



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra mechaniky**

**Analýza dynamického chování tribun
vyvolaného účinky davu diváků**

**Analysis of the dynamic behavior
of grandstands caused by crowd of spectators**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Bc. Martin Verner

Doktorský studijní program: Stavební inženýrstvín (P3604)

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby (3607V009)

Školitel: prof. Ing. Michal Polák, CSc

Praha, 2020



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing Bc. Martin Verner

Název disertační práce: Analýza dynamického chování tribun vyvolaného účinky davu diváků

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Michala Poláka, CSc.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

GA15-15728S

Analýza konstrukcí tribun

SGS12/117/OHK1/2T/11

jejich verifikace.

Aplikace diagnostických metod u materiálů a konstrukcí a

SGS14/122/OHK1/2T/11

a konstrukcí

Experimentální metody použitelné pro analýzu materiálů

SGS16/201/OHK1/3T/11

Pokročile od návrhu materiálu ke konstrukci

V Praze dne 30.1.2020

.....
podpis

Abstrakt:

Práce se zabývá dynamickým namáháním tribun během sportovních událostí. Z pohledu proměnného zatížení, jsou tribuny primárně namáhány davem diváků. Diváci zpravidla nesledují sportovní akci pouze pasivně (vsedě nebo ve stoje), ale v průběhu akce mění svoje chování v závislosti na jejím vývoji. V krajních případech aktivně povzbuzující diváci dokážou svým dynamickým chováním konstrukci tribuny poškodit. V historii sportu bylo zaznamenáno dokonce několik případů, kdy došlo k jejímu zhroutilí.

V první části práce jsou popsány jednotlivé známé případy poruch sportovních tribun. V devadesátých letech minulého století byly v anglosaských zemích provedeny experimenty, kde se sledovalo dynamické chování tribun při různých sportovních a kulturních událostech. Následně byla dána doporučení pro navrhování konstrukcí tribun do britských norem a předpisů. Bohužel, žádné doporučení neobsahuje model dynamického zatížení pro stanovení dynamického namáhání tribun. Pouze uvádí, kdy je potřeba uvažovat s dynamickým zatížením.

Hlavní část práce popisuje výsledky několika rozsáhlých experimentů, které byly realizovány na čtyřech sportovních stadionech v průběhu fotbalových utkání, hokejových zápasů a závodů světového poháru v biatlonu. V průběhu těchto experimentů bylo sledováno reálné chování diváků a úroveň vyvolaného kmitání tribuny. Ze záznamů kamery, která fanoušky snímala průběžně po celou dobu sportovní události, byly určeny jednotlivé typy chování diváků a ve vybraných případech byla dále stanovena míra zapojení diváků při daném typu chování. Jednotlivé sledované tribuny byly osazeny snímači zrychlení, které průběžně zaznamenávaly vibrace jednotlivých částí tribuny. Z těchto dat bylo možné určit úroveň dynamické odezvy tribun na různé typy chování diváků. Bylo zjištěno, že tribuny nejvíce kmitaly, když se diváci chytli kolem ramen a začali hromadně skákat na místě, kdy velmi rychle došlo k synchronizaci celého davu fanoušků. Zachycené maximální zrychlení jedné ze sledovaných tribun přesáhlo až hodnotu $2,5 \text{ m.s}^{-2}$.

Výsledky experimentů realizovaných během sportovních akcí byly použity jako podklad pro návrh parametrů j matematického modelu, který by měl dostatečně vystihovat skutečné dynamické namáhání tribun způsobené diváky. Pro potřeby tohoto modelu byla provedena experimentální modální analýza jednotlivých zkoumaných tribun. Její výsledky byly použity k verifikaci matematického modelu jedné vybrané tribuny, který byl následně zatěžován navrženým modelem dynamického zatížení. Parametry dynamického modelu se skládaly z amplitudy a budící frekvence. Použité budící frekvence byly vybrány na základě výsledků experimentů. Jedinou neznámou v rovnici představovala velikost amplitud jednotlivých frekvenčních členů. Amplitudy byly optimalizovány tak dlouho, dokud nedošlo ke shodě výsledků vypočtených na modelu s výsledky experimentu s maximální odchylkou do 10%.

Klíčová slova: chování diváků; vibrace; tribuny; model zatížení davem, dynamická analýza

Abstract:

This work deals with the dynamic strain on grandstands during sporting events. In terms of variable load the stands are primarily stressed by the weight of spectators in attendance. Spectators usually begin to watch a sporting event passively (sitting or standing up). However, as the event progresses and the level of excitement builds, the behaviour of the spectators can change dramatically. In extreme cases, the dynamic behaviour of highly active spectators can result in damage to grandstand's structure. In the history of sports, there have even been a few cases of collapse.

The introductory portion of this thesis outlines individual known cases of sports tribune failures. In the 1990s, experiments were conducted in Anglo-Saxon countries to monitor the dynamic behaviour of tribunes at various sporting and cultural events. Subsequently, it was recommended that grandstand structures be designed to British standards and regulations. Unfortunately, no recommendation contains a dynamic load model to determine the dynamic loading of the stands. The recommendation only states in which cases the dynamic load is to be considered.

The main portion of the thesis describes the results of several extensive experiments that were carried out at four sports stadium during a variety of sporting events including: Football matches, ice-hockey matches and biathlon world cup races. During these experiments the real behaviour of spectators and the level of induced vibrations of the stands were monitored. Individual types of spectators' behaviours were determined from the recordings of the camera, which the fans recorded continuously throughout the sporting event. In select cases, the rate of engagement of spectators in the given behaviour was determined. Individual monitored grandstands were equipped with acceleration sensors, which continuously measured vibrations of individual parts of grandstands.

From data it was possible to determine the level of dynamic response of tribunes to different types of spectator behaviour.

It was found that the grandstands experienced the highest level of vibration when a sampling of excited spectators began to jump up and down (all spectators' grabbed shoulders) and the masses followed suit in a synchronized demonstration of support for their team of choice. The result in one of the observed grandstands registering a maximum acceleration that exceeded 2.5 m.s^{-2} .

The results of the experiments conducted during the sporting events were then used as a basis for the creation of a mathematical model that would adequately reflect the real dynamic strain on the stands as caused by spectators. For the purposes of the model, model as opposed to analyses of individual tribunes was performed. Its results were used to verify the mathematical model of one selected grandstand, which was subsequently loaded by the proposed dynamic load model. The model was designed with basic parameters of amplitude and excitation frequency. The excitation frequency was determined by experiments. The only unknown in the equation was magnitude of amplitude. The amplitude was optimized until the model and experiment reached a tolerance of 10%.

