm/rad , klouby ve směru Y byly voleny, jako vetknutí. Natočení kolem osy měly tyto prvky dovoleno.

Z konečněprvkového modelu jsem pak vyhodnotil 10 vlastních frekvencí a jim příslušejících vlastních tvarů. V následujících obrázcích je zobrazeno pět z těchto tvarů, které byly dále porovnány s tvary vyhodnocenými z experimentu. Na obrázku je vždy v rámečku část konstrukce, která byla měřena při experimentální modální analýze. Uvedeny jsou jen pohledy shora, jelikož tribuna kmitá výhradně ve vodorovném směru, ve směru svislém jsou výchylky zanedbatelné.

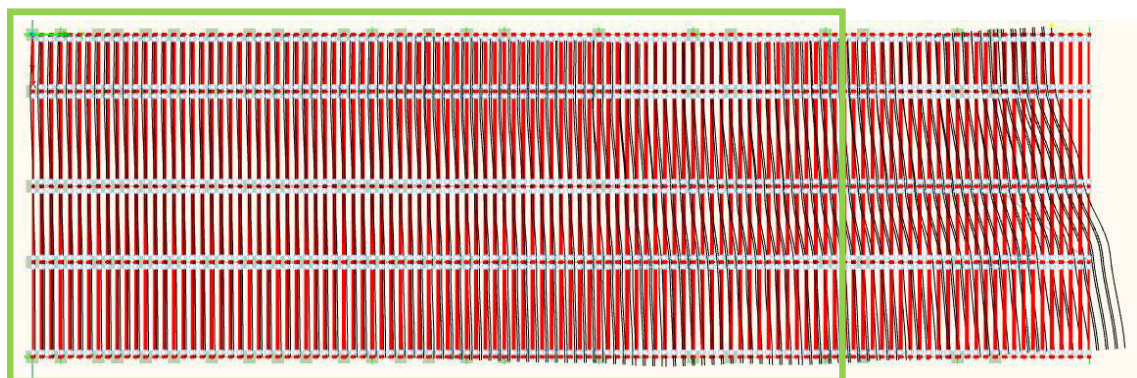


Obrázek 42 - 1. vlastní tvar z modelu $f = 2,97$ Hz

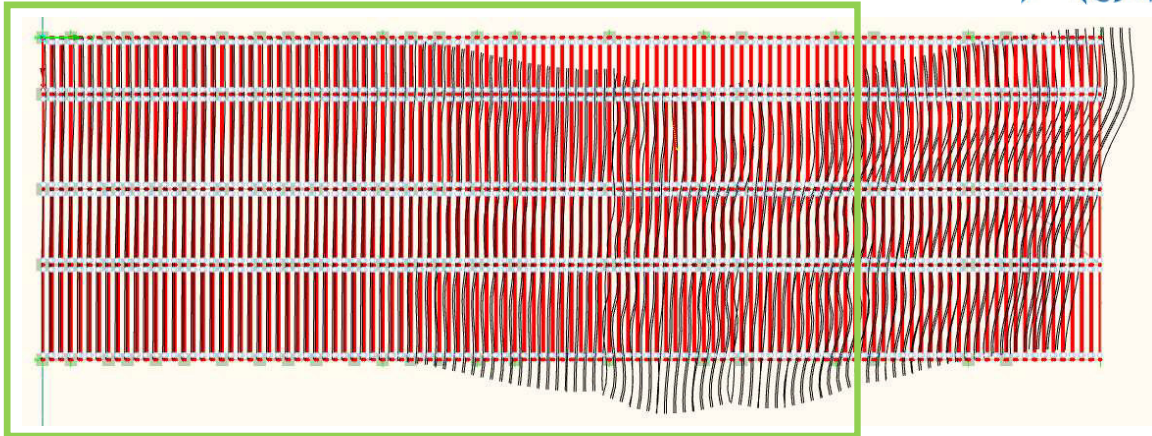


Obrázek 43 - 2. vlastní tvar z modelu $f = 3,636$ Hz

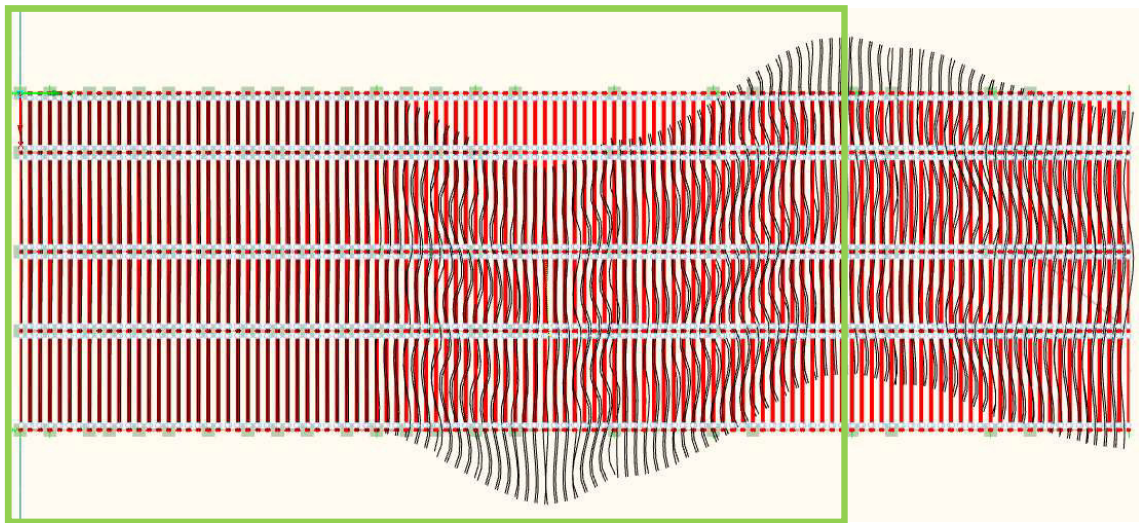
Tento tvar jsme neporovnávali, jelikož kmitá hlavně neměřená část tribuny. V měřené části tribuny jsou tak malé výchylky, že jsme tento tvar z experimentu nevyhodnotily.



Obrázek 44 - 3. vlastní tvar z modelu $f = 3,913$ Hz

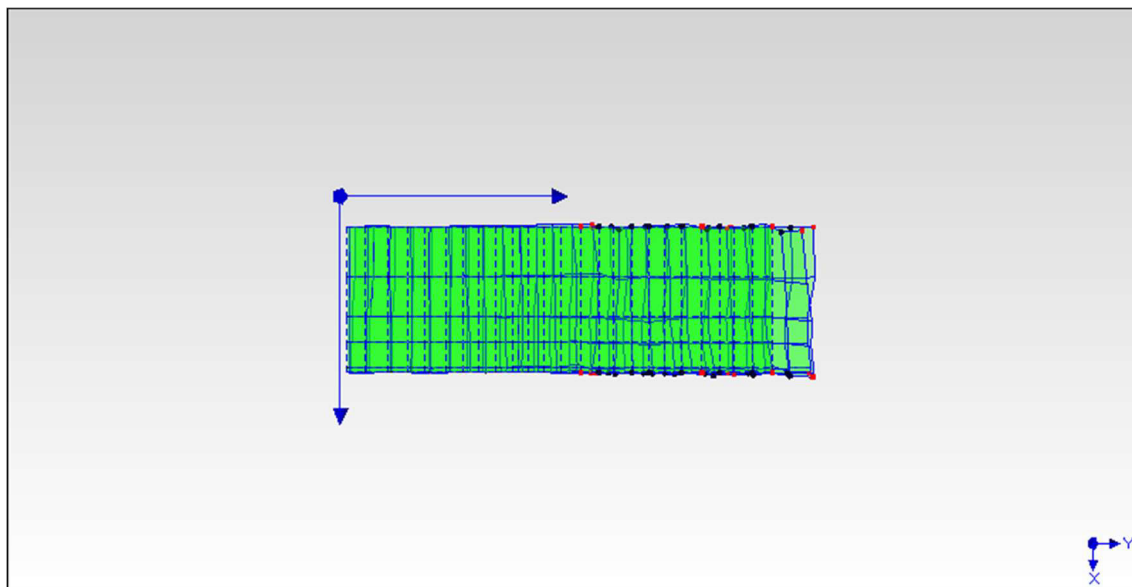


Obrázek 45- 4. vlastní tvar z modelu $f = 4,106 \text{ Hz}$



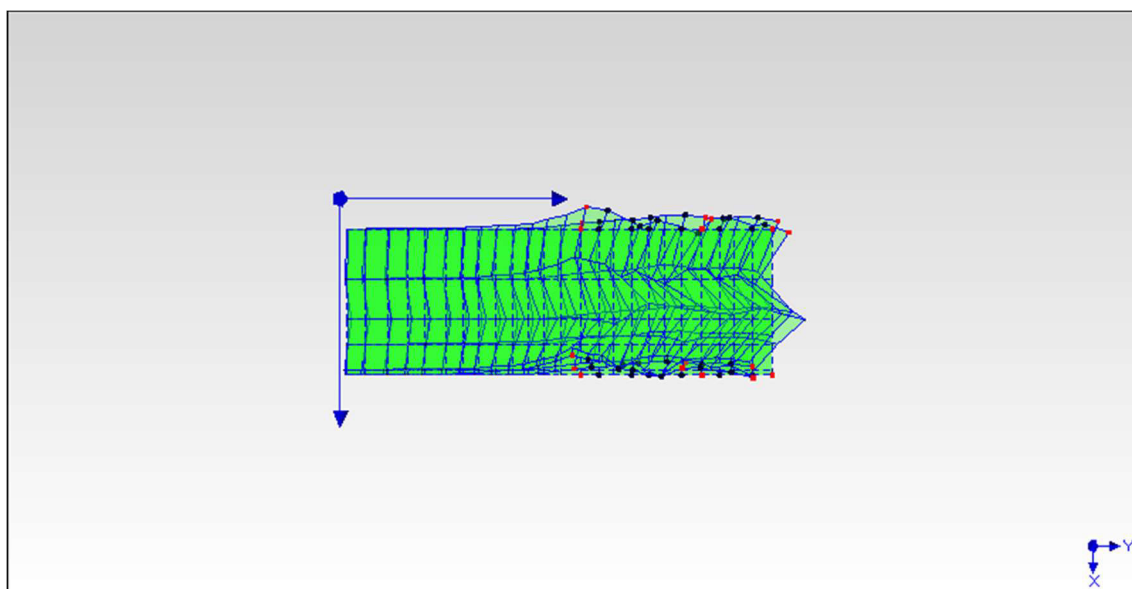
Obrázek 46 - 5. vlastní tvar z modelu $f = 4,75 \text{ Hz}$

Při porovnání tvarů jsem našel shodu pouze mezi čtyřmi tvary, model se nepovedlo naladit z již zmíněných důvodů. Shoda byla hodnocena pomocí koeficientu MAC. V následujících obrázcích je porovnání těchto tvarů. Na obrázku jsou vždy dva sobě odpovídající tvary přes sebe.



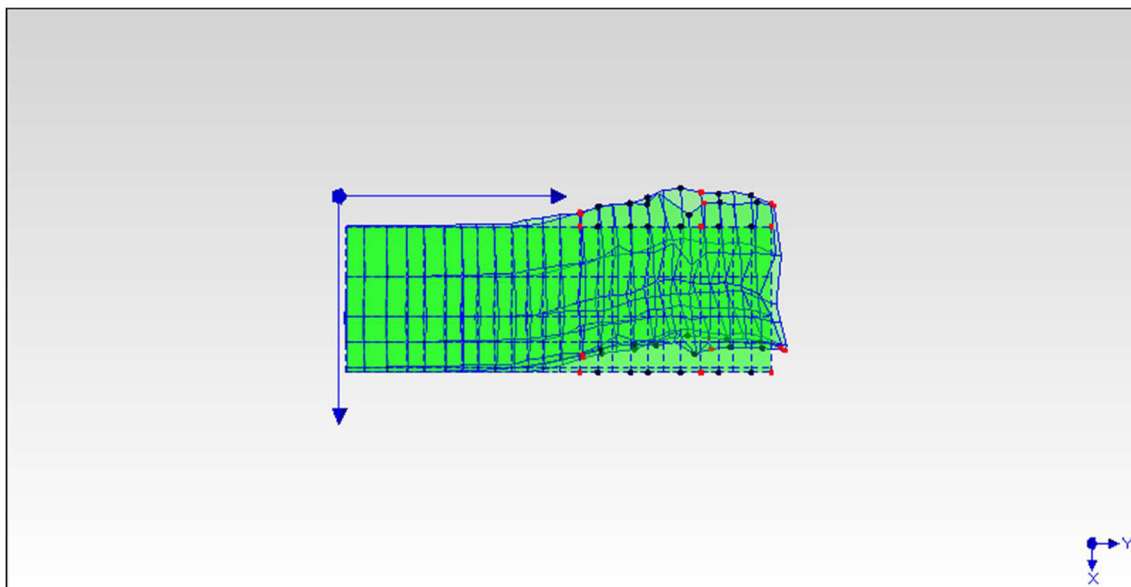
Obrázek 47 – 1. porovnání vlastních tvarů

Na obrázku je porovnaný 1. vlastní tvar z modelu s frekvencí 2,97 Hz s 1. vlastním tvarem z experimentu s frekvencí 3 Hz, vypočtený koeficient MAC má hodnotu 0,68. Oba tvary kmitají výhradně ve směru osy Y. U modelu je závislost sloupových řad větší, než u reálné konstrukce.



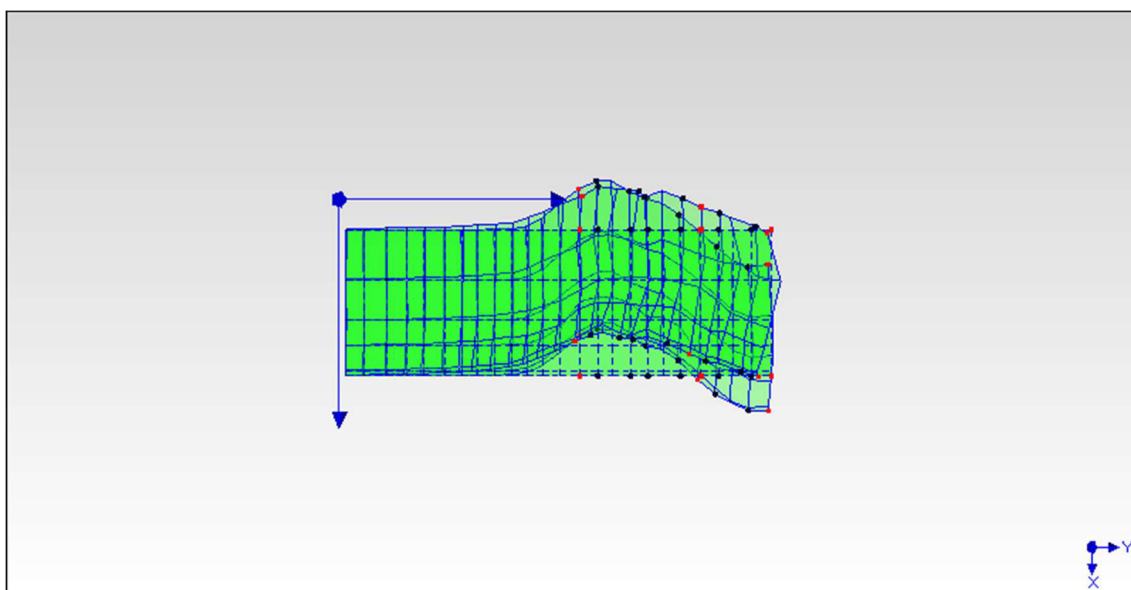
Obrázek 48 - 2. porovnání vlastních tvarů

Porovnání 3. vlastního tvaru z modelu s frekvencí 3,913 Hz se 4. vlastním tvarem z experimentu s vlastní frekvencí 4,09 Hz, vypočtený koeficient MAC má hodnotu 0,32.



Obrázek 49 - 3. Porovnání vlastních tvarů

Porovnání 4. vlastního tvaru z modelu s frekvencí 4,106 Hz s 5. vlastním tvarem z experimentu s vlastní frekvencí 4,5 Hz, vypočtený koeficient MAC má hodnotu 0,73.



Obrázek 50 - 4. porovnání vlastních tvarů

Porovnání 5. vlastního tvaru z modelu s frekvencí 4,75 Hz se 6. vlastním tvarem z experimentu s vlastní frekvencí 5,25 Hz, vypočtený koeficient MAC má hodnotu 0,48. Uzel měřeného tvaru je položen výše, než u tvaru vypočteného.

Byla snaha naladit i shodu frekvencí, ale přidáváním podpor nahrazující propojení tribuny se frekvence měnily málo, tvary se však měnily výrazně. Stejný efekt mělo



zvětšování tuhosti stávajících propojení. Změna tuhosti kloubů k navýšení frekvencí ve směru Y již nebyla možná z důvodu zavedení vetknutí. U kloubů prutů nahrazujících podlážky byla tuhost kolem osy Z nastavena již také na maximum (vetknutí), ještě šlo zvětšovat celkovou vodorovnou tuhost těchto podlážek (jelikož byly nahrazeny neodpovídajícími pruty), která by simulovala velkou tuhost samotné podlážky kolem osy Z, od toho bylo však upuštěno, jelikož při několika přiblíženích se opět pouze měnily vlastní tvary, vznikaly nové.

7.2 Vyhodnocení odezvy od diváků

Jak již bylo zmíněno, chování diváků může způsobit nadměrné kmitání tribuny, potom může dojít k nekomfortnímu zážitku diváků a v horším případě může dojít i k panice, při které mohou být diváci zraněni. V nejhorším případě může dojít ke kolapsu tribuny. Proto jsme měřili odezvu od diváků a určovali, zda se naměřené hodnoty splňují kritéria komfortu, případně paniky. Vyhodnocovali se nedělní závody, Hromadný závod žen (HZZ) a hromadný závod mužů (HZM). Tyto závody jsme volili z důvodu, že v mužském závodě se umístil český reprezentant Ondřej Moravec na čtvrtém místě a v ženském závodě vyhrála česká reprezentantka Gabriela Koukalová první místo. Předpokládali jsme tedy, že aktivní nadšení diváků způsobí větší odezvu konstrukce.

7.2.1 Vyhodnocení chování diváků

Při provádění experimentů měření odezvy tribuny na chování diváků je velkou výhodou možnost zaznamenat průběhu chování diváků na video a následně z videa vyhodnotit, jak se diváci během daného druhu akce chovají. Dá se předpokládat, že na biatlonovém závodě budou diváci klidnější, než např. na popovém koncertě nebo na fotbalovém zápase.

Rozhodně stojí za zmínku, že v pondělí 12. 12. 2016 dal francouzský reprezentant Martin Fourcade na sociální síť fotografii tribuny s komentářem „Nevím, jestli jsem tak velký fanoušek biatlonu, že bych na tuhle tribunu šel společně s 30 000 českými fanoušky“ (viz obr. 51), tato fotografie vyvolala na sociálních sítích velkou odezvu, mezi komentáři se objevil i příspěvek „Je samozřejmě lepší závodit a drtit konkurenci, než být rozdrčen na tribuně s diváky“. Rozhodně obava biatlonové jedničky, prezentovaná



na sociálních sítích, nebo obava samotných organizátorů závodu, měla za následek časté připomínky komentátorů závodu, aby fanoušci na tribunách neskákali.