Keywords: spectators' behaviour; vibrations; grandstand; crowd load model; dynamic analysis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem lidem, kteří mne donutili práci dopsat se slovy „Martine, vždyť ty máš mnoho vyhodnocených dat, teď by to byla škoda nedodělat“. Velmi mne motivovali a pomáhali mi práci dokončit. Zejména se jedná o pana profesora Michala Poláka, který mi svými konzultacemi nejvíce pomohl. Samotná práce by nikdy nevznikla bez ochoty ředitelů sportovních areálů v Praze na Letné, v Edenu, v Plzni a v Novém Městě na Moravě, kteří nám umožnili experimenty provést přímo na stadionech. Velké poděkování patří i společnostem RECOC spol. s r.o. a PERI spol. s r.o, které nám poskytly tvary konstrukcí tribun v Edenu resp. v Novém Městě na Moravě. Bez těchto modelů by se nám s kolegou Milošem Hüttnerem nepodařilo sestavit věrohodné matematické modely tribun v softwaru od společnosti Dlubal Software CS, ve kterém probíhal i výpočet s navrženým matematickým modelem zatížení.

Nakonec bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinovi Koudelkovi ze společnosti PROJEKT servis spol. s.r.o., který mi umožnil flexibilní pracovní dobu, abych se mohl věnovat psaní práce a provádění experimentů na sledovaných stadionech.

Obsah

1. Úvod	4
1.1 Motivace.....	4
1.2 Historie poruch tribun	4
1.2.1 Víbrace tribun zaznamenané médii.....	4
1.2.2 Historie poruch tribun.....	6
1.3 Navrhování tribun dle platné legislativy	7
1.4 Navrhování tribun dle zahraniční legislativy.....	9
1.5 Experimenty ve světě	10
1.5.1 Hudební turné Red Hot Chili Pappers v roce 2004.....	10
1.5.2 Experimenty v Kanadě a v Anglii.....	12
1.5.3 Výzkum montovaných tribun.....	12
1.5.4 Výzkum v Polsku.....	13
2. Cíle disertační práce.....	15
3. Modální analýza tribun	16
3.1 Princip vyhodnocení modálních charakteristik	16
3.1.1 Měřicí zařízení	16
3.2 Stadion na Letné.....	17
3.2.1 Historie stadionu a stručný popis konstrukce zkoumané tribuny	17
3.2.2 Provedení experimentu	18
3.2.3 Výsledky analýzy.....	18
3.3 Stadion v Edenu	19
3.3.1 Historie stadionu a stručný popis konstrukce zkoumané tribuny.....	19
3.3.2 Provedení experimentu	20
3.3.3 Výsledky experimentální modální analýzy	21
3.4 Stadion v Plzni	22
3.4.1 Historie stadionu a stručný popis nosné konstrukce zkoumané tribuny.....	22
3.4.2 Provedení experimentu	23
3.4.3 Výsledky analýzy.....	23
3.5 Stadion v Novém Městě na Moravě	24
3.5.1 Historie areálu a stručný popis nosné konstrukce sledované tribuny.....	24
3.5.2 Provedení experimentu	25

3.5.3	Výsledky experimentální modální analýzy	25
4.	Chování diváků	28
4.1	Úvodní informace	28
4.1.1	Popis jednotlivých typů chování diváků	29
4.2	Chování diváků během sledovaných sportovních událostí	30
4.2.1	Utkání fotbalového klubu AC Sparta Praha v průběhu jara 2015	31
4.2.2	Utkání fotbalového klubu SK Slavia Praha v průběhu jara 2016	38
4.2.3	Utkání hokejového mužstva HC ŠKODA Plzeň v průběhu ligové sezony 2015/2016	44
4.2.4	Závody světového poháru v biatlonu ve Vysočina Aréně v Novém Městě na Moravě – 12/ 2016	53
4.3	Celkové zhodnocení	57
5.	Naměřená dynamická odezva konstrukcí tribun	58
5.1	Tribuna na stadionu v Praze na Letné	58
5.1.1	Popis experimentu	58
5.1.2	Výsledky měření vibrací tribuny	59
5.1.3	Vyhodnocení	63
5.2	Tribuna na stadionu SK Slavia Praha v Edenu	64
5.2.1	Popis experimentu	64
5.2.2	Výsledky měření	65
5.2.3	Vyhodnocení	67
5.3	Tribuna na zimním stadionu v Plzni	67
5.3.1	Popis experimentu	67
5.3.2	Výsledky měření	68
5.3.3	Vyhodnocení	71
5.4	Montovaná tribuna v areálu Vysočina Arény v Novém Městě na Moravě	71
5.4.1	Popis experimentu	71
5.4.2	Výsledky měření	72
5.4.3	Vyhodnocení	74
5.5	Zhodnocení	74
6.	Model dynamického zatížení tribun	76
6.1	Vstupní údaje	76
6.2	Výběr modelu dynamického zatížení tribun	78
6.3	Návrh parametrů matematického modelu dynamického zatížení tribun	78

6.3.1	Návrh ekvivalentního statické zatížení	79
6.3.2	Návrh parametrů dynamického modelu zatížení.....	79
7.	Závěr.....	81
8.	Seznam použité literatury	83
8.1	Seznam obrázků	86
8.2	Seznam tabulek	89
8.3	Seznam zkratk a symbolů.....	90

1. Úvod

1.1 Motivace

V roce 2010 jsem navštívil finálový zápas Českého poháru ve fotbale mezi týmy FK Baumit Jablonec a FC Viktorie Plzeň, který se hrál v Praze na Letné. Během zápasu začali fanouškové Plzně skákat na tribuně a ta se následně začala otřásat. Pokud člověk s nimi neskákal, cítil nepříjemné vibrace. Následně jsem se byl podívat na zápas německé Bundesligy mezi 1 FC Norimberk a FC Eintracht Frankfurt [47], kde jsem byl svědkem výrazných vibrací tribun. Po těchto osobních zkušenostech jsem si říkal:

- Opravdu jsou tribuny bezpečné?
- Jak se vlastně diváci chovají?
- Jak se vlastně chová tribuna, když ji zatěžuje dav lidí?
- Zkoumal někdo chování tribun s diváky?
- Existuje matematický model diváků, který by se dal použít pro návrh tribuny?

1.2 Historie poruch tribun

1.2.1 Vibrace tribun zaznamenané médii.

V roce 2015 vyšel novinový článek popisující, jak skákání diváků poškodilo nejmodernější stadion v České republice, který byl otevřen v roce 2004.

Kdo neskáče, není Čech? Hopsání poničilo O2 arenu, oprava stála miliony

29. dubna 2015 9:52



Vlastník libeňské O2 areny, společnost Bestsport Arena, před letošním hokejovým šampionátem do rekonstrukce investoval více než dvojnásobek ročního provozního zisku, tedy přes 150 milionů korun. Největší část šla na opravy výsuvných tribun, které v minulých letech poškodilo hromadné skákání fanoušků.

Obrázek 1: Ukázka článku MF Dnes ze dne 29. 4. 2015 [1]

V roce 2016 proběhly Hokejové hry v Brně, kdy diváci byli upozorněni na riziko spojené se skákáním diváků na tribunách. Byli ubezpečeni, že jsou tribuny dostatečně únosné, ale byli varováni před chvěním tribun způsobené skákáním. Přes toto varování začal kotel hostujícího týmu skákat, po chvíli se skákající diváci vyděsili, jelikož došlo k zřetelnému pohybu tribuny, který byl osobami přítomnými na tribuně vnímán jako nepříjemný, a sami sebe upozorňovali, aby bylo skákání zastaveno.

4. Na tribunách pozor! Kapacita hlediště je 21 500 míst. Všechna jsou jen na stání. „Při pohybu na tribunách je nutné dbát zvýšené opatrnosti. V případě námrazy jsme připraveni povrch rozmrazovat, ale návštěvníci nesmějí zapomínat na to, že v zimě bývají kovové povrchy kluzké,“ dodal Chylík.

Pořadatelé nedoporučují ani skákání na tribunách. Zřícení kvůli velké zátěži prý sice nehrozí, ale tribuny se pod náporům velkého množství skákajících lidí mohou začít chvět.

Obrázek 2: Úryvek z doporučení pořadatelů návštěvníkům Hokejových her [2]

V roce 2016 se v anglickém fotbale udál malý zázrak. Nejvyšší fotbalovou ligu vedl a následně vyhrál tým, který měl být podle bookmakerů (s kurzem na vítěze ligy na počátku sezony 5000:1) největší adept na sestup. Jednalo se o tým Leicester City. Tento tým dokázal poblíznit celou Anglii. Studenti geologie místní univerzity zaznamenali pomocí seismografů tzv. mikro zemětřesení o síle 0,3 stupně Richterovy stupnice. Zemětřesení bylo zaznamenáno během oslavy vítězného gólu, který dal útočník Jamie Vardyho v 89 minutě zápasu. Na jeho počest pojmenovali studenti tento efekt „Vardy quake“ [3]



Obrázek 3: Titulní stránka z novinového článku Nova Sport [3]

Posledním, kterého bych chtěl jmenovat, že se o tribunách zmínil veřejně, byl francouzský biatlonista Martin Fourcade, který 13. 12. 2016 na svůj profil na Facebooku umístil fotku s popisem: „Nevím, jestli jsem tak velký biatlonový fanoušek, abych si sedl s 30 tis. českými fanoušky na tuhle tribunu.“ [4]



Obrázek 4: Komentář ke konstrukci tribun v Novém Městě na Moravě – Martin Fourcade [4]

1.2.2 Historie poruch tribun

První historickou poruchou tribuny, kdy byly zaznamenány oběti na životě, byl kolaps tribuny v roce 1902. Jednalo se o mezistátní zápas Anglie – Skotsko, který se hrál ve skotském městě Glasgow, konkrétně na dřevěném stadionu klubu Rangers s kapacitou 80 000 diváků (Obr. 5). V 50. minutě měli Angličané šanci na vstřelení gólu, diváci se zvedli ze svých sedaček, aby lépe viděli a následně se opětovně posadili. Během hromadného sednutí diváci vyvolali silový impuls, který tribuna nebyla schopna přenést, a následně došlo k jejímu kolapsu. Během neštěstí zemřelo 26 diváků a dalších min. 500 bylo zraněno. Na základě této nehody se při výstavbě stadionu ve Wembley provedla zatěžovací zkouška, kdy figuranti na tribunách simulovali různé druhy fandění, aby se prověřila spolehlivost tribuny s ohledem na potenciální dynamické účinky diváků [5].



Obrázek 5: Pohled na zborcenou tribunu – Glasgow 1902 [5]

V roce 2007 došlo k pádu tribuny v brazilském městě Salvador (Obr. 6), kdy tribuna nevydržela skákání příznivců na konci fotbalového utkání. Během pádu zemřelo celkem sedm fanoušků. V konstrukci tribuny vznikl otvor, kterým se postižení fanouškové zřítily z výšky 20 m [6].



Obrázek 6: Zborcená tribuna na stadionu v brazilském Salvadoru [6]

Dalším velkým problémem sportovních stadionů je proměnlivost jejich funkce. Dříve sloužily stadiony pouze pro sledování sportovních událostí. V minulosti došlo ke změně chování majitelů stadionů a ty jsou ve velkém

využívány i pro pořádání koncertů. Stadiony začaly častěji výrazněji kmitat. V roce 1999 byl slavnostně otevřen Millennium stadion ve velšském Cardiffu. V okamžiku otevření to byl stadion s největšími konzolovými tribunami na světě. Stadion měl být primárně využíván pro potřeby konání ragbyových a fotbalových zápasů, ale začal být využíván i pro potřeby konání koncertů. Během prvních koncertů započali diváci na tribunách pociťovat silné vibrace. Vibrace nebyly natolik silné, aby zapříčinily pád konstrukce, ale měly neblahý vliv na chování diváků, u kterých vyvolávaly nepříjemné pocity až paniku (způsobenou obavou ze zhroutilí tribuny). Po několika koncertech se na stadionu realizovalo opatření spočívající v dodatečné instalaci ocelových sloupů, které během koncertů podepírají konzolové části tribuny [7,8].

Výrazné vibrace byly zaznamenány i na anglických fotbalových stadionech v Manchesteru (Old Trafford), v Liverpoolu (Anfield road 2008) a v Londýně (Highbury). Na všech stadionech bylo po problémech s vibracemi zakázáno koncertovat [7,8].

Mezi nejznámější případy výrazných vibrací tribuny patří vibrace zaznamenány v roce 2010 na fotbalovém stadionu v německém Norimberku. Během bundesligového zápasu došlo k výraznému rozkmitání tribuny poskakováním diváků, které způsobilo lokální paniku. Vibrace naštěstí nebyly tak velké, aby hrozilo zhroutilí konstrukce [7,8].