Obrázek 51 - Příspěvek francouzského reprezentanta na sociálních sítích [11]

Během závodů se objevily prakticky jen čtyři typy chování, nebo jejich kombinace.

- 1) Statické sledování utkání – Diváci pasivně sledují závod, jednotlivci se občas zahřívají pohupováním, mnutím rukou, nebo lehkým podupováním. Diváci vykazují tento typ chování většinu závodu a to v době, kdy jsou závodníci mimo část trati ležící u tribuny.
- 2) Pohupování – Typ podobný skákání, diváci se pohupují do rytmu reprodukované hudby.



- 3) Tleskání – Nejčastější typ povzbuzování, kdy diváci tleskají s rukama před hrudí.
- 4) Chůze – Nastává při plnění tribuny před závodem a po ukončení závodu při odchodu diváků.



Obrázek 52 - Ilustrační fotografie plné tribuny. Záběr, který snímala kamera.

Po analýze jednotlivých typů chování jsem dospěl k závěru, že u potlesku většinou začne malé procento diváků, prakticky ihned se přidávají další, potlesk odeznívá však pomaleji (cca 10% diváků za 2 sekundy). Nastává situace, kdy potlesk přijde najednou u všech aktivně zapojených diváků do potlesku a to je ihned po dokončení střelby českého reprezentanta (někdy je potlesk doplněn i pohupováním), kterému předcházela klid, doprovázený nadšeným zajásáním diváků po jednotlivých výstřelech. V případě úspěchu je procento tleskajících větší, než v případě střelby s chybou. Největší potlesk potom sklízí první z českých závodníků a potlesk ustává pomaleji. Potlesk může být ukončen najednou a to příjezdem dalšího reprezentanta na střelnici, nebo tím, že začne mluvit komentátor a diváci se ztiší, aby ho slyšeli.

Ve chvílích, kdy se neděje přímo před tribunou žádná akce, tak diváci staticky stojí, nebo je pouštěna reprodukováná hudba, na tu se pak určité procento diváků začne pohupovat. Procento a intenzita pohupování závisí na konkrétní skladbě. Největší



procento diváků se zapojí do pohupování v případě hraní populární písně a ideálně refrénu (nejznámější část skladby). Opakování písně rozproudí také větší část davu. Největší intenzita pohupování pak přichází u skladeb, kdy se mohou diváci podílet svým hlasem nebo popěvkem k samotné hudbě. Trvání reprodukce hudby je do 30 sekund. Z videa to vypadá, že v případě zapojení velkého procenta diváků do pohupování je hudba utlumena, nebo přerušena komentátorem a tím pádem i konec samotného pohupování.

Časy jednotlivých činností byly vyhodnocovány od začátku závodu do dokončení prvního závodníka a začátku odchodu z tribuny, HZM pak trval 37 minut a 17 vteřin a HZZ trval 36 minut a 50 vteřin. Trvání dojezdu závodu a vyhlášení bylo u HZM 14 minut a 3 vteřiny a u HZZ 24 minut a 31 vteřin. U HZZ setrvala část diváků až do vyhlášení vítězů.

Tabulky 6 a 7 ukazují časy trvání jednotlivých činností a procentuální podíl z času celého závodu.

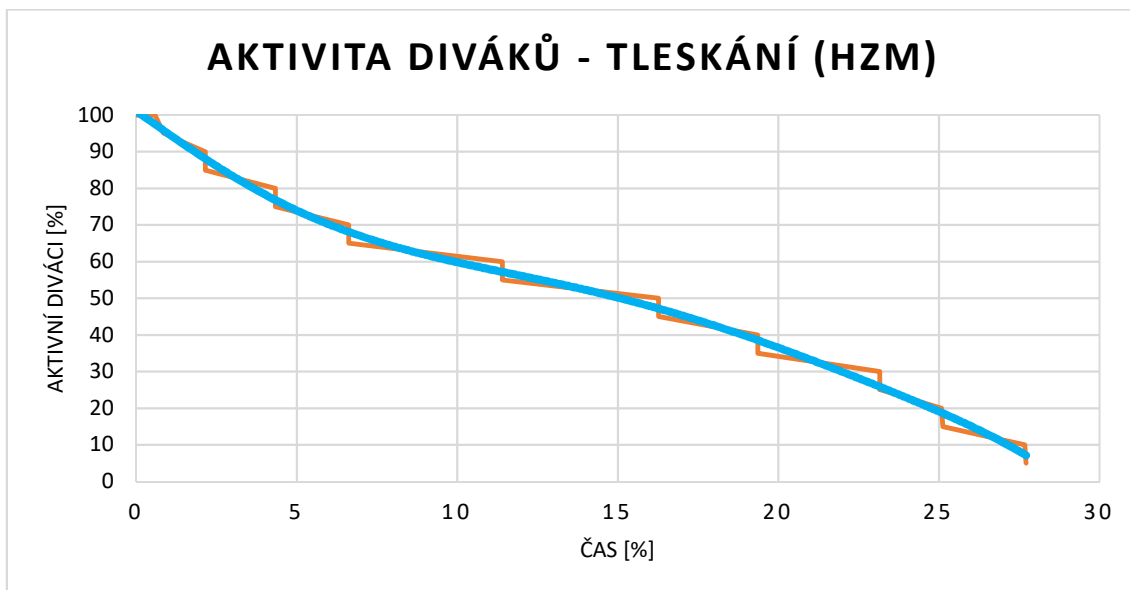
Tabulka 6 - celkové časy jednotlivých činností během závodů

činnost	HZM		HZZ	
	celkový čas činnosti [hod:min:sec]	trvání [%]	celkový čas činnosti [hod:min:sec]	trvání [%]
Statické sledování zápasu	0:21:40	58.11	0:17:36	47.78
Pohupování	0:05:17	14.17	0:03:45	10.18
Potlesk	0:10:20	27.72	0:15:29	42.04
Chůze	0:00:00	0.00	0:00:00	0.00

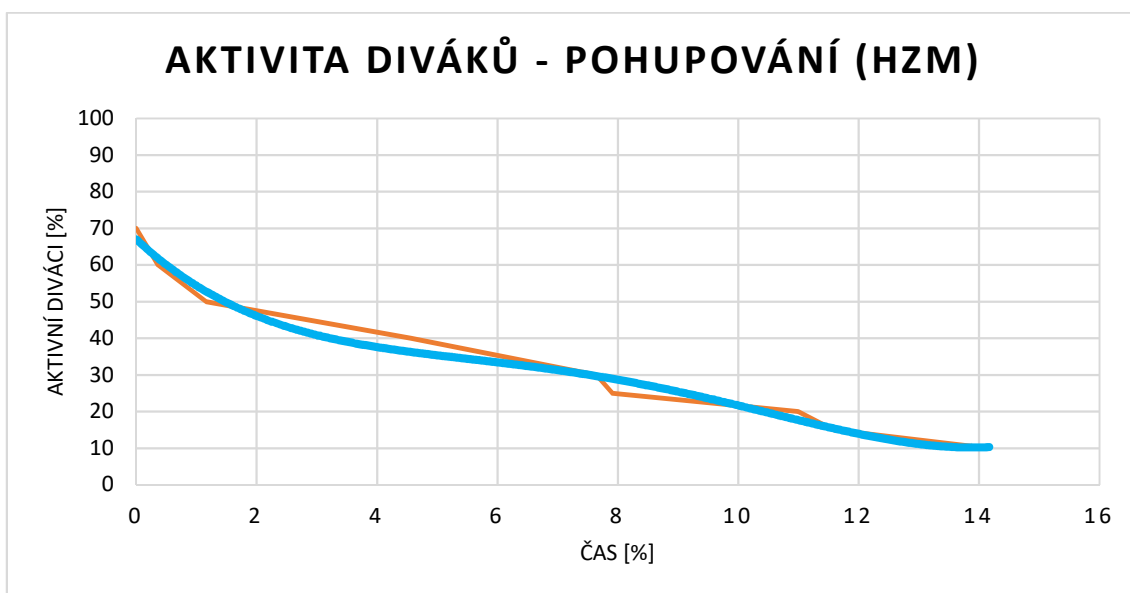
Tabulka 7 - celkové časy jednotlivých činností mezi závody

činnost	HZM – Odchod a vyhlášení		HZZ – Odchod a vyhlášení	
	celkový čas činnosti [hod:min:sec]	trvání [%]	celkový čas činnosti [hod:min:sec]	trvání [%]
Statické sledování zápasu	0:00:00	0.00	0:06:46	27.60
Pohupování	0:00:00	0.00	0:02:13	9.04
Potlesk	0:00:00	0.00	0:08:09	33.24
Chůze	0:14:03	100.00	0:07:23	30.12

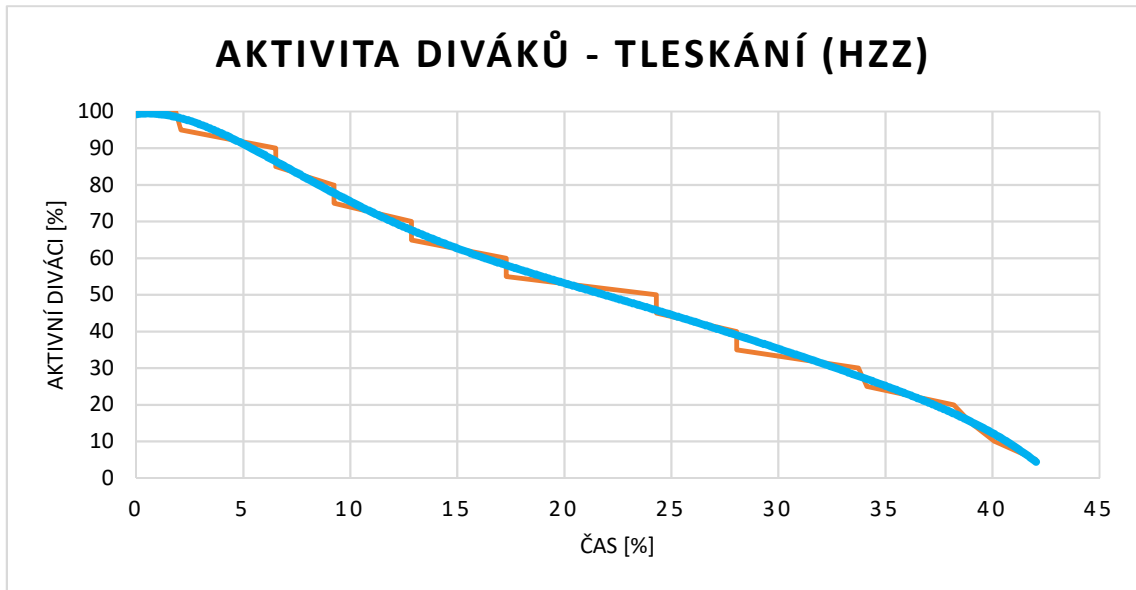
Z hromadného závodu žen i mužů byla ještě vyhodnocen četnost aktivity diváků, znázorňující, kolik procent diváků se aktivně zapojilo do dané činnosti (viz obr. 53-56).



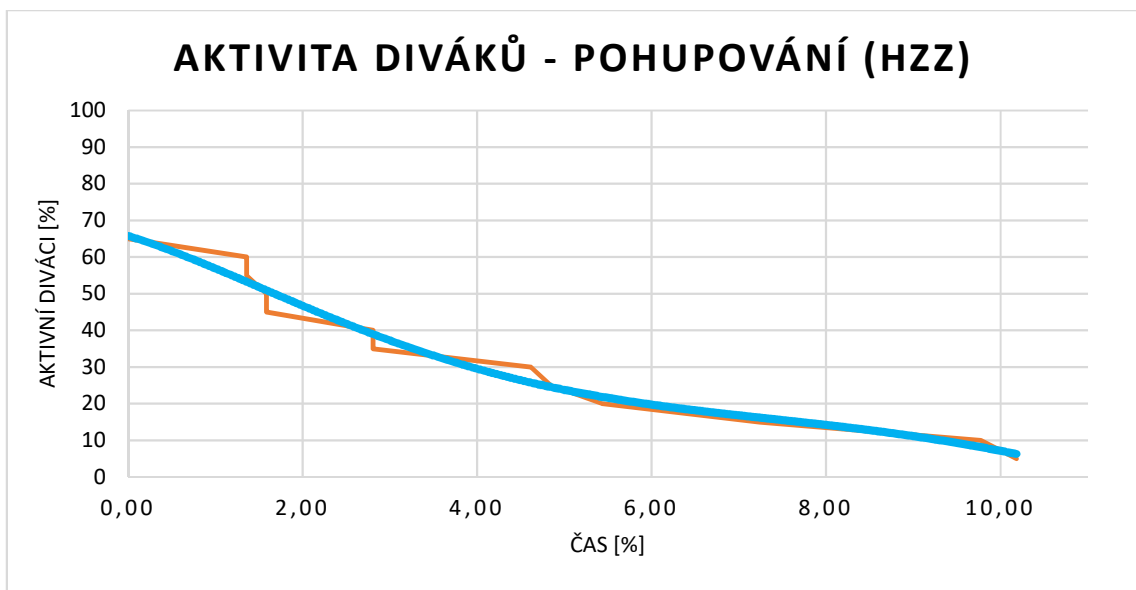
Obrázek 53 – Aktivita diváků - tleskání (HZM), čas je uveden v % z celkové doby závodu



Obrázek 54 - Aktivita diváků - pohupování (HZM), čas je uveden v % z celkové doby závodu



Obrázek 55 - Aktivita diváků - četnosti tleskání (HZZ) čas je uveden v % z celkové doby závodu



Obrázek 56 - Aktivita diváků - četnosti pohupování (HZZ), čas je uveden v % z celkové doby závodu

7.2.2 Vyhodnocení extrémů, které nastaly během závodu

Odezvu jsem vyhodnocoval v programu Material Damping vytvořeném prof. Michalem Polákem na katedře mechaniky, FSv, ČVUT v Praze.

V obou závodech jsem použil automatický výpočet pro vyhodnocení šesti extrémů (minima a maxima) na každý záznam odezvy zrychlení. Měření probíhala před i po závodě. Celkem bylo provedeno dvanáct pětiminutových měření, cca 40 minut



závodu a 20 minut kombinace před a po závodě, jak u HZM, tak u HZZ. Extrémy jsou uvedeny v tabulkách v této kapitole. Uvádím pouze dvě hodnoty extrémů na každých pět minut závodu, výsledky by byly jinak nepřehledné. V tabulkách jsou vynechána místa, kde nebylo více extrémů. Vždy první hodnota z řádku je největší extrém.

Kmitání na frekvencích nad 10 Hz nemá velký vliv na komfort člověka. Proto je vhodné vyšší frekvence odfiltrovat a tím se zbavit i vysokofrekvenčních zrychlení, které nemají vliv na komfort člověka. Program využívá frekvenční filtr, který nezkreslí frekvence do poloviny zadané hodnoty horní, či dolní propusti. Z tohoto důvodu jsme používali filtr s dolní propustí 20 Hz. Frekvence do 10 Hz pak byly nezkreslené. Ještě byl použit filtr s horní propustí 0,5 Hz, jelikož je tato oblast mimo frekvenční rozsah použitých snímačů.

Tabulka 8 - Hodnoty extrémů 1. – 20. minuta měření HZM

pozice	extrém	zrychlení [m/s ²]							
		čas [min]							
		1.-5.		6.-10.		11.-15.		16.-20.	
1X	min	-0.336	-0.217	-0.066	-0.052	-0.086		-0.088	
	max	0.275	0.189	0.056	0.064	0.088		0.108	0.091
1Y	min	-0.118	-0.115	-0.425	-0.160	-0.255	-0.173	-0.238	-0.207
	max	0.142	0.138	0.287	0.200	0.143	0.140	0.287	0.245
1Z	min	0.016		-0.020		-0.056		-0.172	
	max	-0.044		0.022		0.048		0.109	0.055
2X	min	-0.195	-0.123	-0.072	-0.072	-0.127	-0.091	-0.101	-0.096
	max	0.063	0.059	0.120	0.078	0.200	0.126	0.090	0.086
2Y	min	-0.328	-0.218	-0.469	-0.387	-0.449	-0.414	-0.378	-0.352
	max	0.217	0.214	0.372	0.351	0.395	0.350	0.340	0.278
2Z	min	-0.020	-0.030	-0.033		-0.070	-0.057	-0.043	-0.035
	max	0.021	0.027	0.045		0.058	0.055	0.067	0.033
3X	min	-0.057	-0.055	-0.077	-0.069	-0.094	-0.070	-0.087	-0.086
	max	0.061	0.060	0.099	0.068	0.094	0.067	0.158	0.105
3Y	min	-0.103	-0.091	-0.148	-0.106	-0.217	-0.189	-0.307	-0.267
	max	0.099	0.097	0.170	0.127	0.167	0.163	0.291	0.259
3Z	min	-0.023	-0.017	-0.022	-0.017	-0.031	-0.027	-0.040	
	max	0.020	0.020	0.037	0.026	0.027	0.025	0.067	0.065



Tabulka 9 - Hodnoty extrémů 40. – 60. minuta měření HZM

pozice	extrém	zrychlení [m/s ²]							
		čas [min]							
		21.-25.		26.-30.		31.-35.		36.-40.	
1X	min	-0.321	-0.265	-0.405	-0.321	-0.442	-0.387	-0.793	-0.119
	max	0.193	0.189	0.275	0.209	0.324	0.212	0.319	0.254
1Y	min	-0.466	-0.418	-0.449	-0.367	-0.230	-0.115	-0.183	-0.181
	max	0.298	0.281	0.361	0.242	0.172	0.169	0.239	0.211
1Z	min	-0.276	-0.191	-0.095		-0.330	-0.215	-0.044	-0.013
	max	0.129	0.120	0.104		0.200	0.149	0.023	0.010
2X	min	-0.103	-0.096	-0.112	-0.094	-0.102	-0.101	-0.112	
	max	0.088	0.084	0.141	0.138	0.092	0.068	0.098	0.097
2Y	min	-0.467	-0.443	-0.458	-0.393	-0.281	-0.271	-0.332	-0.308
	max	0.386	0.383	0.448	0.428	0.239	0.238	0.378	0.311
2Z	min	-0.064		-0.037	-0.035	0.038		-0.149	-0.090
	max	0.067		0.034	0.036	-0.042	-0.039	0.114	0.095
3X	min	-0.114	-0.099	-0.091	-0.089	-0.087		-0.072	-0.066
	max	0.081	0.081	0.080	0.073	0.077		0.071	0.068
3Y	min	-0.207	-0.129	-0.145	-0.145	-0.246	-0.234	-0.183	-0.174
	max	0.204	0.168	0.263	0.180	0.217	0.207	0.156	0.148
3Z	min	-0.036	-0.024	-0.058	-0.039	-0.032		-0.040	-0.031
	max	0.034	0.024	0.069		0.037		0.077	0.066
		čas [min]							
		41.-45.		46.-50.		51.-55.		56.-60.	
1X	min	-0.140		-0.069	-0.076	-0.254	-0.172	-0.167	
	max	0.256	0.204	0.101	0.075	0.260	0.202	0.149	0.088
1Y	min	-0.194	-0.190	-0.223	-0.212	-0.381	-0.182	-0.645	-0.244
	max	0.231		0.186	0.141	0.163	0.162	0.472	0.367
1Z	min	-0.019		-0.322		-0.323		-0.231	-0.149
	max	0.021		0.222	0.098	0.176	0.167	0.166	0.098
2X	min	-0.209	-0.192	-0.216	-0.170	-0.316	-0.188	-0.092	-0.091
	max	0.103	0.101	0.121	0.118	0.224	0.202	0.219	0.118
2Y	min	-0.976	-0.685	-0.271	-0.235	-0.678	-0.537	-0.288	-0.271
	max	0.684	0.531	0.244	0.232	0.657	0.637	0.432	0.236
2Z	min	-0.139	-0.136	-0.096	-0.088	-0.187	-0.070	-0.061	-0.055
	max	0.133	0.120	0.080	0.047	0.099	0.081	0.057	0.055
3X	min	-0.222	-0.126	-0.102	-0.079	-0.178	-0.165	-0.129	-0.096
	max	0.195	0.117	0.110	0.097	0.198	0.145	0.152	0.118
3Y	min	-0.164	-0.146	-0.117	-0.116	-0.196	-0.176	-0.154	-0.130
	max	0.151	0.149	0.190	0.160	0.213	0.199	0.148	0.129
3Z	min	-0.089	-0.062	-0.045	-0.034	-0.039	-0.020	-0.037	-0.026
	max	0.049	0.040	0.031		0.051	0.044	0.027	0.026