1.3 Navrhování tribun dle platné legislativy

Podklady pro projektování v České republice představuje soustava vyhlášek a technických norem. České normy pro navrhování korespondují převážně s evropskými normami tzv. „EuroKódy“. V těchto normách jsou po potřeby návrhu tribuny zakotveny pouze hodnoty proměnného statického zatížení a normy neobsahují doporučení, jak pracovat s dynamickým zatížením, které vyvolají diváci svým chováním.

Ukázka českých norem pro návrh tribun:

- ČSN EN 1990, Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [9]
- ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí (Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb) [10]
- ČSN EN 13200-5, Zařízení pro diváky (Část 5: Teleskopické tribuny) [11]
- ČSN EN 13200-6, Zařízení pro diváky (Část 6: Demontovatelné (dočasné) tribuny) [12]
- ČSN EN 13814, Prostředky lidové zábavy pro slavnosti (Bezpečnost) [13]
- ČSN ISO 2631-1, Vibrace a rázy-Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím [14]

ČSN EN 1990 - norma obsahuje obecné principy návrhu konstrukcí z hlediska vibrací a dynamického zatížení. Základní myšlenka normy je, že v případě dynamického zatížení způsobujícího kmitání nebo vlastních frekvencí, které by mohly vést k překročení požadavků použitelnosti, musí se provést podrobná dynamická analýza. V normě, ale nejsou popásány žádné zvláštní pokyny pro provedení této analýzy. Tribuny jsou přiřazeny do kategorie CC3 (velké následky s ohledem na ztráty lidských životů) [9].

ČSN EN 1991-1-1 - norma uvádí převážně statické zatížení. Dynamické zatížení je v normě popsáno: „*Pokud není riziko rezonance nebo jiné významné dynamické odezvy konstrukce, mohou být dynamické účinky zahrnuty v modelech zatížení. Pokud lze očekávat rezonanční účinky od synchronizovaného rytmického pohybu lidí,*

tančení nebo skákání, pak se má určit model zatížení pro speciální dynamický výpočet.“ [10] V normě pak následují odkazy na další zdroje.

Z hlediska statického zatížení jsou tribuny zařazeny do kategorie C2 (plochy se zabudovanými sedadly) a C5 (plochy s vysokou koncentrací lidí).

Velikost zatížení:	kN/m ²	kN
Kategorie C2	3,0-4,0	2,5-7,0
Kategorie C5	5,0-7,5	3,5-4,5

ČSN EN 13200 - části 5 a 6 popisují horizontální a vertikální užité zatížení. Tribuny jsou zařazeny z hlediska statického zatížení do kategorie C2 a C5 (viz předchozí odstavec). V případě dynamických účinků se podle normy provede speciální analýza. Jako statický zatěžovací model se používá např. čtvercová ortogonální síť s roztečí 0,5 m. V uzlech jsou umístěny síly o velikosti 1kN což odpovídá 4,0 kN/m². Horizontální zatížení je uvažováno jako 6% vertikálního zatížení. Norma dále doporučuje zohlednit vliv davu lidí na možnost rezonance [11,12].

ČSN EN 13814 – norma opět definuje podobné hodnoty nahodilé zatížení jako ČSN EN 13200. Navíc popisuje horizontální zatížení na zábradlí, bariéry atd. [13].

ČSN ISO 2631 – norma popisuje způsob stanovení vlivu vibrací na lidské pohodlí a zdraví. Uvádí základní faktory, které se kombinují úroveň vnímání vibrací člověkem. Uvažovaná frekvenční pásma jsou:

0,1 - 0,5 Hz	pro nemoc z pohybu,
0,5 - 80 Hz	pro zdraví, pohodlí a vnímání.

V příloze normy je uveden vztah mezi velikostí vibrací a pohodlím člověka. Vibrace jsou posuzovány pomocí efektivní hodnoty zrychlení (RMS), popřípadě lze použít špičkové hodnoty zrychlení konstrukce [14].

Norma pracuje s vážením úrovně vibrací v třetinooktávových frekvenčních pásmech při určování RMS. Používá se frekvenční vážení W_k , W_d nebo W_m , které je definováno pro hodnocení vibrací budov (Tab. 1).

Tabulka 1: Ukázka pokynů pro použití křivek frekvenčního vážení při základním vážení. [14]

Frekvenční vážení	Zdraví	Pohodlí	Vnímání
W_k	osa z povrch sedadla	osa z povrch sedadla osy x, y, z, nohy (sezení)	osa z povrch sedadla osa z stání
W_d	osa x povrch sedadla osa y povrch sedadla	osa x, y povrch sedadla osa x, y stání	osa x, y povrch sedadla osa x, y stání

V příloze C (Pokyn pro posuzování účinků vibrací na pohodlí a vnímání) dané normy jsou uvedeny intervaly úrovní vibrací z hlediska jejich vnímání a účinků na pohodlí. Norma tyto hodnoty vztahuje k dopravním prostředkům.

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

Norma dále uvádí, že 50% zdravých lidí detekuje vibrace při vážení W_k o velikosti $0,015 \text{ m/s}^2$. Mezi lidmi ale jsou velké rozdíly. Hodnota je uváděna normou jako medián. [14]

1.4 Navrhování tribun dle zahraniční legislativy

Normy, které nejlépe popisují dynamické chování davu lidí na tribunách, jsou Britské normy (BS – British standards). Tyto normy jsou pravidelně aktualizovány a doplňovány [15,16].

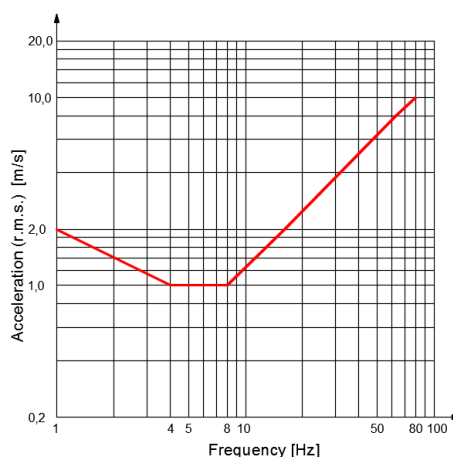
BS 6399 Zatížení budov. Norma není od roku 2010 platná. Její ustanovení ohledně dynamických vlastností davu lidí se přesunuly do národní přílohy Eurokodu BS EN 1991-1-1:2002. Norma stanovuje velikost prvních vlastních frekvencí, kdy už není potřebné provádět dynamickou analýzu konstrukce, konkrétně:

Svislé kmitání	první frekvence nosné konstrukce tribuny větší než 8,4Hz
Vodorovné kmitání	první frekvence nosné konstrukce tribuny větší než 4,0Hz

V normě jsou dále zohledněny výzkumy vlivu vibrací na lidské tělo. Limitní velikost těchto vibrací může příslušný certifikační úřad (stavební úřad, hygiena apod.) měnit pro jednotlivé stadiony.