Tabulka 10 - Hodnoty extrémů 1. – 40. minuta měření HZZ

pozice	extrém	zrychlení [m/s ²]							
		čas [min]							
		1.-5.		6.-10.		11.-15.		16.-20.	
1X	min	-0.065	-0.036	-0.118	-0.063	-0.088	-0.073	-0.197	-0.180
	max	0.093	0.082	0.117	0.105	0.136	0.126	0.152	0.138
1Y	min	-0.115	-0.085	-0.145	-0.126	-0.170	-0.158	-0.167	-0.145
	max	0.174	0.096	0.176	0.116	0.243	0.195	0.153	0.144
1Z	min	-0.018	-0.017	-0.031	-0.026	-0.070	-0.067	-0.058	-0.056
	max	0.019	0.017	0.025	0.023	0.126	0.121	0.086	0.037
2X	min	-0.056	-0.056	-0.131	-0.122	-0.118	-0.065	-0.068	
	max	0.051	0.048	0.114	0.105	0.111	0.091	0.142	
2Y	min	-0.252	-0.233	-0.395	-0.307	-0.258	-0.215	-0.339	-0.299
	max	0.274	0.247	0.310	0.308	0.232	0.229	0.322	0.222
2Z	min	-0.024	-0.023	-0.040	-0.038	-0.044	-0.043	-0.060	-0.049
	max	0.027	0.026	0.037	0.032	0.038	0.035	0.041	0.041
3X	min	-0.057	-0.056	-0.114	-0.070	-0.126	-0.087	-0.063	
	max	0.052	0.052	0.115	0.083	0.121	0.077	0.078	0.074
3Y	min	-0.183	-0.149	-0.276	-0.242	-0.125	-0.124	-0.133	-0.129
	max	0.131	0.121	0.348	0.266	0.162	0.150	0.141	0.121
3Z	min	-0.071	-0.066	-0.079	-0.061	-0.032	-0.030	-0.059	
	max	0.048	0.045	-0.061	-0.039	0.022	0.021	0.032	
		čas [min]							
		21.-25.		26.-30.		31.-35.		36.-40.	
1X	min	-0.075	-0.068	-0.176	-0.080	-0.242	-0.124	-0.223	-0.192
	max	0.072	0.070	0.075	0.062	0.159	0.120	0.241	0.228
1Y	min	-0.116	-0.113	-0.140	-0.128	-0.522	-0.414	-0.752	-0.629
	max	0.146	0.137	0.132	0.109	0.403	0.379	0.849	0.819
1Z	min	-0.090	-0.070	-0.030	-0.027	-0.115	-0.091	-0.061	-0.061
	max	0.106	0.095	0.029	0.021	0.103	0.061	0.073	0.069
2X	min	-0.063	-0.060	-0.089	-0.084	-0.110	-0.106	-0.235	-0.174
	max	0.071	0.067	0.080	0.072	0.279	0.142	0.222	0.206
2Y	min	-0.198	-0.174	-0.285	-0.246	-1.268	-0.599	-0.899	-0.821
	max	0.182	0.179	0.271	0.254	0.853	0.793	0.793	0.745
2Z	min	-0.037	-0.036	-0.032	-0.028	-0.310	-0.093	-0.119	-0.012
	max	0.027	0.027	0.029	0.026	0.277	0.069	0.093	0.091
3X	min	-0.071	-0.071	-0.081	-0.075	-0.240	-0.170	-0.212	-0.210
	max	0.078	0.069	0.086	0.074	0.247	0.119	0.326	0.320
3Y	min	-0.165	-0.156	-0.156	-0.137	-0.326	-0.314	-1.194	-0.773
	max	0.159	0.141	0.118	0.109	0.443	0.390	0.730	0.619
3Z	min	-0.067	-0.053	-0.044	-0.039	-0.069	-0.057	-0.088	-0.067
	max	0.043	0.043	0.034	0.025	0.046	0.044	0.104	0.070



Tabulka 11 - Hodnoty extrémů 41. – 60. minuta měření HZZ

pozice	extrém	zrychlení [m/s ²]							
		čas [min]							
		41.-45.		46.-50.		51.-55.		56.-60.	
1X	min	-0.090	-0.087	-0.191		-0.070		-0.067	-0.063
	max	0.123	0.121	0.149		0.055		0.052	0.051
1Y	min	-0.357	-0.318	-0.198	-0.189	-0.149	-0.138	-0.146	-0.129
	max	0.357	0.317	0.239	0.194	0.142	0.131	0.155	0.151
1Z	min	-0.055		-0.026		-0.049		-0.087	-0.061
	max	0.039		0.016		0.046	0.045	0.100	
2X	min	-0.091	-0.086	-0.073	-0.068	-0.076	-0.066	-0.060	
	max	0.103	0.062	0.092	0.088	0.099	0.086	0.060	0.058
2Y	min	-0.362	-0.331	-0.334	-0.308	-0.468	-0.338	-0.443	-0.263
	max	0.409	0.348	0.480	0.288	0.428	0.395	0.263	0.225
2Z	min	-0.054	-0.053	-0.044	-0.042	-0.144	-0.072	-0.057	-0.053
	max	0.057	0.040	0.060	0.052	0.116	0.069	0.034	0.030
3X	min	-0.084	-0.083	-0.072	-0.070	-0.081	-0.071	-0.066	-0.065
	max	0.173	0.100	0.083	0.070	0.106	0.065	0.055	0.053
3Y	min	-0.238	-0.241	-0.327	-0.183	-0.148	-0.132	-0.151	-0.111
	max	0.356	0.234	0.173	0.170	0.160	0.160	0.125	0.122
3Z	min	-0.031		-0.064		-0.046		-0.032	-0.031
	max	0.040		0.041		0.048		0.025	0.023

Tabulka 12 - Extrémy z celého měření

pozice	extrém	zrychlení [m/s ²]
1X	min	-0.793463
	max	0.323524
1Y	min	-0.752
	max	0.849
1Z	min	-0.330134
	max	0.22245
2X	min	-0.316481
	max	0.279
2Y	min	-1.268
	max	0.853
2Z	min	-0.310
	max	0.277
3X	min	-0.240
	max	0.326
3Y	min	-1.194
	max	0.730
3Z	min	-0.089086
	max	0.104



Pro každý snímač byl vyhodnocen jeden extrém minima a maxima z celých dvaceti čtyř měření, výsledky jsou uvedeny v tabulce 12.

Obecně nejvyšších hodnot nabývaly extrémy ve směru Y, už v předchozí části práce jsme dospěli k závěru, že konstrukce je ve směru Y poddajnější než ve zbylých dvou směrech. Extrémy v Z-ovém směru jsou obecně nejmenší, což také odpovídá závěrům v předchozí části práce.

Největší extrémy zrychlení pak byly naměřeny snímačem v poloze 2Y, který byl umístěn uprostřed horizontály a nikoli na sloupku, nebo v blízkosti sloupku. Byla proto provedena FFT na několik úseků záznamu, kde hodnoty v 2Y nabývají vysokých hodnot. Nabízelo se lokální kmitání prvku. Po aplikaci FFT se pak nejvyšší špička pohybovala od 41 do 43 Hz. Pro ověření, zda by to mohla být vlastní frekvence daného prvku, jsem zkusil použít jednoduchý vzorec pro výpočet první vlastní frekvence:

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\left(\frac{EI}{\mu}\right)}$$

kde f ... vlastní frekvence [Hz]

π ... Ludolfovo číslo (3,1415...)

l ... délka horizontály (2 m)

E ... modul pružnosti (210 GPa)

I ... moment setrvačnosti (15,95 cm⁴ [Peri spol. s.r.o.]

μ ... hmotnost běžného metru (3 kg/m)

Po dosazení:

$$f = \frac{\pi}{2 \cdot 2^2} \sqrt{\left(\frac{2.1E+11 \cdot 1.595E-07}{3}\right)} = 41,494 \text{ Hz}$$

I z tohoto jednoduchého vzorce, kdy jsme zanedbali určité vstupy, je jasné, že to je lokální kmitání, pouze tohoto prvku.

7.2.3. Zajímavé situace, či situace, které mohli mít vliv na komfort diváků

V této kapitole budou uvedeny zajímavé situace, které nastaly během závodu (např. poslední střelba vítězné české reprezentantky Gabriely Koukalové). V kapitole jsou uvedena extrémní zrychlení, vyhodnocená ze záznamů pohupování a potlesku.



K těmto situacím jsou uvedeny i hodnoty RMS z 10 sekund záznamu. Výsledky ze snímače 2Y a 2Z je potřeba brát s rezervou vzhledem k jejich umístění (viz obr. 25).

První uvedenou situací je pohupování. Jsou uvedeny pouze dva příklady, kdy bylo dosaženo nejvyšších RMS hodnot.

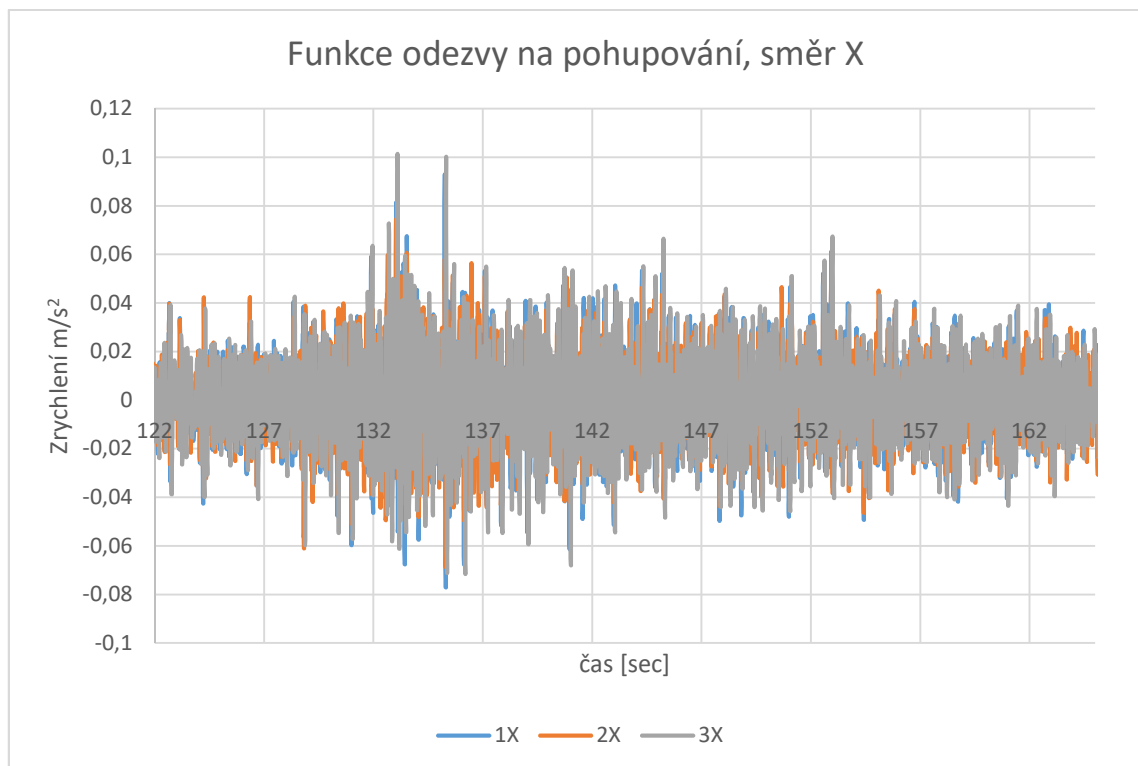
Pohupování, hodnoty v m/s^2									
	1X	1Y	1Z	2X	2Y	2Z	3X	3Y	3Z
min	-0.0858	-0.2552	-0.0406	-0.0666	-0.4145	-0.042	-0.0563	-0.1887	-0.0311
max	0.0876	0.1403	0.0256	0.1258	0.3232	0.0548	0.0943	0.1319	0.0224
RMS	0.0219	0.0434	0.0069	0.0194	0.0675	0.0122	0.0192	0.0377	0.0037

Tabulka 13- Zrychlení a hodnoty RMS během pohupování (a)

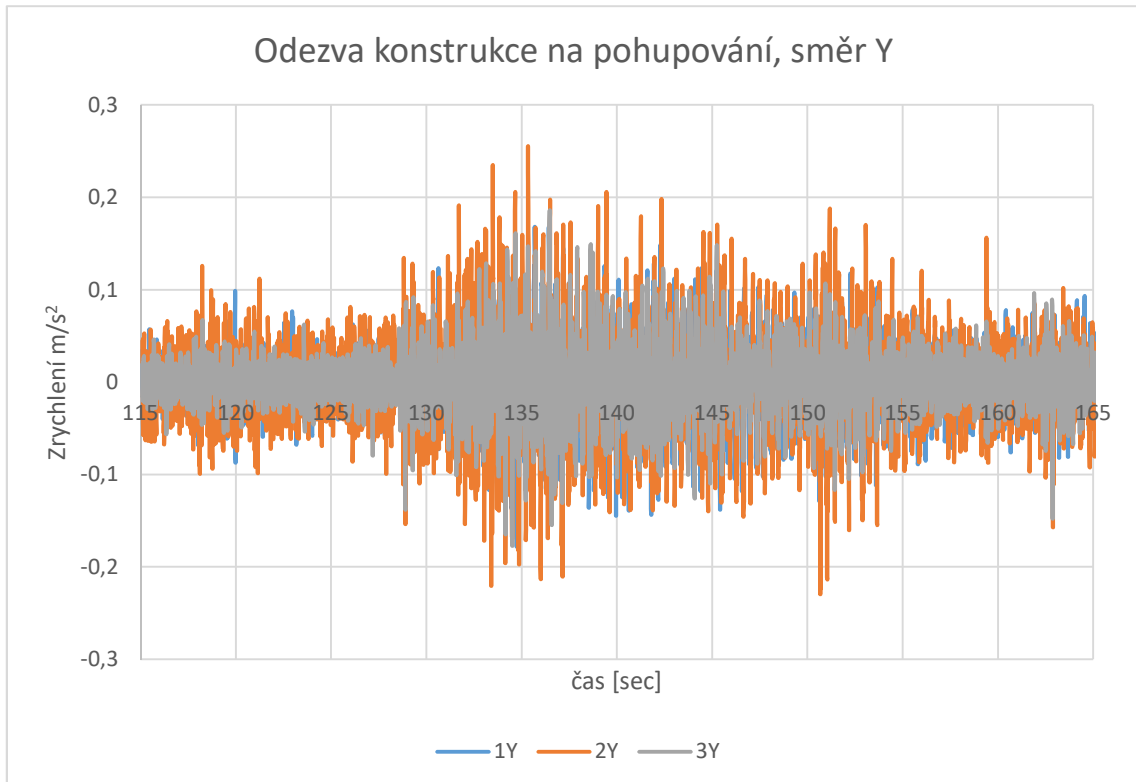
Pohupování, hodnoty v m/s^2									
	1X	1Y	1Z	2X	2Y	2Z	3X	3Y	3Z
min	-0.0771	-0.1783	-0.0151	-0.0686	-0.2294	-0.0644	-0.0716	-0.1773	-0.0312
max	0.093	0.168	0.0197	0.0745	0.2552	0.0412	0.1014	0.1858	0.0231
RMS	0.0211	0.0531	0.0045	0.0192	0.0685	0.0092	0.0224	0.0515	0.0073

Tabulka 14 - Zrychlení a hodnoty RMS během pohupování (b)

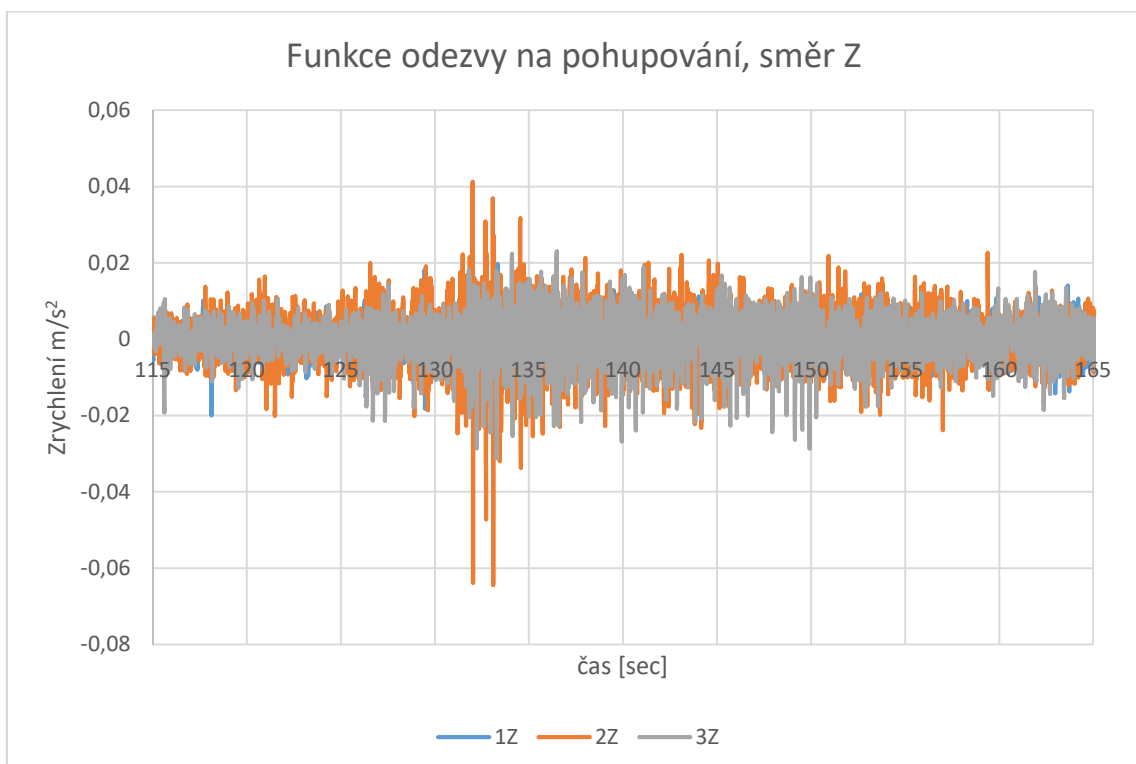
Charakter funkce odezvy od pohupování viz obr. 57.