V roce 2001 byla vydána příručka, která vyšla pod záštitou Institutu stavebních inženýrů v Británii a která se jmenuje Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action [17]. Příručka rekapituluje různé výzkumy v oblasti dynamiky tribun během hudebních a sportovních událostí. V příručce jsou zejména popsány hodnoty budících frekvencí dynamických sil, kterými na tribunu působí diváci během jednotlivých činností na stadionu (sport x koncert). Příručka, ale nedává návod, jak do výpočtu zahrnout dynamickou sílu.

ISO 10137:2007 definuje hodnoty přípustných vibrací pro stadiony. Využívá se pro hodnocení křivka, která pracuje s váženými hodnotami RMS (W_m) a k tomu příslušnou frekvencí. RMS hodnota je v tomto případě vyhodnocována z časového intervalu $T = 10 \text{ s}$ [18].



Obrázek 7: Křivka rozhraní pohodlných a nepohodlných vibrací ve vertikálním směru (v ose z) [18]

1.5 Experimenty ve světě

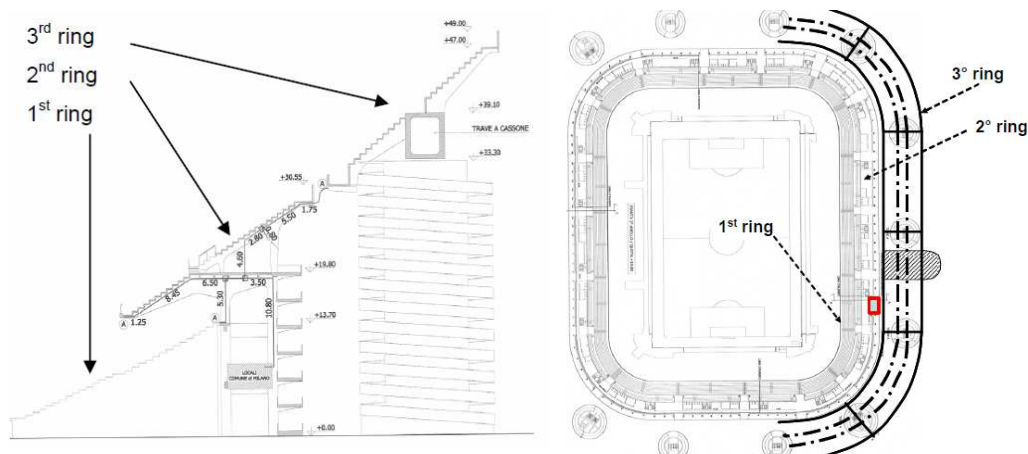
Určení velikosti zatížení od davu lidí je velmi obtížné. Zatížení se z větší části nedá nasimulovat, jelikož nelze v laboratorních podmínkách pracovat s davem, který by se choval přirozeně. Pro potřeby určení velikosti dynamické odezvy tribun proběhly ve světě experimenty během konkrétních událostí, které se zabývaly sledováním vibrací nosných konstrukcí tribun způsobených davem lidí.

1.5.1 Hudební turné Red Hot Chili Pappers v roce 2004

V roce 2004 probíhalo světové turné hudební skupiny Red Hot Chili Pappers. V rámci turné byly sledovány vibrace způsobené diváky na dvou stadionech ve dvou různých zemích jeden týden po sobě a následně proběhlo jejich vyhodnocení [19]. Konkrétně se jednalo o stadiony Giuseppe Meazza v Miláně a Stadium City of Manchester. Oba stadiony jsou využívány i pro potřeby konání sportovních utkání, zejména fotbalových zápasů [19].

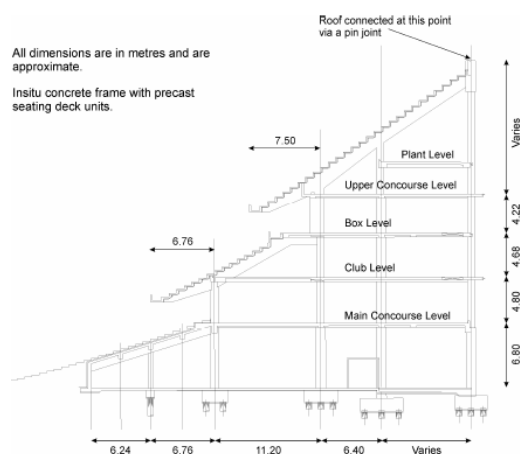
1.5.1.1 Popis stadionů

Nosnou konstrukci stadionu Giuseppe Meazza (Obr. 8), která vznikla postupně od 20. let až po 90. léta 20. století, tvoří tři nezávislé ocelobetonové struktury. Tribuny ve vyšších patrech jsou konzolové nosníky. Celková kapacita při konání koncertů je přibližně 80 000 diváků. Základní vlastní frekvence tribun byly naměřeny mezi 4,0 až 5,0 Hz [19].



Obrázek 8: Schéma stadionu Giuseppe Meazza v Miláně [19]

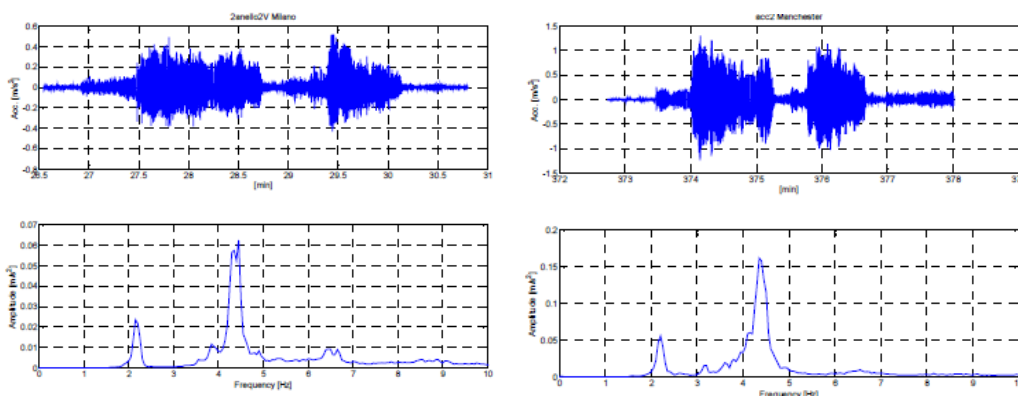
Stadium City of Manchester (dnes se nazývá Etihad Stadium) (Obr. 9), byl vybudován u příležitosti konání her Commonwealth v roce 2002. Jedná se o železobetonovou konstrukci, která je doplněna prvky z předpjatého betonu. Celková kapacita stadionu při koncertech je 60 000 diváků. Vlastní frekvence tribun byly naměřeny mezi 4,0 až 5,0 Hz což je obdobné jako na stadionu v Miláně [19].