Obrázek 57 - Funkce odezvy na pohupování, ve směru osy X



Obrázek 58 - Funkce odezvy na pohupování, ve směru osy Y

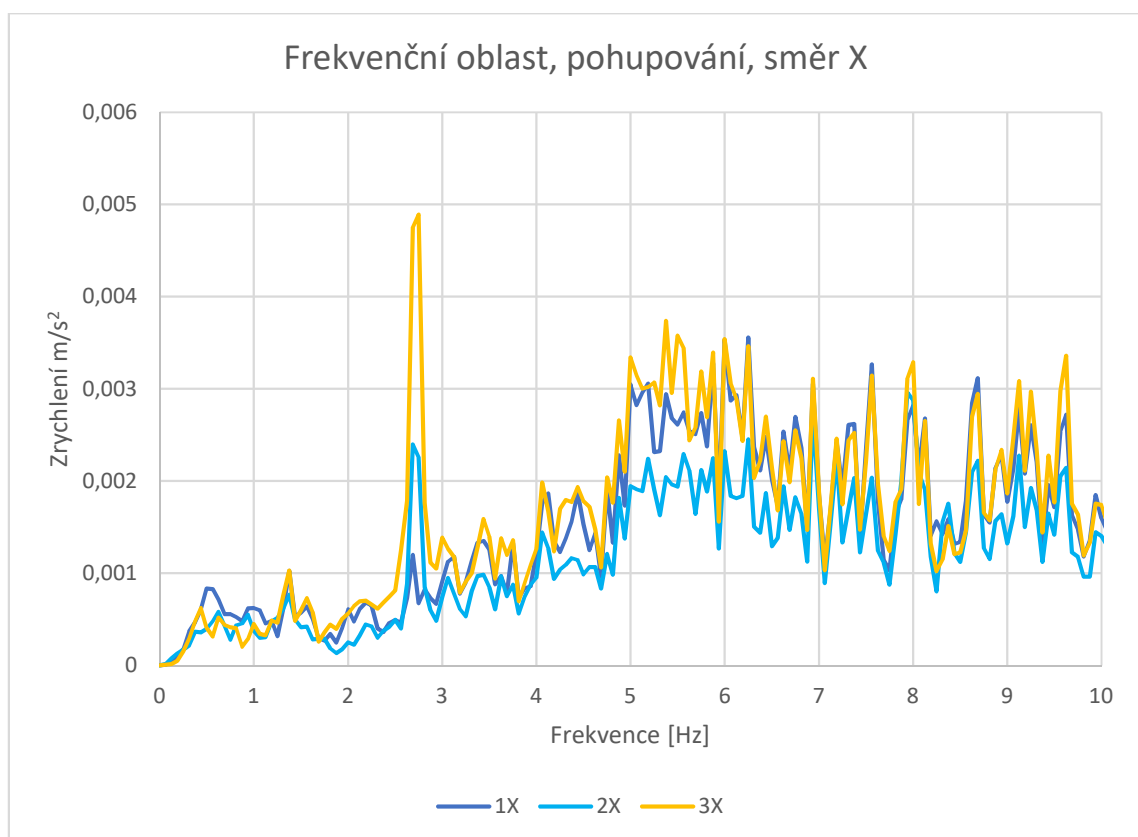


Obrázek 59 - Funkce odezvy na pohupování, ve směru osy Z

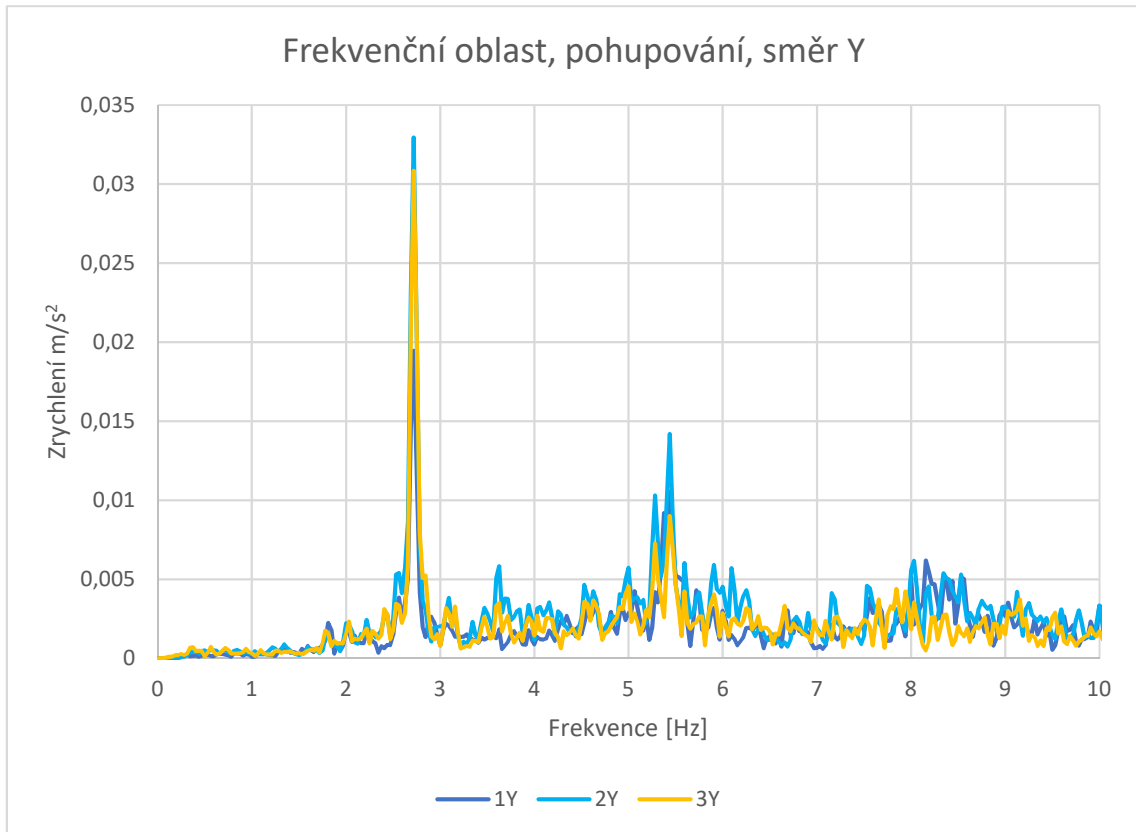
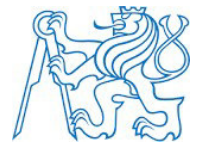


Z grafu je vidět, že průběh extrémních zrychlení se v čase mění, na začátku pohupování zrychlení rostou s přírůstajícím počtem aktivně zapojených diváků. Procento aktivních diváků se v čase mění a extrémní zrychlení klesají a opět stoupají. RMS hodnoty nepřesahují žádná komfortní kritéria.

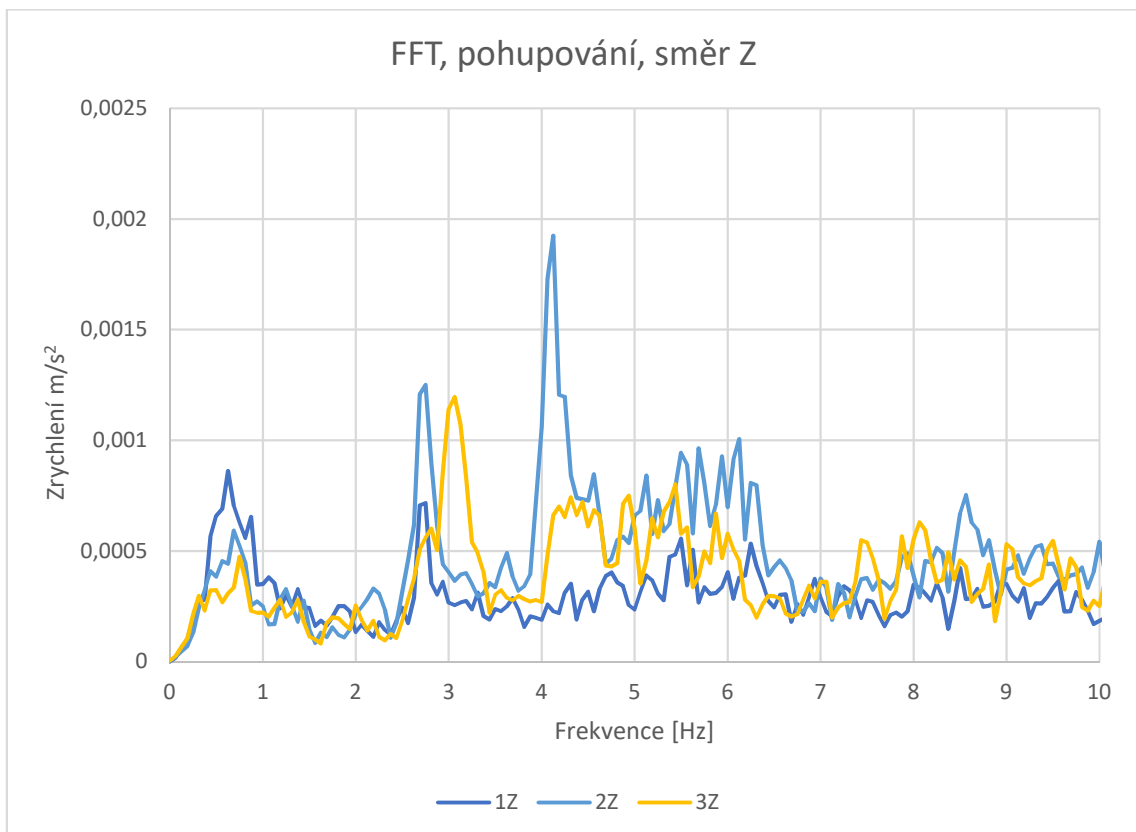
Záznam od pohupování byl převeden z časové oblasti do oblasti frekvenční. Nejvýraznější špička ve směru X je potom na 2,69 Hz, ve směru Y je také špička na 2,69 Hz a ve směru osy Z žádná výrazná špička není. Dále jsem uvedl grafy frekvenční oblasti, jsou pouze do 10 Hz, jelikož vyšší frekvence již nemají vliv na komfort diváků.



Obrázek 60 - Frekvenční oblast z pohupování, ve směru osy X



Obrázek 61 - Frekvenční oblast z pohupování, ve směru osy Y



Obrázek 62 - Frekvenční oblast z pohupování, ve směru osy Z

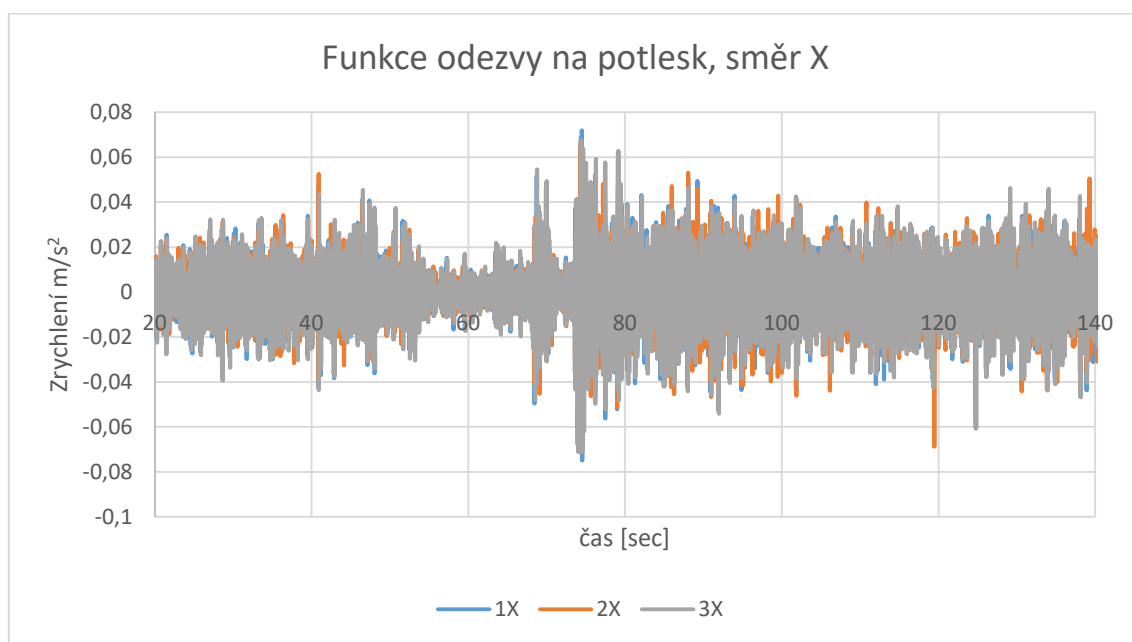


Další uvedenou situací je potlesk. Jsou uvedeny pouze tři příklady, kdy bylo dosaženo nejvyšších RMS hodnot. Z předchozích grafů je jasně vidět, že ve směru Z jsou minimální zrychlení, proto jsou uváděny grafy již jen ve směru X a Y.

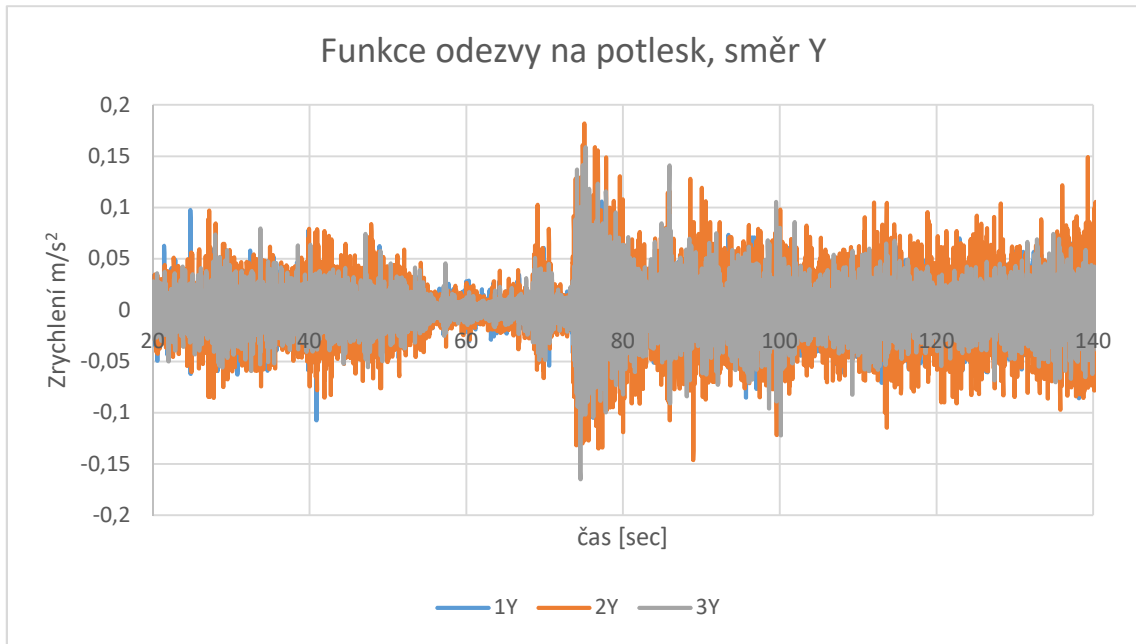
Prvním příkladem je střelba české reprezentantky

Tabulka 15 - Zrychlení a hodnoty RMS během potlesku po střelbě

otlesk po střelbě, hodnoty v m/s^2									
	1X	1Y	1Z	2X	2Y	2Z	3X	3Y	3Z
min	-0.0749	-0.1048	-0.0185	-0.0604	-0.1461	-0.0245	-0.0712	-0.1649	-0.0344
max	0.0719	0.1368	0.0153	0.0688	0.1819	0.0235	0.0676	0.1587	0.017
RMS	0.0190	0.0325	0.0041	0.0164	0.0445	0.0052	0.0199	0.0375	0.0053



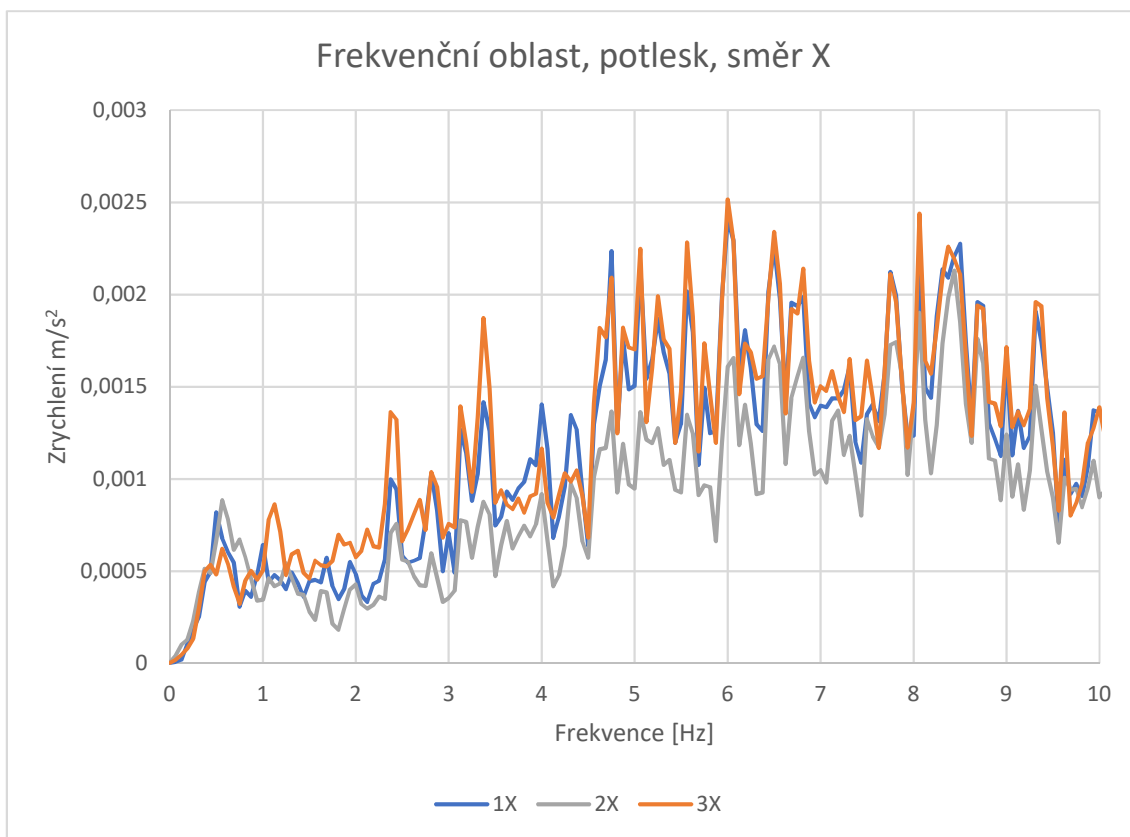
Obrázek 63 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy X



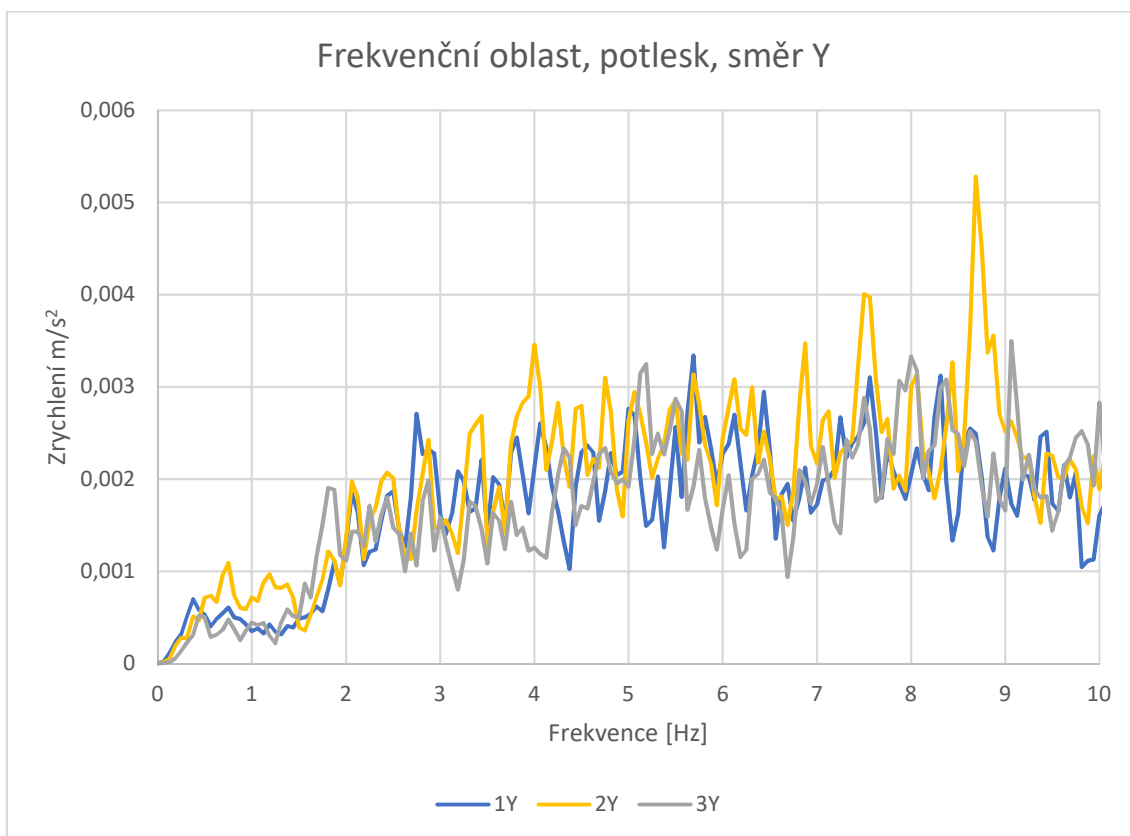
Obrázek 64 - - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy Y

Na grafech je hezky vidět, jak se uklidňuje potlesk, který nastává během příjezdu závodníku k místě střelnice a dav se zklidní. V tomto stavu setrvává během střelby, pouze po úspěšném výstřelu dav jednorázově zajásá, což se také ukazuje na grafech odezvy. Po takovéto úspěšné střelbě se strhne obrovský potlesk, do kterého se zapojuje 95-100% diváků. U této konstrukce však RMS hodnoty nepřesahují žádných mezí pro kritérium komfortu.

Záznam odezvy z potlesku diváků byl převeden z časové oblasti do oblasti frekvenční. Nejvýraznější špička ve směru X je potom na 2,69 Hz, ve směru Y žádná výrazná špička není. Dále jsem uvedl grafy frekvenční oblasti, jsou pouze do 10 Hz, jelikož vyšší frekvence již nemají vliv na komfort diváků.



Obrázek 65 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy X



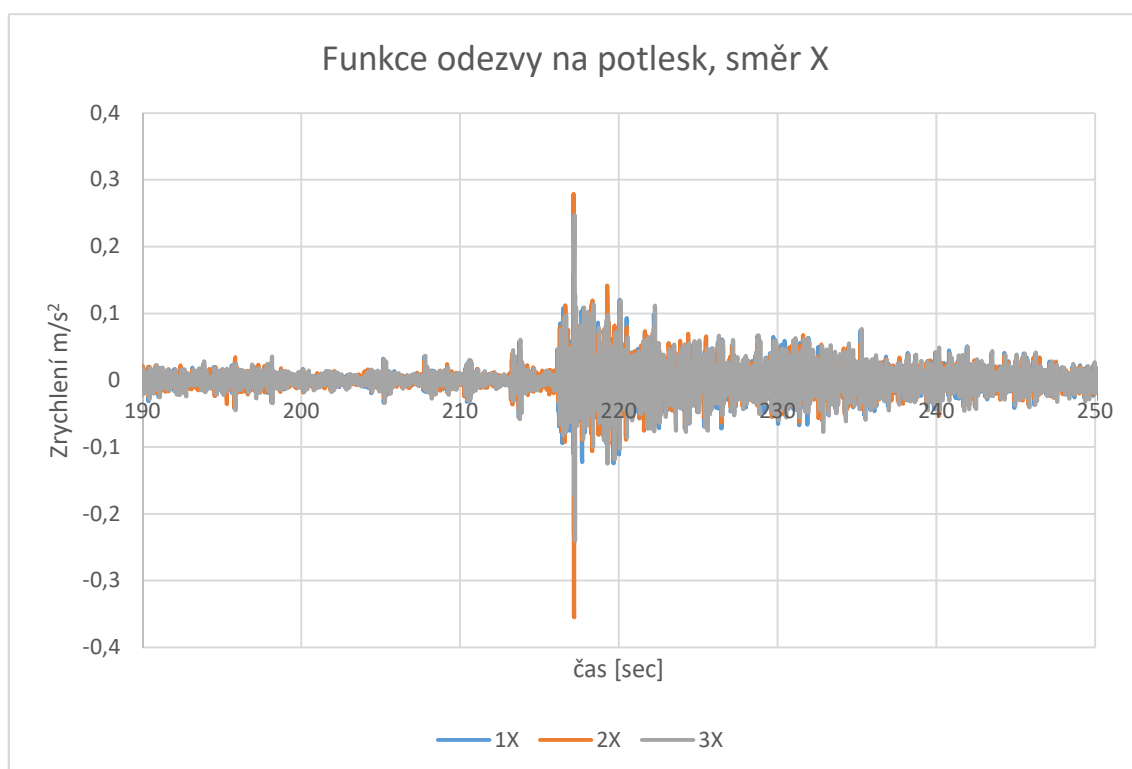
Obrázek 66 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy Y



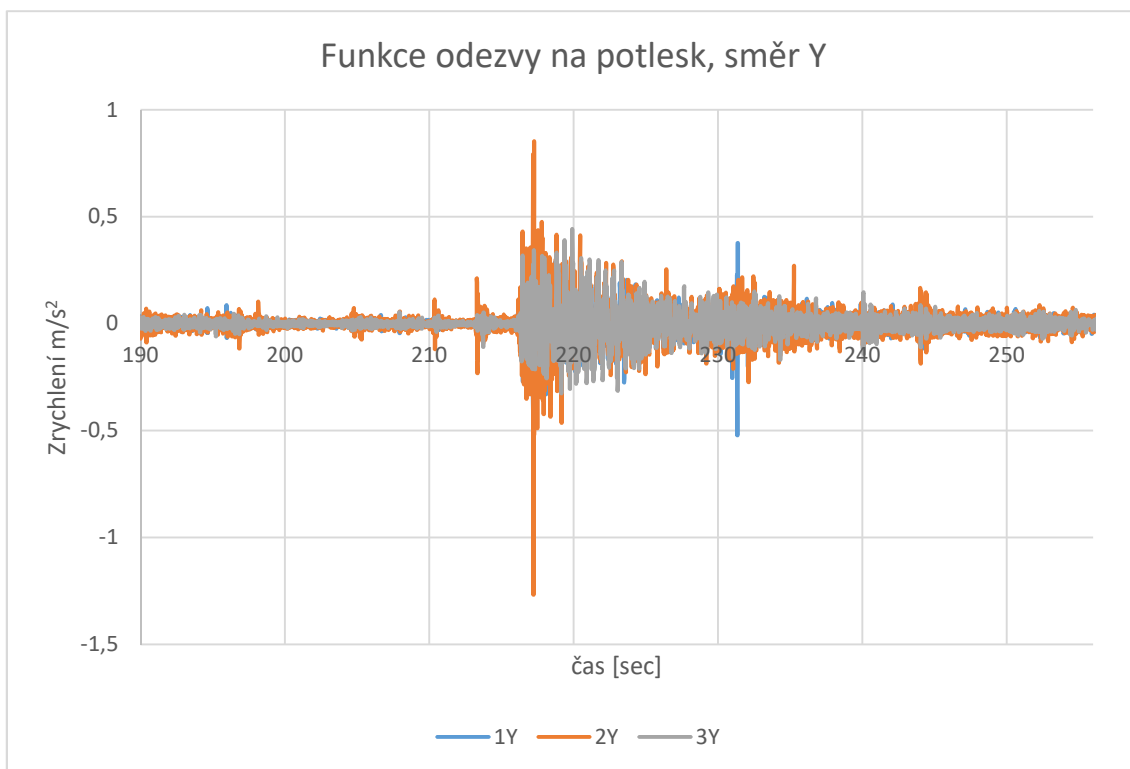
Další situace je potlesk po předposlední střelbě Gabriely Koukalové.

Tabulka 16 - Zrychlení a hodnoty RMS během potlesku po střelbě

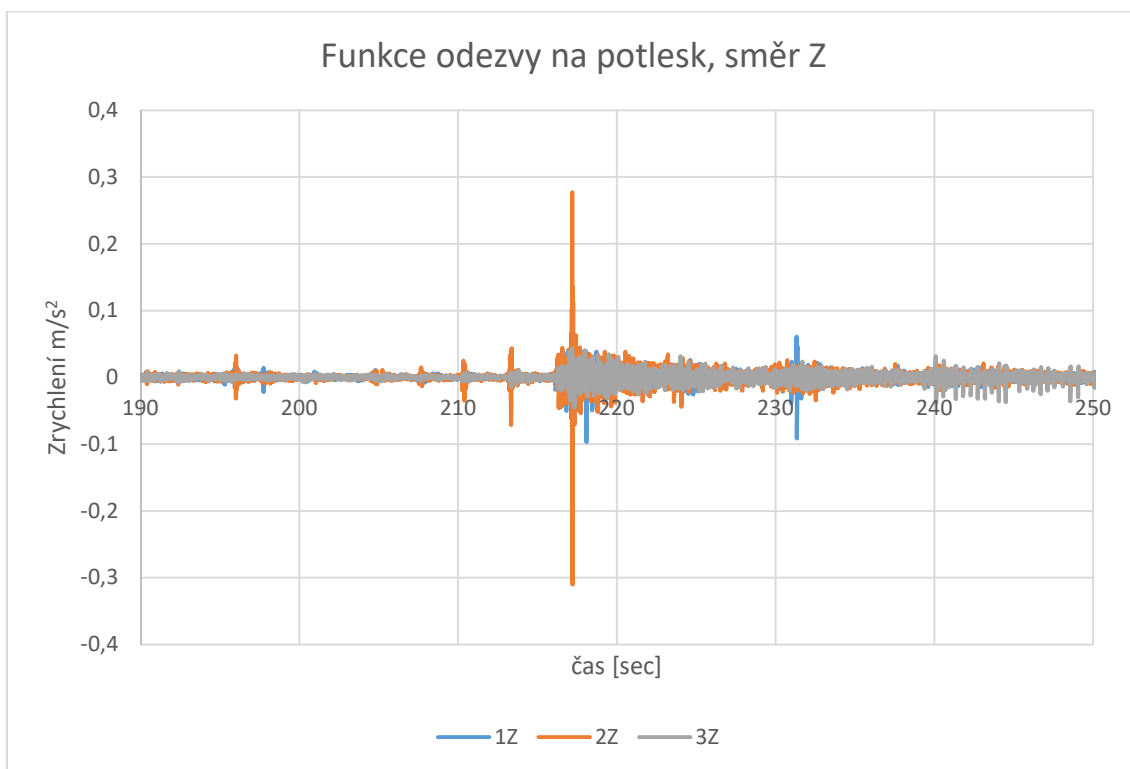
Po střelbě, hodnoty v m/s^2									
	1X	1Y	1Z	2X	2Y	2Z	3X	3Y	3Z
min	-0.2422	-0.5217	-0.1154	-0.3546	-1.2677	-0.3096	-0.2396	-0.326	-0.0452
max	0.1592	0.43	0.1029	0.2788	0.8534	0.2769	0.1592	0.4431	0.0436
RMS	0.0380	0.0954	0.0145	0.0370	0.1409	0.0204	0.039	0.1166	0.0105



Obrázek 67 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy X



Obrázek 68 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy Y

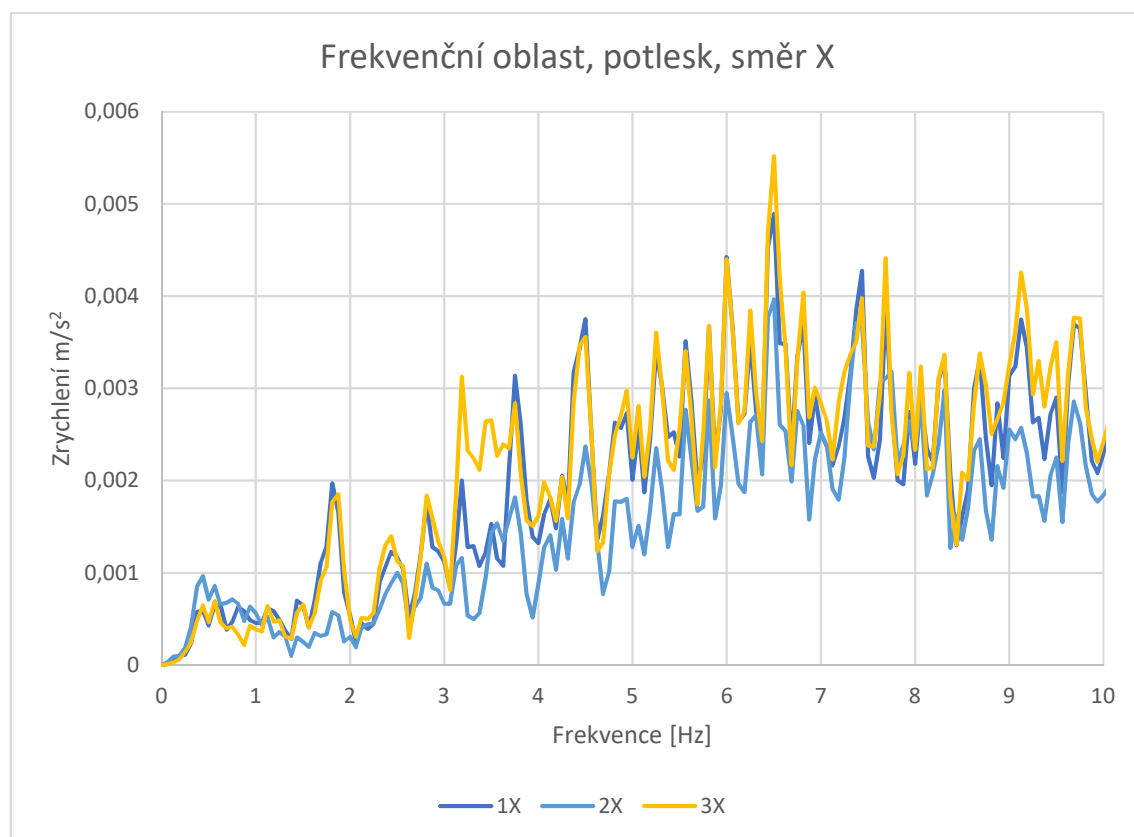


Obrázek 69 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy Z

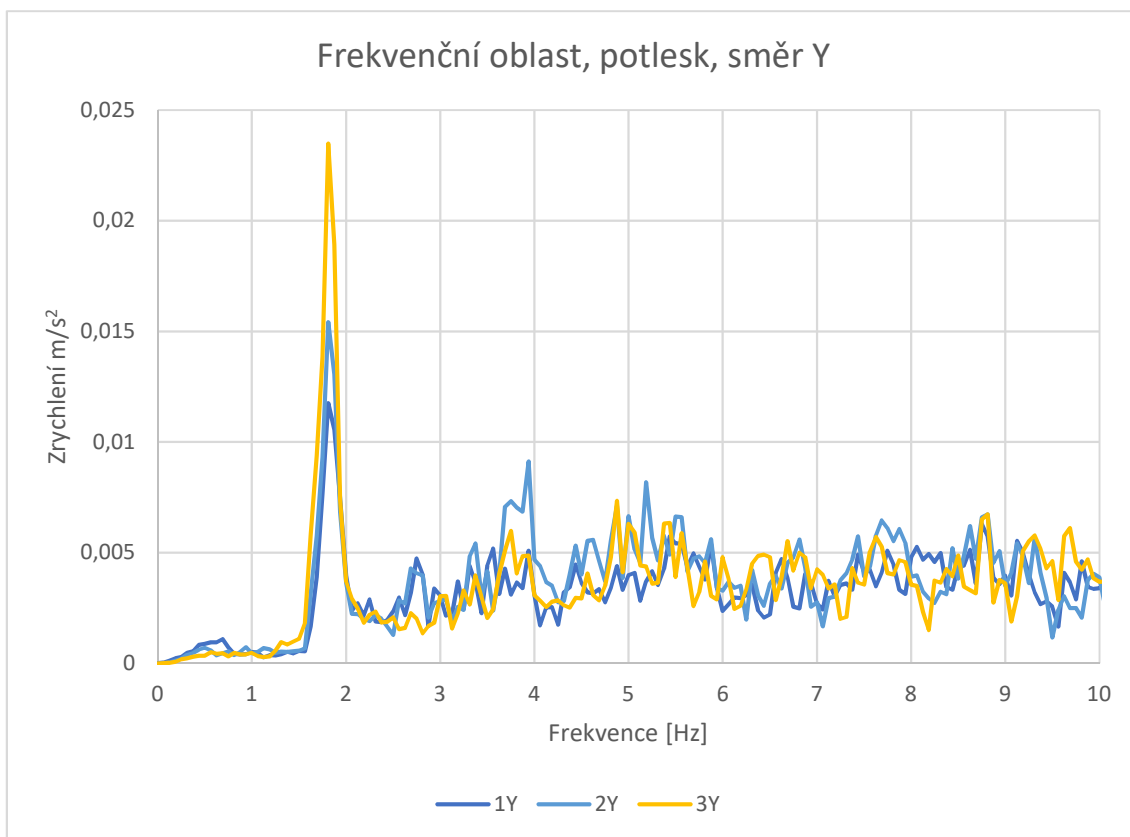


Diváci před střelbou ani tolik neskandují, dá se tedy říct, že zklidnění nenastává, ale po střelbě přichází nával burácení. Hodnoty RMS nepřesahují žádných mezí pro kritérium komfortu.