Obrázek 9: Příčný řez tribun stadionu v Manchesteru [19]

1.5.1.2 Výsledky experimentu

Na stadionu v Manchesteru bylo zaznamenáno zrychlení tribuny se špičkovými hodnotami až $1,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Obr. 10). V Miláně byly naměřeny hodnoty zrychlení $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Obr. 10). Rozdílné hodnoty byly, dle výsledků experimentu, zapříčiněny rozdílnou tuhostí jednotlivých tribun a odlišným chováním diváků. Jednalo se o britskou skupinu, která když zpívala v Anglii, tak došlo k lepší synchronizaci posluchačů než při koncertu v zemi, kde není rodným jazykem angličtina. Tento závěr byl potvrzen experimentem během koncertu Vasca Rossi v létě 2004, kdy byly na stadionu v Miláně naměřeny vyšší hodnoty zrychlení tribuny. Při experimentech bylo zjištěno, že z pohledu dynamiky se druhé prstence tribuny chovaly v Miláně a Manchesteru při koncertech stejně [19].



Obrázek 10: Průběh zrychlení tribuny (v časové a ve frekvenční oblasti) během koncertu v Miláně (vlevo) a v Manchesteru (vpravo) [19]

1.5.2 Experimenty v Kanadě a v Anglii

V Kanadě byl v roce 1983 proveden experiment během rokového koncertu na betonové tribuně s délkou přes 18 m. Diváci při koncertu povětšinou seděli, tleskali a podupávali do rytmu písni. Diváci dokázali rozkmitat tribunu na úroveň popsanou RMS hodnotou zrychlení $0,10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ při délce trvání větší než 30 s. Výrazné kmitání tribun bylo zaznamenáno při jedné čtvrtině písniček. Špičkové hodnoty zrychlení dosahovaly až $3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ vertikálně a $0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ horizontálně. S maximálním výkmitem výchylek 12 mm během jedné skladby, kdy se buzení dostalo do rezonance s vlastní frekvencí tribuny, která byla 3,0 Hz [8].

V Anglii byla dále sledována tribuna s vlastní frekvencí 4,5 Hz ve stavu, kdy byla prázdná. Při zaplnění diváky vlastní frekvence tribuny poklesla na 3,8 Hz. Maximální hodnota RMS vypočtená z intervalu 5 minut byla $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ s maximálním špičkovým zrychlením $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ [8].

1.5.3 Výzkum montovaných tribun

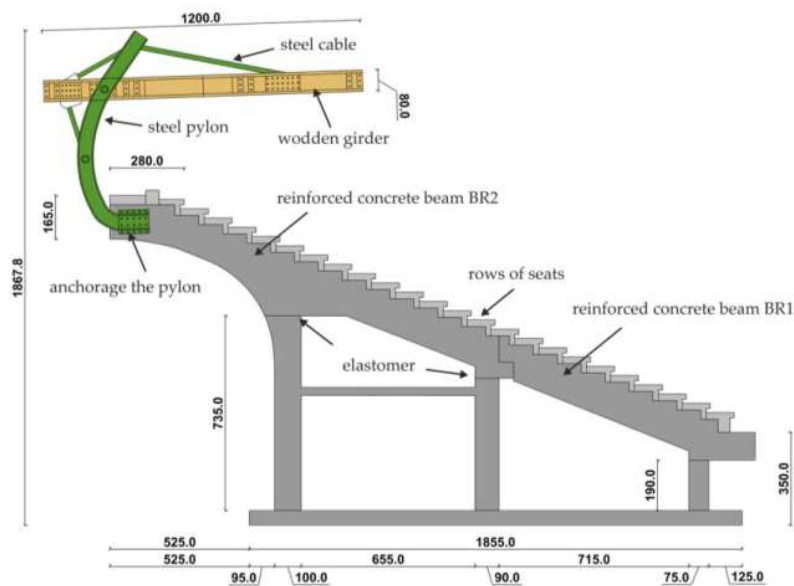
V roce 1992 byl v Anglii realizován rozsáhlý výzkum na dynamickou odezvu trvalých, výsuvných a demontovatelných tribun. Celkem se během experimentu sledovalo 67 tribun (50 demontovatelných, 11 trvalých a 6 výsuvných). Tribuny byly sledovány během různých aktivit (koncertů, fotbalových utkání atd.) a výsledky ukázaly (Obr. 11), že pro tribuny je nejhorší dynamické rytmické zatěžování. Závěry experimentu byly zařazeny k pokynům pro návrh montovaných tribun dle britských norem (British standards) [8].

Stand Type	Natural Frequency Hz		Event	Recorded Acceleration ms^{-2} Low pass filtered at 10Hz	
	Vertical	Horizontal		Vertical	Horizontal
Demountable	>9.0	>2.0	Pop Concert	2.1	12.7
	>9.0	>2.0	Pop Concert	0.9	1.5
	>9.0	>2.0	Pop Concert	1.5	0.7
	>9.0	>1.8	Football	4.1	0.6
	>9.0	>1.8	Football	2.8	1.3
	>9.0	>1.8	Football	0.7	0.2
	>9.0	>1.8	Football	0.7	0.4
	>7.9	>1.8	Motor racing	0.4	0.3
	>7.9	>1.8	Motor racing	2.2	0.6
	>7.9	>1.8	Motor racing	0.3	0.2
	>7.9	>1.8	Motor racing	0.1	0.1
	>7.9	>1.8	Motor racing	0.2	0.2
	>7.9	>1.8	Horse racing	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	Drama Festival	0.1	0.1
Retractable	>9.5	~2.5	Pop Concert	3.7	3.2
	>9.5	~3.0	Pop Concert	1.2	1.2
Permanent	5.70		Pop Concert	0.255	
	5.70		Pop Concert	0.2	
	4.93		Pop Concert	0.76	
	4.93		Pop Concert	0.474	
	4.69		Pop Concert	0.804	
	4.69		Pop Concert	0.555	
	4.76		Pop Concert	0.53	
	6.36		Pop Concert	0.307	
	6.79		Pop Concert	0.378	
	2.66		Sport	0.716	
	2.66		Sport	0.536	
	2.66		Sport	0.949	
	3.55		Sport	0.237	
	6.60		Pop Concert	0.206	
	6.60		Pop Concert	0.176	