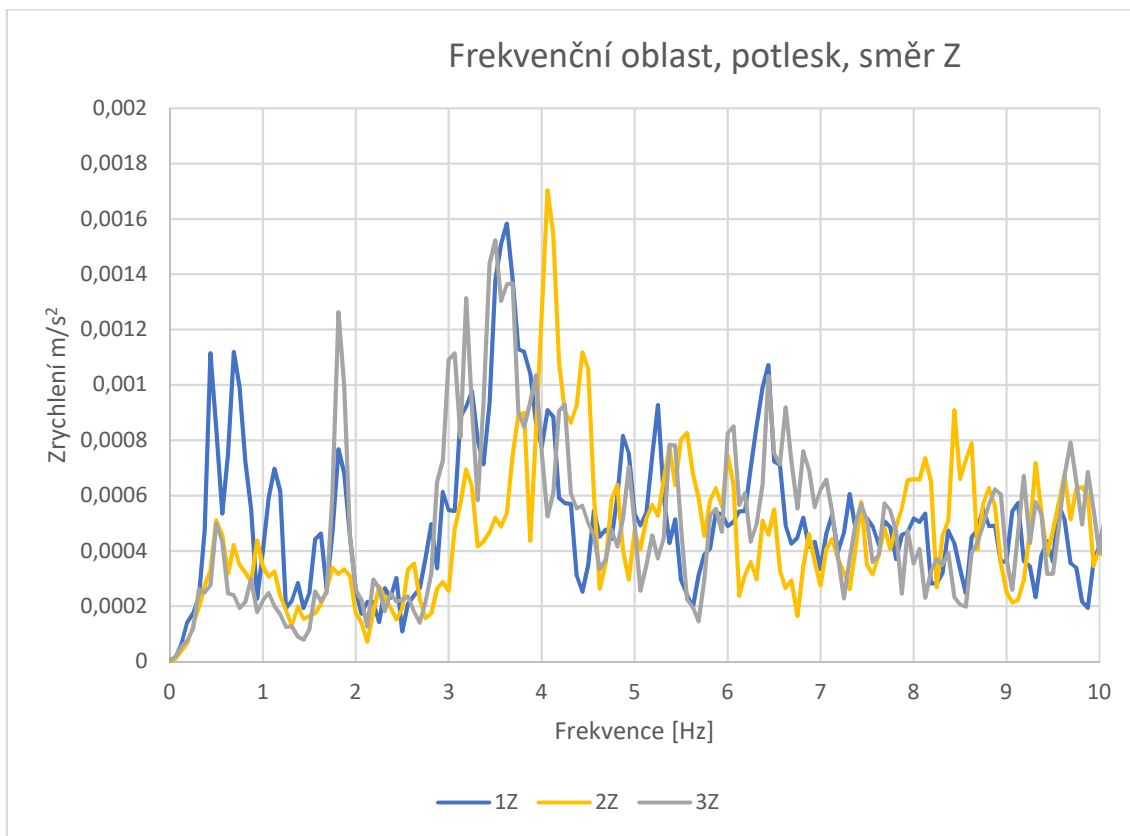
Záznam odezvy z potlesku diváků byl převeden z časové oblasti do oblasti frekvenční. Ve směru X, Y i Z se objevuje špička na frekvenci 1,8125 Hz. Dále jsem uvedl grafy frekvenční oblasti, jsou pouze do 10 Hz, jelikož vyšší frekvence již nemají vliv na komfort diváků.



Obrázek 70 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy X



Obrázek 71 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy Y



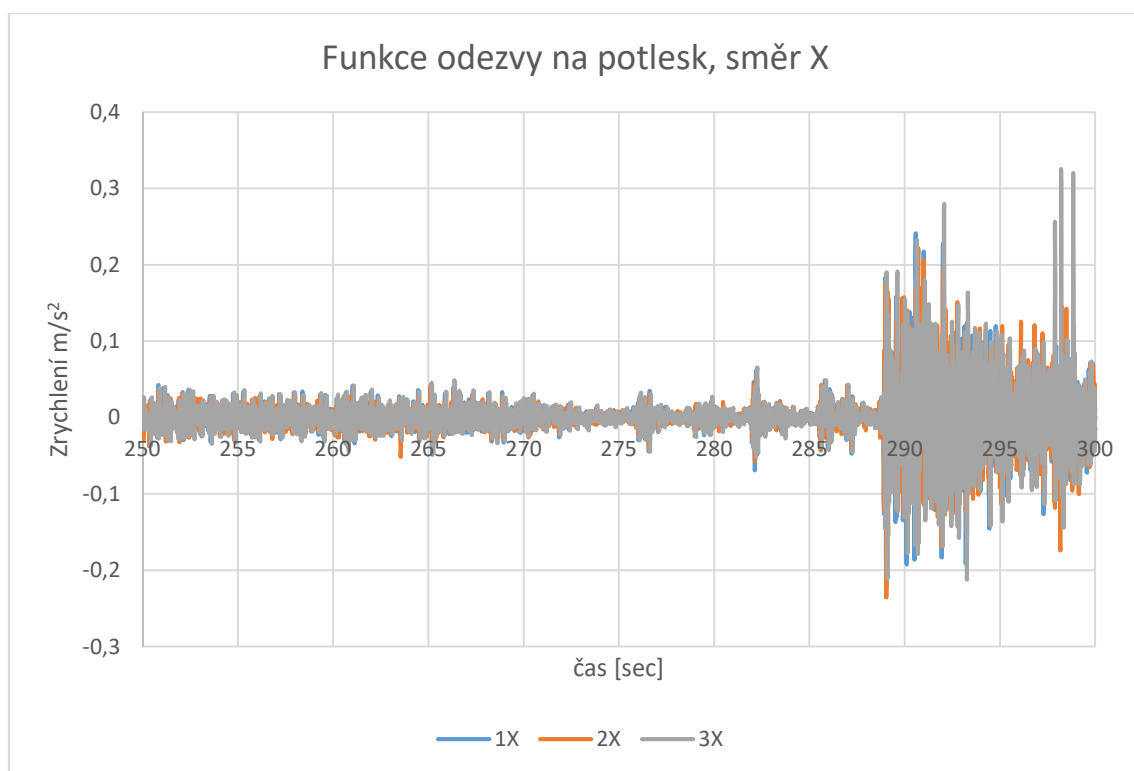
Obrázek 72 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy Z



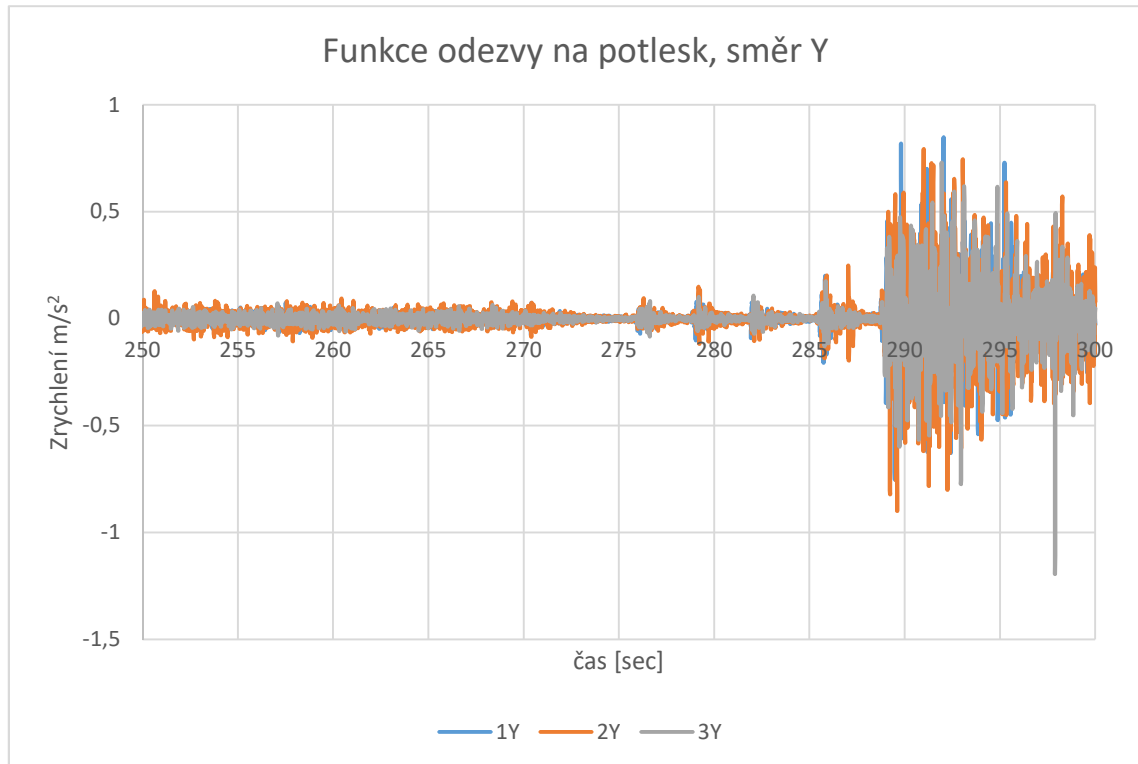
Posledním příkladem potlesku je potlesk po poslední střelbě vítězky závodu Gabriely Koukalové (c).

Poslední střelba, hodnoty v m/s^2									
	1X	1Y	1Z	2X	2Y	2Z	3X	3Y	3Z
min	-0.223	-0.7523	-0.0605	-0.2355	-0.899	-0.1192	-0.212	-1.1945	-0.088
max	0.2411	0.8487	-0.0608	0.2216	0.7927	0.0914	0.3256	0.732	0.104
RMS	0.0576	0.1788	0.0178	0.0549	0.2154	0.0288	0.0631	0.1925	0.0230

Tabulka 17 - Zrychlení a hodnoty RMS během potlesku po střelbě (c)



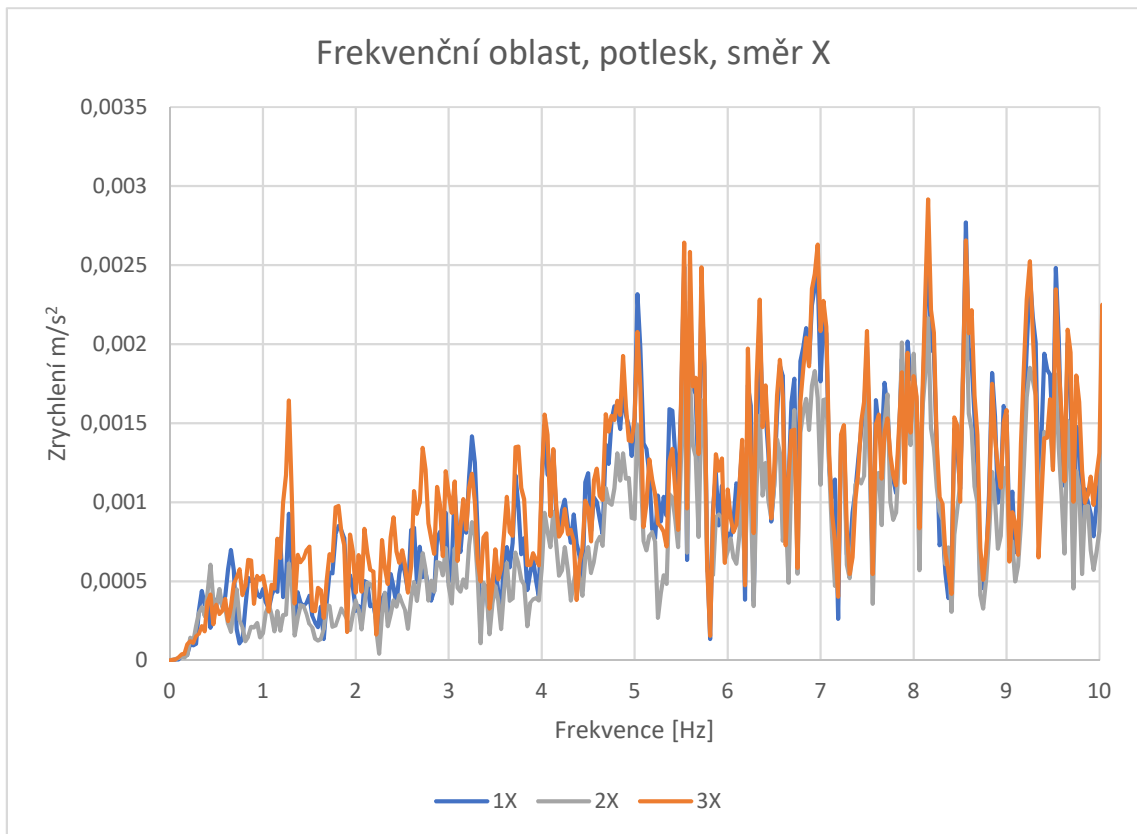
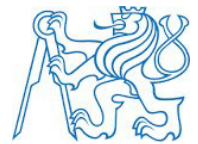
Obrázek 73 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy X



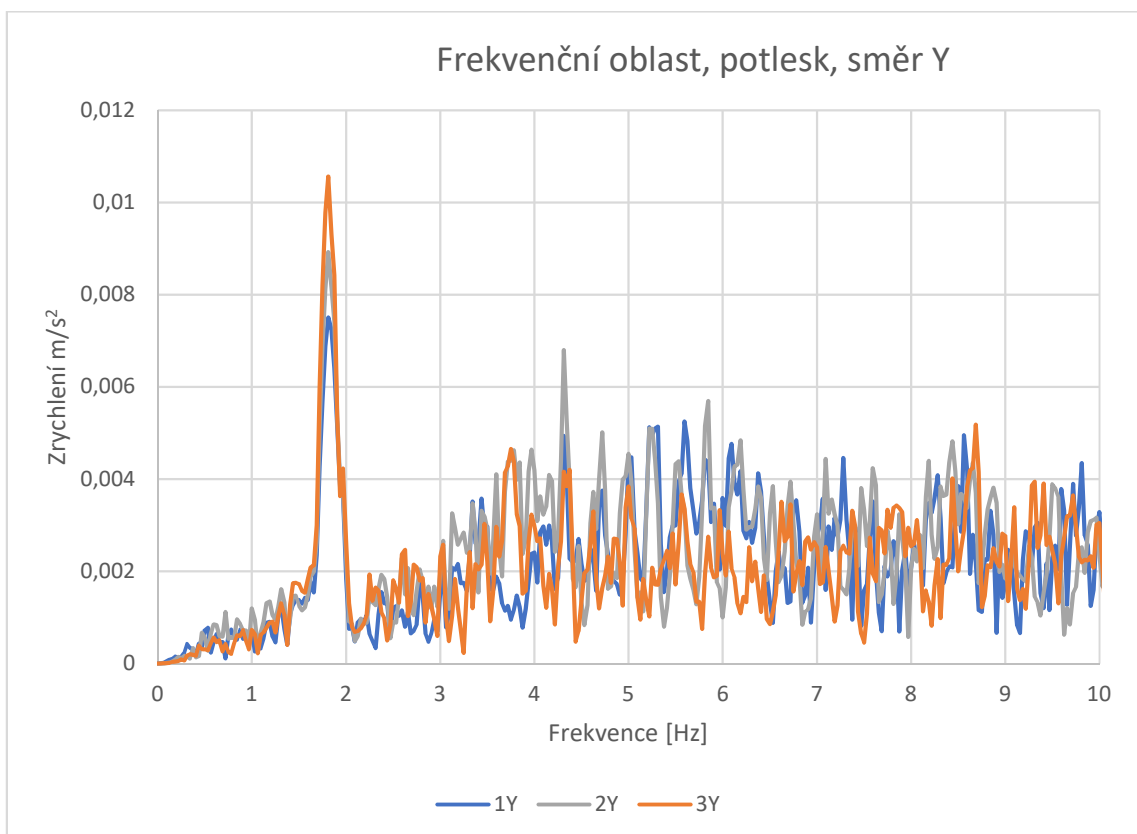
Obrázek 74 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy Y

Odezva diváků na potlesk po střelbě má stejný charakter u všech příkladů, u střelby neúspěšné, nebo u střelby ze začátku závodu je hlavní rozdíl v tom, že se dav nezklidní tolik, jako u těchto příkladů. Hodnoty RMS nepřesahují žádných mezí pro kritérium komfortu.

Záznam odezvy z potlesku diváků byl převeden z časové oblasti do oblasti frekvenční. Ve směru X se objevuje špička na frekvenci 1,8125 Hz, ve směru Y je tato frekvence také, kromě snímače 2Y. Dále jsem uvedl grafy frekvenční oblasti, jsou pouze do 10 Hz, jelikož vyšší frekvence již nemají vliv na komfort diváků.



Obrázek 75 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy X



Obrázek 76 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy Y



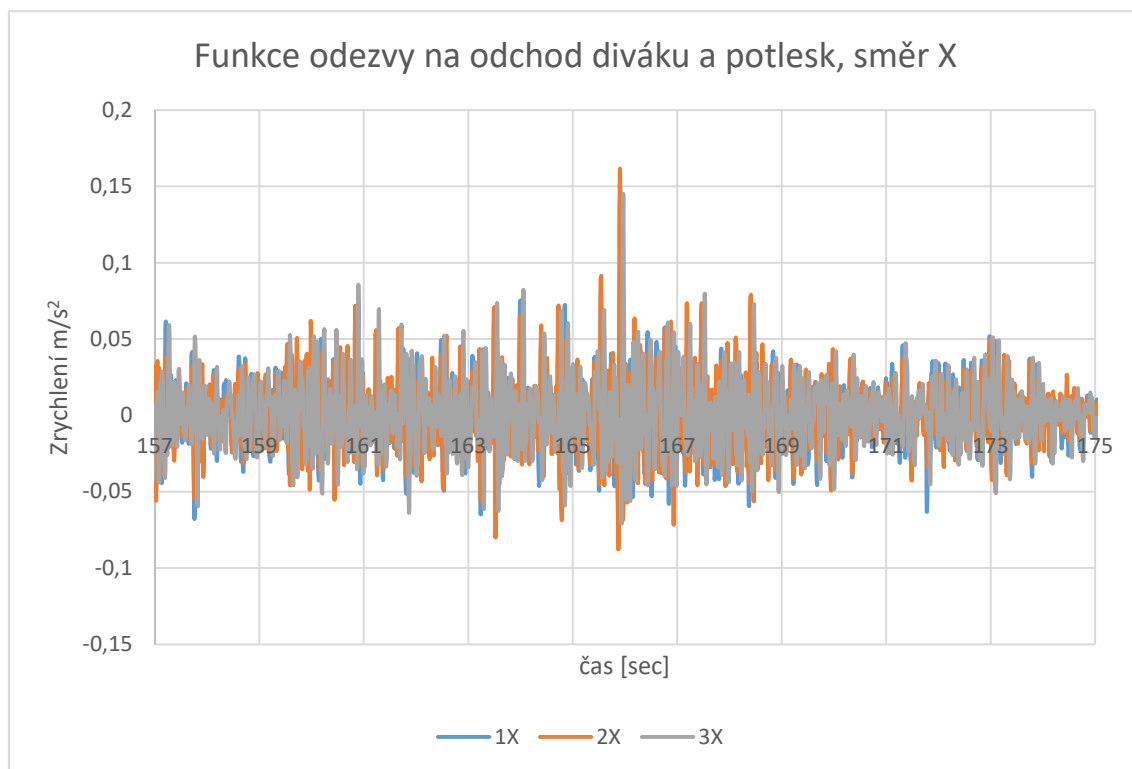
Ještě uvádím dva příklady chůze po tribuně s občasným potleskem. Grafy jsou pro druhou tabulku.