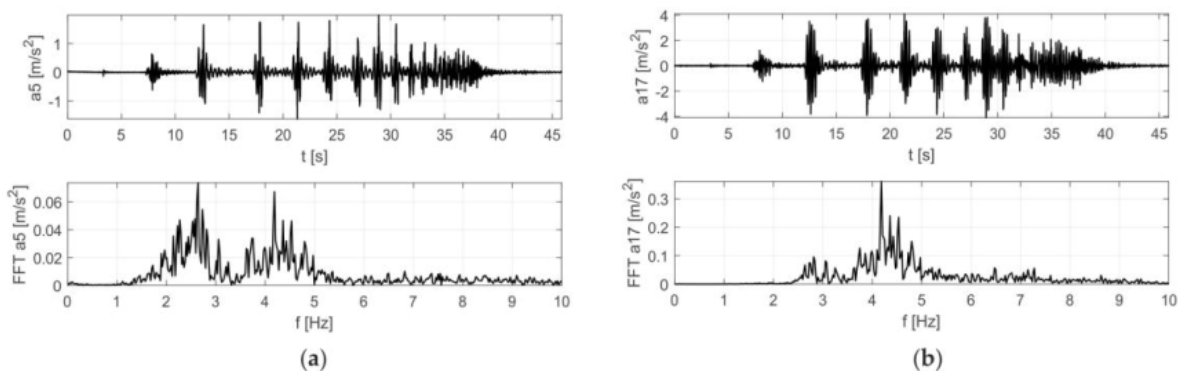
Obrázek 11: Souhrn naměřených výsledků v průběhu studie [8]

1.5.4 Výzkum v Polsku

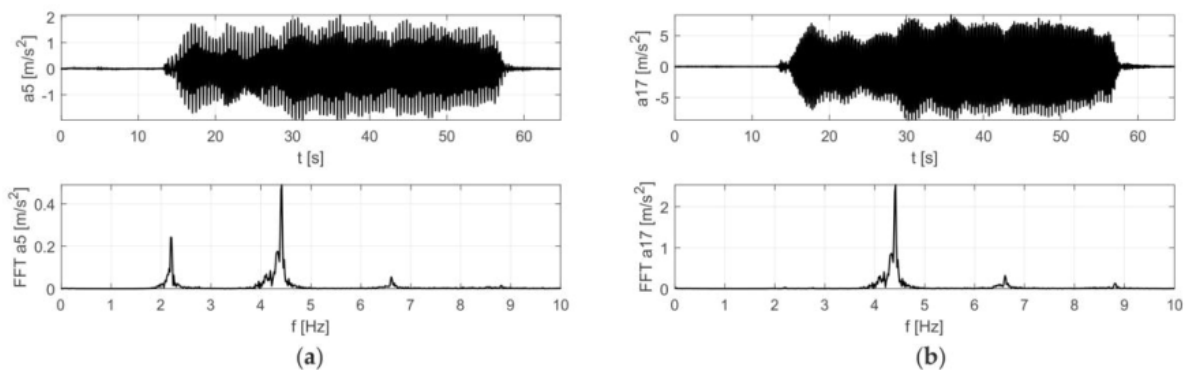
V práci [20] je popsán případ, kdy na plochodrážním stadionu v Zeilonu Góře docházelo k nadměrným vibracím střešní konstrukce (Obr. 12). Vibrace byly způsobeny chováním diváků. Byl proveden experiment, který se zabýval zjištěním odezvy konstrukce na chování diváků (Obr. 13 a 14). V první fázi experimentu byla provedena modální dynamická analýza, na základě které byl verifikován matematickým model tribuny. Cílem experimentu byla dát doporučení, jak upravit konstrukce zastřešení, aby nedocházelo k vibracím střešní konstrukce [20].



Obrázek 12: Příčný řez konstrukcí stadionu - obrázek byl převzat z [20]



Obrázek 13: Zrychlení během experimentu nesynchronní skákání; a) nosník b) střecha [20]



Obrázek 14: Zrychlení naměřené během experimentu při plné synchronizaci diváků při tzv. "Labado dance"; a) nosník b) střecha [20]

2. Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce bylo zjištění reálného chování diváků na českých stadionech a vyšetření úrovně jimi vyvolaných vibrací tribuny. Druhým cílem práce bylo určení parametrů modelu dynamického zatížení, který by bylo možné použít pro návrh tribun.

Naplnění hlavních cílů bylo rozděleno do následujících dílčích cílů práce:

- provedení experimentů minimálně na třech sportovních stadionech,
- zjištění chování diváků během jednotlivých sportovních utkání,
 - popsání způsobu chování diváků,
 - určení počtu diváků v daném sektoru,
 - zjištění poměru aktivních a pasivních diváků,
- určení úrovně vibrací tribun vyvolaných diváky při různých typech jejich chování,
- experimentální modální analýza sledovaných konstrukcí tribun,
- vytvoření základního matematického modelu dynamického zatížení,
 - vytvoření modelu dynamického zatížení a jeho aplikace na modelu konstrukce tribuny, který byl verifikován na základě experimentální modální analýzy,
 - porovnání získaných výsledků s naměřenými daty.

3. Modální analýza tribun

Experimenty, které jsou popsány v této práci, byly realizovány na vybraných tribunách na čtyřech sportovních stadionech v České republice:

- na fotbalovém stadionu AC Sparta Praha v Praze na Letné,
- na fotbalovém stadionu SK Slavia Praha v Praze v Edenu,
- na hokejovém stadionu v Plzni
- na stadionu ve Vysočina Aréně v Novém Městě na Moravě.

Během každého měření byla provedena experimentální modální analýza za účelem zjištění vlastních tvarů a vlastních frekvencí sledované tribuny. Výsledky experimentální modální analýzy posloužily pro porovnání základní vlastní frekvence tribuny s budícími frekvencemi, kterými působili diváci na tribunách. Dále posloužily pro potřeby verifikace matematických modelů tribuny. Modely tribun byly zpracovány ve spolupráci s Ing. Jiřím Hubkou (biatlonový stadion) a Ing. Milošem Hüttnerem, Ph.D. (hokejový stadion a fotbalové stadiony).