Tabulka 18 - Zrychlení a hodnoty RMS během odchodu z tribuny + potlesk

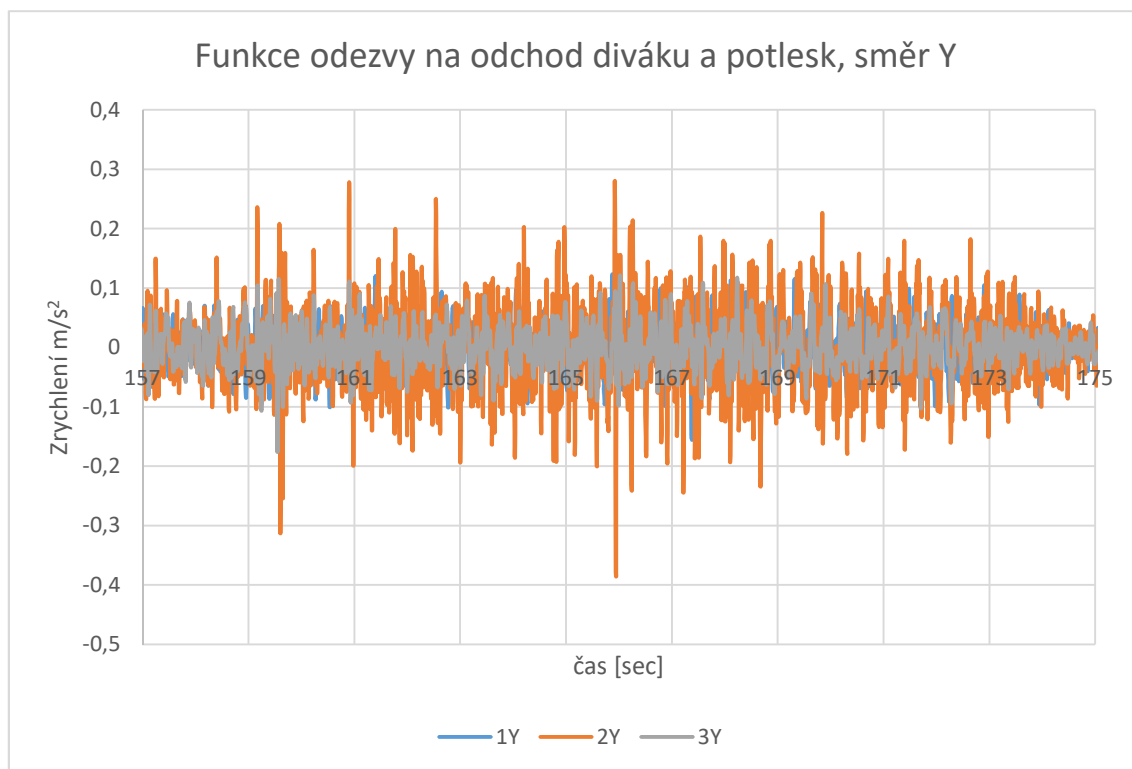
Odchod z tribuny + potlesk, hodnoty v m/s^2									
	1X	1Y	1Z	2X	2Y	2Z	3X	3Y	3Z
min	-0.0661	-0.1827	-0.0398	-0.0715	-0.0308	-0.149	-0.0646	-0.1827	-0.0405
max	0.0602	0.2387	0.0355	0.0975	0.3781	0.1303	0.0706	0.2151	0.0766
RMS	0.0196	0.0450	0.0057	0.0191	0.0638	0.0170	0.0201	0.0422	0.0067

Tabulka 19 - Zrychlení a hodnoty RMS během odchodu z tribuny + potlesk (b)

Odchod z tribuny + potlesk, hodnoty v m/s^2									
	1X	1Y	1Z	2X	2Y	2Z	3X	3Y	3Z
min	-0.0688	-0.1555	-0.0254	-0.0876	-0.3856	-0.0376	-0.0707	-0.1761	-0.017
max	0.1519	0.1234	0.0198	0.1614	0.2804	0.0459	0.1451	0.1214	0.0295
RMS	0.0243	0.0378	0.0059	0.0234	0.0718	0.0090	0.0244	0.0352	0.0051

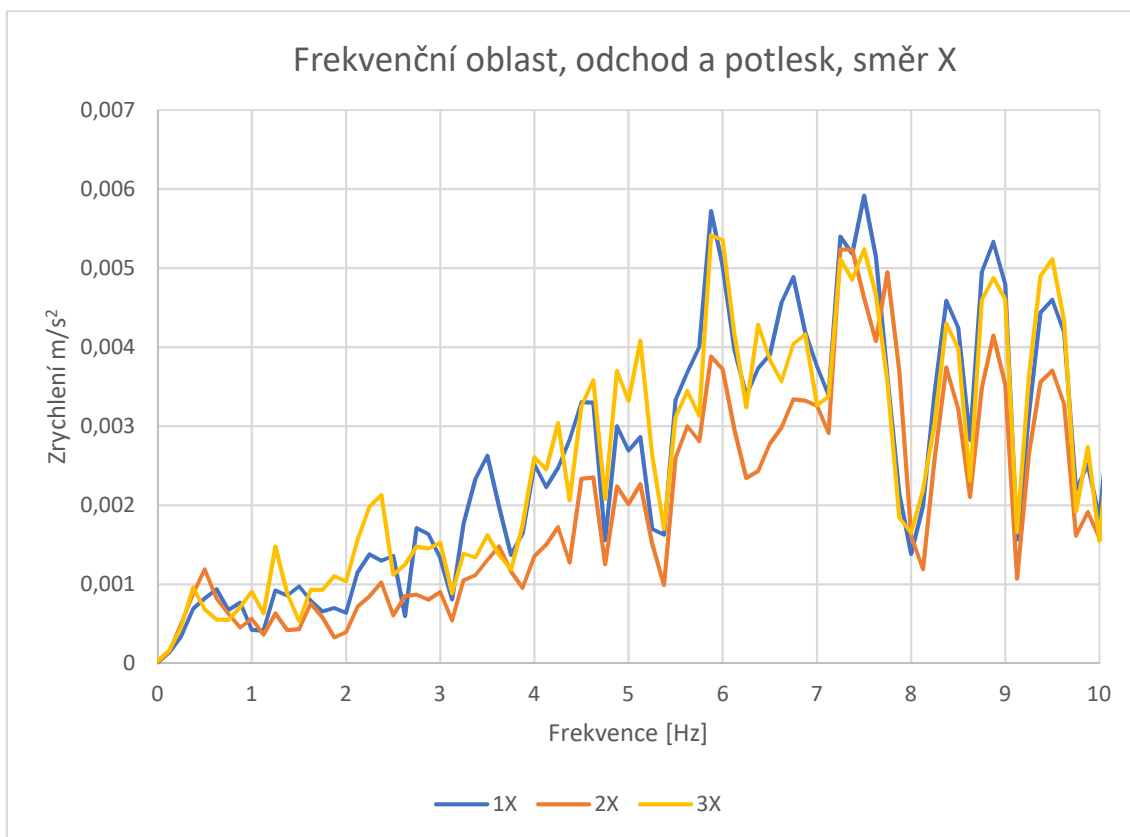


Obrázek 77 - Funkce odezvy na odchod diváků a potlesk, ve směru osy X

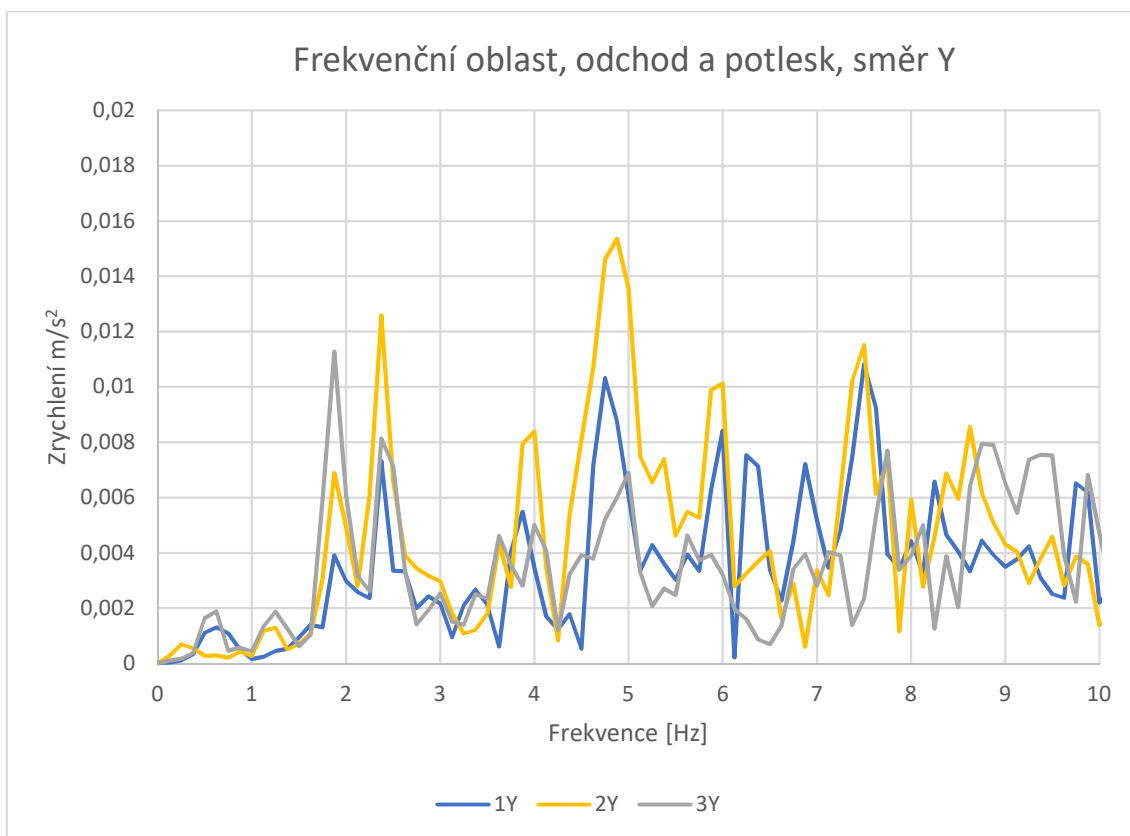


Obrázek 78 - Funkce odezvy na odchod diváků a potlesk, ve směru osy Y

Záznam naměřený během odchodu s potleskem byl převeden z časové oblasti do oblasti frekvenční. Ve směru X se objevuje špička na frekvenci 2,38 Hz, ve směru Y se objevují dvě špičky, první je na frekvenci 1,88 Hz a druhá 2,38 Hz. Uvedl jsem grafy frekvenční oblasti, jsou pouze do 10 Hz, jelikož vyšší frekvence již nemají vliv na komfort diváků.



Obrázek 79 - Frekvenční oblast z odchodu diváků a potlesku, ve směru osy X



Obrázek 80- Frekvenční oblast z odchodu diváků a potlesku, ve směru osy Y



7.2.4 Frekvence vypočtené z odezvy konstrukce

Kdybychom frekvence z odezvy srovnávali s frekvencemi vyhodnocenými z modální analýzy, museli bychom započítat hmotu tvořenou diváky. Díky konstrukci modelu jsme věděli, že konstrukce tribuny váží 16 tun. Hmotnost diváků jsme spočítali z předpokladu, že na každý m² se vejdou dvě osoby (předpoklad na základě fotografie, v místě výškového přechodu na další tribunový stupeň je mezi diváky samozřejmě mezera).

Půdorysná plocha tribuny je 238 m². Počítali jsme s průměrnou hmotností člověka 80 kg, přidaná hmotnost diváků je potom přibližně 38 tun.

Abych zjistil alespoň orientační pokles vlastních frekvencí prázdně tribuny po zaplnění. Zjednodušil jsem soustavu na soustavu a vycházel jsem ze vzorce pro výpočet první vlastní frekvence:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

kde	ω	<i>vlastní frekvence</i>
	k	<i>tuhost konstrukce</i>
	m	<i>Hmotnost konstrukce</i>

Z toho vychází, že s rostoucí hmotností klesá vlastní frekvence. Podle našich předpokladů stoupla hmotnost konstrukce na trojnásobek. Při konstantní tuhosti, se frekvence změní na odmocninu z 1/3, což je 0,577. Vlastní frekvence prázdné tribuny klesnou po naplnění cca na 60%. Pro ověření předpokladu byl upraven konečněprvkový model a při přidání stejné hmoty klesnou frekvence také na 0,577 násobek.

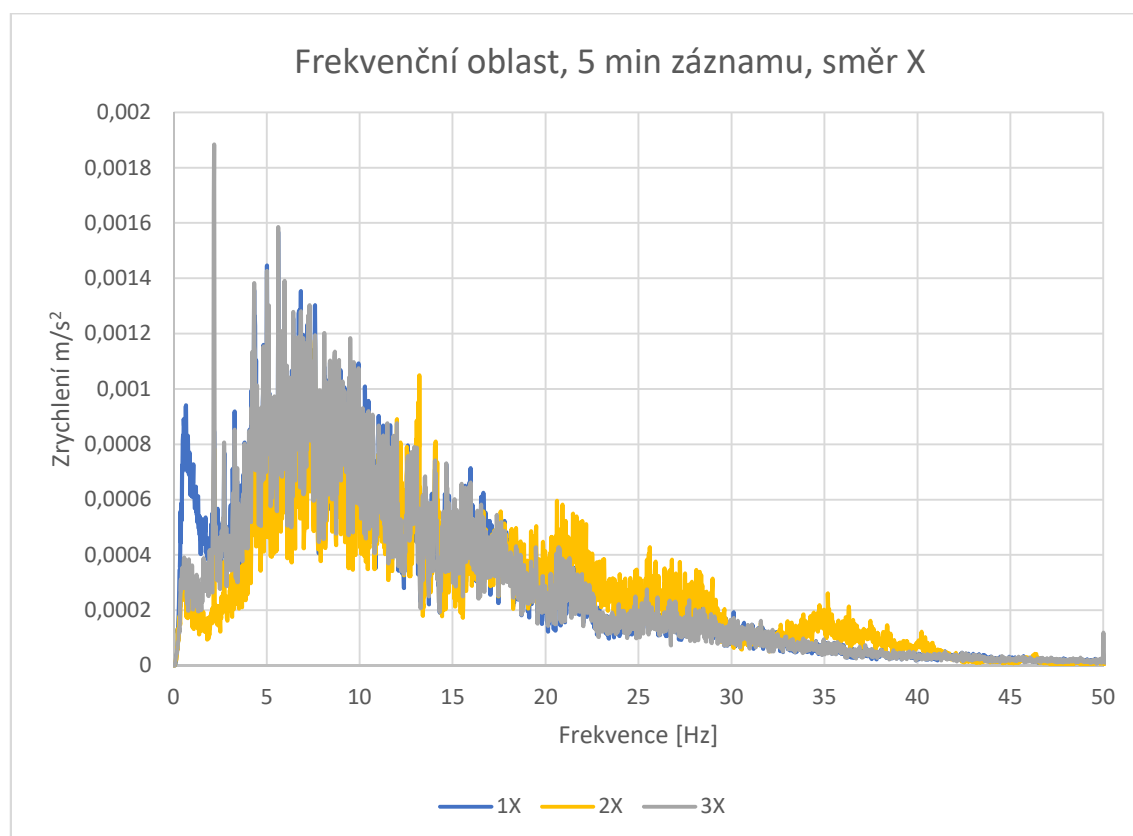
S rostoucí hmotností je také možné, že do sebe lépe zapadají jednotlivé prvky lešení a zvedá se tím i jeho tuhost. Například při zavedení předpokladu, že u prázdné tribuny nedoléhá půlka klínek a při plnění tribuny klínky začínají doléhat, lešení se deformuje, spoje sloupů doléhají, podlahy lépe dosedají na horizontály, můžeme říct, že se i tuhost zvedne výrazně. Kdyby tedy dolehlo 100% spojů, tuhost by například mohla stoupnout na dvojnásobek. Při zavedení tohoto předpokladu s plnou tribunou by pak vlastní frekvence podle vzorečku klesly cca na 82 % frekvence prázdné tribuny.



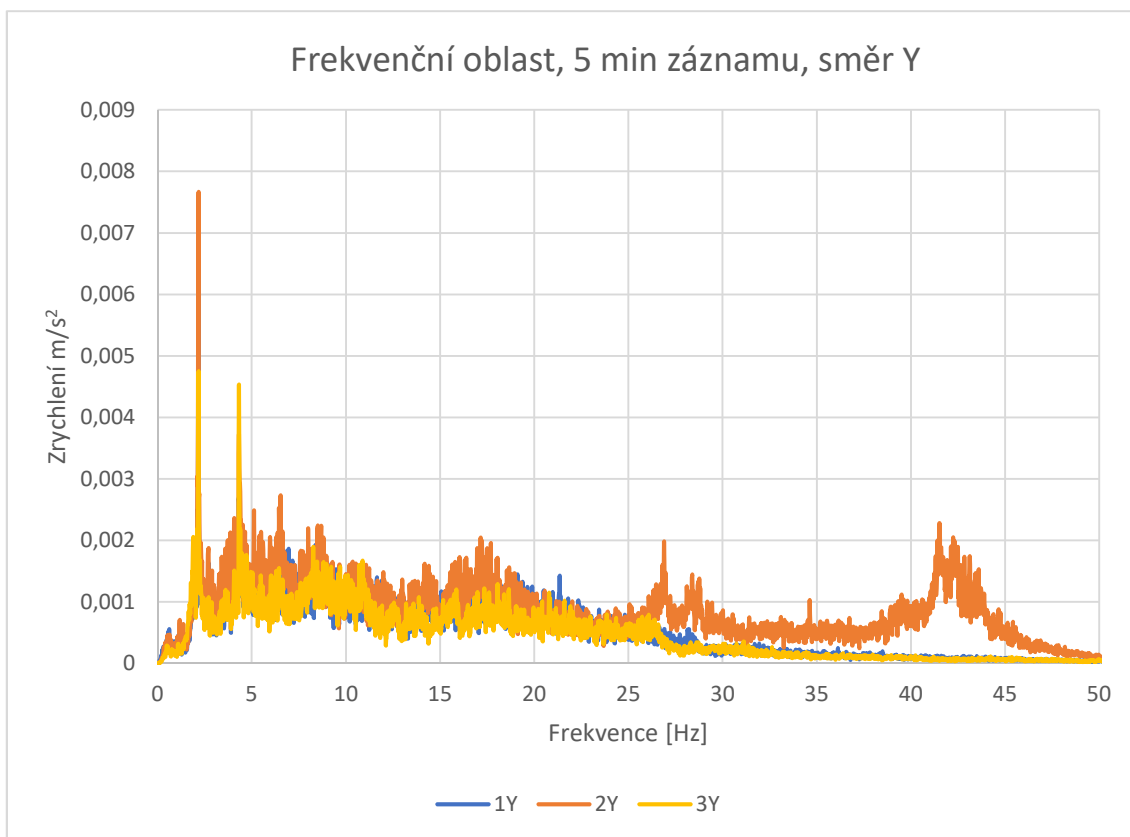
Předpoklady a závěry jsou pouze hypotetické. Zkušenosti s experimenty provedenými na montovaných tribunách jsou mizivé.

Frekvence vyhodnocené z konkrétních situací jsou však pravděpodobně frekvence vybuzevané pohybem diváků. Určit jak se změnila vlastní frekvence tribuny po naplnění je však z výše uvedených důvodů velice obtížné (může být chybný i předpoklad hustoty zaplnění tribuny).

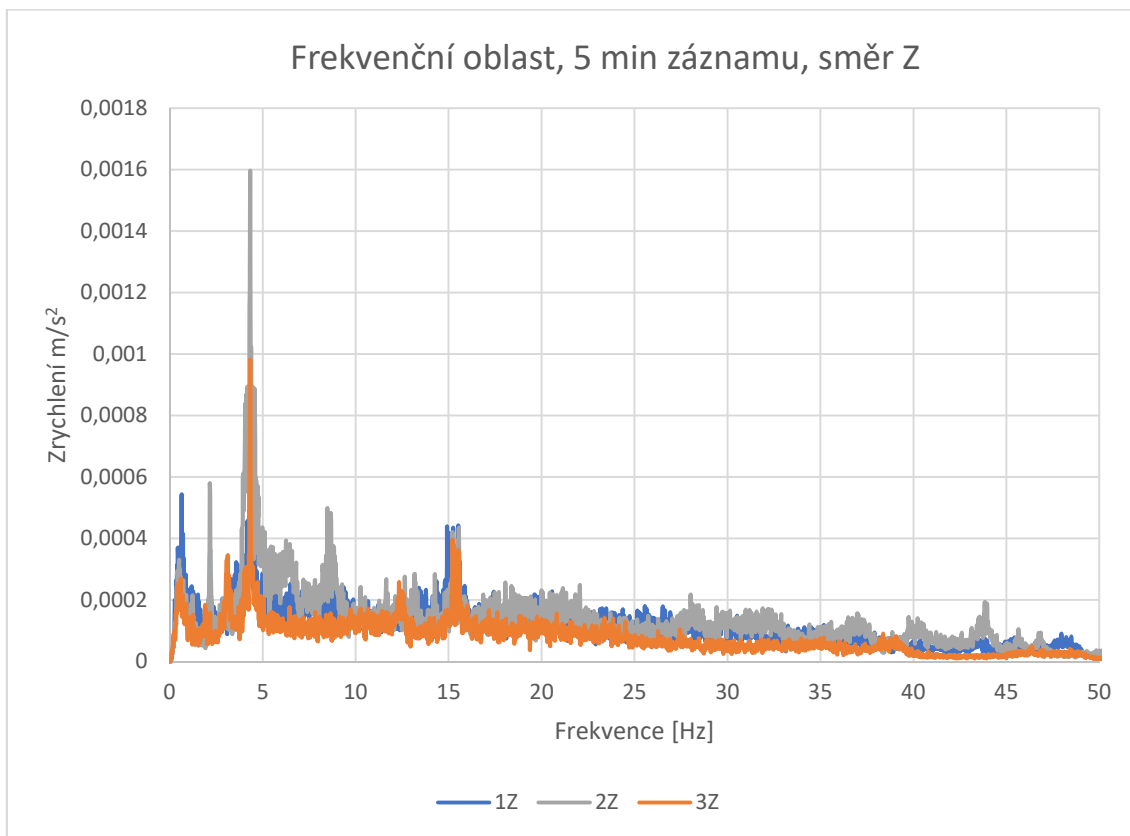
Pro ukázkou jsou uvedeny převedené časové oblasti snímačů ve směru X, Y a Z do frekvenční oblasti u náhodně zvolených úseků závodu (5 minutový záznam). Vysoké frekvence chybí díky filtru s dolní propustí, proto je graf do 50 Hz.



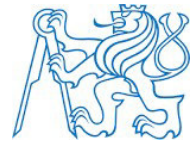
Obrázek 81 - Frekvenční oblast z 5 minut záznamu, ve směru osy X



Obrázek 82 - Frekvenční oblast z 5 minut záznamu, ve směru osy Y



Obrázek 83- Frekvenční oblast z 5 minut záznamu, ve směru osy Z



U snímače ve směru osy X je výrazná špička na frekvenci 2,16 Hz ve směru Y je výrazná špička na frekvenci 2,17 Hz a 4,33 Hz (násobek první uvedené frekvence) a ve směru Z se objevuje špička na frekvenci 2,16 Hz a 4,33 Hz (násobek první uvedené frekvence). S největší pravděpodobností frekvence 2,16 Hz je frekvence vybuzená od pohybu diváků.

U jiných náhodně zvolených úseků závodu bylo také velké zastoupení frekvencí od 1,78 Hz do 1,85 Hz, což napovídá na další frekvenci, kterou vybudí dav svým pohybem.



8 Závěr

Výsledky provedené modální analýzy, zejména pak vyhodnocené tvary vlastního kmitání, jasně ukazují na nezávisle chování jednotlivých celků konstrukce. Ukázalo se, že se liší chování „přední“ a „zadní“ části tribuny a liší se i chování „levé“ a „pravé“ části tribuny. Jednotlivé části se chovají jako lokální celky.

Byl vytvořen konečněprvkový model tribuny pro výpočet chování tribuny. Bohužel se nepodařilo model dokonale sladit s experimentem. Důvodem je velké množství neznámých a proměnných parametrů (tuhost styčnicků, tuhost připojení a vliv sousedních konstrukcí, atd...). Pro pokračování výzkumu bych doporučil dílčí měření na malé sestavě (konstrukci) z několika prutů, aby bylo možno určit tuhost jednotlivých styčnicků.

Pro měření odezvy by byla lepší volba umístit měřené body do stejných pozic vůči nejbližšímu sloupku, ne na prvky, které mohou kmitat převážně lokálně

Bylo nasnímáno a vyhodnoceno chování diváků při biatlonu. Diváci se přibližně polovinu času závodu chovají klidně, aktivita je vybuzena buď průjezdem závodníků kolem jejich tribuny, reprodukovanou hudbou, nebo střelbou oblíbeného reprezentanta jejich národu. Sto procent diváků vykazuje aktivitu budící dynamickou zátěž jen velmi malou část závodu. Největší aktivita se objevuje po úspěšné střelbě a stupňuje se s časem závodu.

Chování tribuny nevykazuje žádná velká zrychlení a vyhodnocené RMS hodnoty zrychlení tribuny v měřených místech při závodu nepřesahují komfortní limity. Diváci si pravděpodobně žádných pohybů tribuny nevšimli. Maximální zrychlení na konstrukci bylo -1.194 m/s^2 .

Odezva má charakter bílého šumu, což je pro konstrukci výhodné. Ukázalo se, že na sportovní akce, takového klidnějšího charakteru je tento typ tribuny bezpečně použitelný.



9 Seznam použité literatury

1. CAPRIOLI A., REYNOLDS P., VANALI M., ZAPPA E., “*Comparison of the effects of a moving crowd on different grandstands during similar events*” IMAC XXIV, 2006
2. BASTISTA R. C., MAGLUTA C., *Spectator Induced Vibrations of Maracana Football Stadium, Proceedings of the 2nd European Conference on Structural Dynamics: EURODYN '93, 21-23 June 1993*
3. BROWNING G. G., *Human Perception of Vibrations due to Synchronized Crowd Loading in Grandstands*, University of Bath, 2011
4. VAN STAALDUINEN P., COURAGE W., *Dynamic Loading of Feyenoord Stadium During Pop Concerts. IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) Symposium Report Vol 71: Places of Assembly and Long-span Buildings Structures*, Birmingham, 1994
5. GRIFFIN M. J., *Handbook of human vibration*. Academic Press, London, New York, 1990
6. *ISO 10137:2007 – Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*
7. ELLIS B.R., LITTLER J.D., *The Response of Cantilever Grandstands to Crowd Loads. Part 1 Serviceability Evaluation. Proceedings of ICE, Structures and Buildings, Vol 157, August 2004*
8. ELLIS B.R., LITTLER J.D., *The Response of Cantilever Grandstands to Crowd Loads. Part 2 Load Evaluation. Proceedings of ICE, Structures and Buildings, Vol 157, October 2004*
9. BACHMANN H., *Vibration Problems in Structures*, Springer Science & Business Media, 1995
10. VERNER M., PLACHÝ T., POLÁK M., *Experimentální analýza chování diváků a jimi vyvolaných vibrací tribuny při fotbalovém utkání*, ČVUT v Praze, 2015
11. FOURCAD MARTIN, Facebook,
<https://www.facebook.com/fourcademartin/photos/a.192880110725997.56975.164403440240331/1642759269071400/?type=3&theater>
12. *NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA 2005 (NBCC 2005) (sentence 4.1.3.6)*



13. <https://www.historyandheadlines.com/april-12-1831-marching-soldiers-cause-suspension-bridge-collapse/>
14. <https://www.stadiumguide.com/twenty-years-ago-the-bastia-stadium-disaster/>



10 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Vibrace budov, základní křivka zrychlení ve směru osy z (směr vibrací - od nohou k hlavě)	5
Obrázek 2 - Šance výskytu mořské nemoci v závislosti na zrychlení a frekvenci [9]	6
Obrázek 3 - Měřená část tribuny.....	26
Obrázek 4 - Detail klínku horizontály zapojeném do rozety sloupku a ukázka vedení kabelů ke snímačům odezvy	27
Obrázek 5 - „Levá“, „prostřední“ a „pravá“ část tribuny	29
Obrázek 6 - Spojení tribuny se schodištěm pomocí ocelové trubky, ukázka rozety na sloupku.....	29
Obrázek 7 - Konzola tribuny	30
Obrázek 8 - Pohled na konzolu.....	30
Obrázek 9 - Diagonály ztužující tribunu.....	31
Obrázek 10 - Část bez diagonál, uložení na šterku a asfaltu	31
Obrázek 11 - Vzpěry podporující horizontálu, která drží sloupky tvořící menší tribunu	32
Obrázek 12 - Uložení sloupků na asfaltu a na zemině, ukázka podepření dřevěnými podložkami.....	32
Obrázek 13 - Podlázky položeny na horizontále, připevněné pomocí speciálních svorek, ne rozet.....	33
Obrázek 14 - Ilustrační výkres půdorysu tribuny [zdroj PERI spol. s.r.o.], výkres není v měřítku	34
Obrázek 15 - Ilustrační výkres řezu tribunou [zdroj PERI spol. s.r.o.], výkres není v měřítku	35
Obrázek 16 - směr os pro modální analýzu	38
Obrázek 17 - Pozice budícího bodu (BB) a referenčního bodu (RB), modré šipky značí cestu nahoru, žluté šipky značí cestu dolů.....	39
Obrázek 18 - Poloha referenčního bodu	41
Obrázek 19 - poloha budícího bodu.....	41
Obrázek 20 – 1. pozice (cesta nahoru) závaží se snímači v jedné měřené řadě ve směru X.....	42
Obrázek 21 - 2. pozice (cesta dolů) závaží se snímači ve směru X.....	42



Obrázek 22 - Pozice snímačů pro měření odezvy během závodu	43
Obrázek 23 - pozice 1. snímačů na odezvu od diváků.....	44
Obrázek 24 - pozice 2. snímačů na odezvu od diváků (směr X)	45
Obrázek 25 - pozice 2. snímačů na odezvu od diváků (směr Y a Z).....	45
Obrázek 26 - pozice 3. snímačů na odezvu od diváků, šipky neukazují směr os, ale pozici snímače.....	46
Obrázek 27 - Žlutá šipka ukazuje umístění nahrávacího zařízení, žlutý obdelník označuje námi měřenou tribunu.....	46
Obrázek 28 - 1. vlastní tvar $f = 3\text{Hz}$	47
Obrázek 29 - 2. vlastní tvar $f = 3,22\text{ Hz}$	48
Obrázek 30 - 3. vlastní tvar $f = 3,45\text{ Hz}$	49
Obrázek 31 - 4. vlastní tvar $f = 4,09\text{ Hz}$	49
Obrázek 32 - 5. vlastní tvar $f = 4,5\text{ Hz}$	50
Obrázek 33 - 6. vlastní tvar $f = 5,25\text{ Hz}$	51
Obrázek 34 - 7. vlastní tvar $f = 5,63\text{ Hz}$	51
Obrázek 35 - 8. vlastní tvar $f = 6,61\text{ Hz}$	52
Obrázek 36 - 9. vlastní tvar $6,94\text{ Hz}$	53
Obrázek 37 – Schéma podlahy lešení	54
Obrázek 38 - Tribuna (z programu Dlubal)	55
Obrázek 39 - Řez modelem konstrukce (z programu Dlubal).....	56
Obrázek 40 - Pohled zezadu (z programu Dlubal)	57
Obrázek 41 - Pohled na celou tribuny	59
Obrázek 42 - 1. vlastní tvar z modelu $f = 2,97\text{ Hz}$	60
Obrázek 43 - 2. vlastní tvar z modelu $f = 3,636\text{ Hz}$	60
Obrázek 44 - 3. vlastní tvar z modelu $f = 3,913\text{ Hz}$	60
Obrázek 45- 4. vlastní tvar z modelu $f = 4,106\text{ Hz}$	61
Obrázek 46 - 5. vlastní tvar z modelu $f = 4,75\text{ Hz}$	61
Obrázek 47 – 1. porovnání vlastních tvarů	62
Obrázek 48 - 2. porovnání vlastních tvarů.....	62
Obrázek 49 - 3. Porovnání vlastních tvarů	63
Obrázek 50 - 4. porovnání vlastních tvarů.....	63
Obrázek 51 - Příspěvek francouzského reprezentanta na sociálních sítích [11].....	65
Obrázek 52 - Ilustrační fotografie plné tribuny. Záběr, který snímala kamera.	66



Obrázek 53 – Aktivita diváků - tleskání (HZM), čas je uveden v % z celkové doby závodu.....	68
Obrázek 54 - Aktivita diváků - pohupování (HZM), čas je uveden v % z celkové doby závodu.....	68
Obrázek 55 - Aktivita diváků - četnosti tleskání (HZZ) čas je uveden v % z celkové doby závodu.....	69
Obrázek 56 - Aktivita diváků - četnosti pohupování (HZZ), čas je uveden v % z celkové doby závodu.....	69
Obrázek 57 - Funkce odezvy na pohupování, ve směru osy X.....	75
Obrázek 58 - Funkce odezvy na pohupování, ve směru osy Y.....	76
Obrázek 59 - Funkce odezvy na pohupování, ve směru osy Z.....	76
Obrázek 60 - Frekvenční oblast z pohupování, ve směru osy X.....	77
Obrázek 61 - Frekvenční oblast z pohupování, ve směru osy Y.....	78
Obrázek 62 - Frekvenční oblast z pohupování, ve směru osy Z.....	78
Obrázek 63 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy X.....	79
Obrázek 64 - - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy Y.....	80
Obrázek 65 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy X.....	81
Obrázek 66 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy Y.....	81
Obrázek 67 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy X.....	82
Obrázek 68 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy Y.....	83
Obrázek 69 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy Z.....	83
Obrázek 70 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy X.....	84
Obrázek 71 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy Y.....	85
Obrázek 72 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy Z.....	85
Obrázek 73 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy X.....	86
Obrázek 74 - Funkce odezvy na potlesk, ve směru osy Y.....	87
Obrázek 75 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy X.....	88
Obrázek 76 - Frekvenční oblast z potlesku, ve směru osy Y.....	88
Obrázek 77 - Funkce odezvy na odchod diváků a potlesk, ve směru osy X.....	89
Obrázek 78 - Funkce odezvy na odchod diváků a potlesk, ve směru osy Y.....	90
Obrázek 79 - Frekvenční oblast z odchodu diváků a potlesku, ve směru osy X.....	91
Obrázek 80- Frekvenční oblast z odchodu diváků a potlesku, ve směru osy Y.....	91
Obrázek 81 - Frekvenční oblast z 5 minut záznamu, ve směru osy X.....	93



Obrázek 82 - Frekvenční oblast z 5 minut záznamu, ve směru osy Y	94
Obrázek 83- Frekvenční oblast z 5 minut záznamu, ve směru osy Z	94



11 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Indikace prahů vnímání člověka pro vertikální harmonické vibrace [9].....	8
Tabulka 2 - Porovnání výsledků z experimentů [5].....	8
Tabulka 3 - Typy aktivit a jim příslušný frekvenční rozsah.....	9
Tabulka 4 - souhrn měřených zrychlení z Littler 2000a, 2000b a 2000c	15
Tabulka 5 - Vyhodnocené vlastní frekvence	47
Tabulka 6 - celkové časy jednotlivých činností během závodů.....	67
Tabulka 7 - celkové časy jednotlivých činností mezi závody	67
Tabulka 8 - Hodnoty extrému 1. – 20. minuta měření HZM.....	70
Tabulka 9 - Hodnoty extrémů 40. – 60. minuta měření HZM.....	71
Tabulka 10 - Hodnoty extrémů 1. – 40. minuta měření HZZ.....	72
Tabulka 11 - Hodnoty extrémů 41. – 60. minuta měření HZZ.....	73
Tabulka 12 - Extrémy z celého měření	73
Tabulka 13- Zrychlení a hodnoty RMS během pohupování (a)	75
Tabulka 14 - Zrychlení a hodnoty RMS během pohupování (b).....	75
Tabulka 15 - Zrychlení a hodnoty RMS během potlesku po střelbě	79
Tabulka 16 - Zrychlení a hodnoty RMS během potlesku po střelbě	82
Tabulka 17 - Zrychlení a hodnoty RMS během potlesku po střelbě (c).....	86
Tabulka 18 - Zrychlení a hodnoty RMS během odchodu z tribuny + potlesk.....	89
Tabulka 19 - Zrychlení a hodnoty RMS během odchodu z tribuny + potlesk (b).....	89