3.1 Princip vyhodnocení modálních charakteristik

Vzhledem k tomu, že velikost budící síly v průběhu experimentu nebyla známa, byly z frekvenčních spekter odezvy v jednotlivých sledovaných bodech tribuny \mathbf{k} vyhodnoceny tzv. frekvenční přenosové funkce pro vyhodnocení pracovních tvarů kmitání $ODSH_{\mathbf{kR}}(if)$ (v literatuře se také používá zkratka ODS FRF – Operating Deflection Shapes Frequency Response Function). Funkce $ODSH_{\mathbf{kR}}(if)$ je komplexní skládající se z reálné a imaginární složky a většinou se udává v goniometrickém vyjádření pomocí velikosti (magnitudy) a fáze. Magnituda $ODSH_{\mathbf{kR}}(if)$ je vyjádřena čistě jako magnituda frekvenční funkce kmitání konstrukce $r_{\mathbf{k}}(if)$ (výchyly, rychlosti kmitání, zrychlení) naměřeného v bodě \mathbf{k} . Při vyhodnocení fázového úhlu $\varphi_{\mathbf{k}}$ funkce $ODSH_{\mathbf{kR}}(if)$ je fáze frekvenčního spektra odezvy v bodě \mathbf{k} vztažena k fázi frekvenčního spektra odezvy v referenčním bodě \mathbf{R} .

Protože všechny měřené body konstrukce při experimentu nebyly osazeny ve shodném časovém okamžiku, ale každé měření bylo rozděleno na několik měřicích sestav, a tedy úroveň budících sil v jednotlivých měřicích sestavách nemusela být shodná, byly pro přesnější stanovení tvarů vlastního kmitání stanoveny i funkce Transmisibility $T_{\mathbf{kR}}(if)$. Tato funkce se stanoví obdobně jako klasická přenosová funkce $H_{\mathbf{kR}}(if)$ (v měřítku inertance), pouze funkce budící síly je nahrazena funkcí odezvy v referenčním bodě, kde \mathbf{i} je imaginární jednotka, $\ddot{w}_{\mathbf{k}}(if)$ je odezva konstrukce v měřítku zrychlení v bodě \mathbf{k} zobrazená ve frekvenční oblasti a $\ddot{w}_{\mathbf{R}}(if)$ je odezva konstrukce v měřítku zrychlení v referenčním bodě \mathbf{R} . Při takto sestavených funkcích jsou odezvy konstrukce v jednotlivých měřicích sestavách vzájemně vždy ve stejném poměru bez ohledu na velikost budících sil a pokud jsou známy vlastní frekvence konstrukce, mohou být z těchto funkcí zpřesněny tvary vlastního kmitání. Vyhodnocení frekvencí a tvarů vlastního kmitání bylo provedeno pomocí programu ME'scopeVES firmy Vibrant Technology, Inc.

3.1.1 Měřicí zařízení

Pro všechny experimenty zabývající se získáním vlastních frekvencí tribuny s příslušnými vlastními tvary byly použity přístroje firmy Brüel & Kjær a absolutní snímače zrychlení typu 8344. Snímače byly přichyceny ocelovému přenosnému závaží pomocí neodymových magnetů. Snímače typu 8344 jsou piezoelektrické

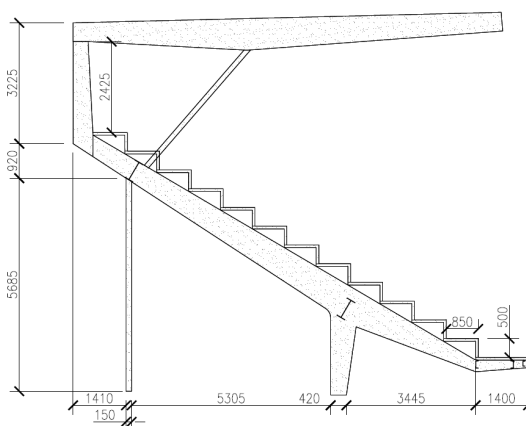
akcelerometry s citlivostí cca 2500 mV/ms^{-2} , frekvenčním rozsahem od 0,2 Hz do 3 kHz. Pracovní teplotní rozsah se pohybuje od -50 do $+100^\circ\text{C}$. Příčná citlivost snímače je menší než 5%. Snímače byly připojeny k měřicí lince 3560 B od firmy Brüel & Kjær s frekvenčním rozsahem měření od 0 Hz až do 25,6 kHz.

3.2 Stadion na Letné

3.2.1 Historie stadionu a stručný popis konstrukce zkoumané tribuny

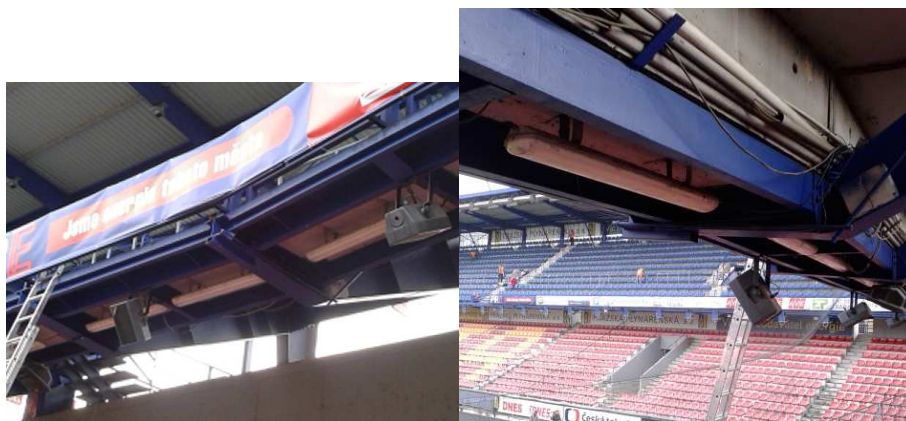
První stadion v Praze na Letné byl postaven v roce 1917. Stadion sloužil a dodnes slouží jako domácí hřiště fotbalovému klubu AC Sparta Praha. První větší rekonstrukcí prošel v roce 1934, kdy vznikla hlavní betonová tribuna umístěná na západní straně stadionu. Další rekonstrukcí prošel stadion v roce 1969, kdy byly postaveny nové tribuny, a celková kapacita stadionu byla 35 880 diváků. Od roku 1994, kdy došlo ke generální přestavbě stadionu, si stadion uchovává dnešní podobu. Samotný experiment probíhal na tribuně, která byla upravena v rámci generální opravy stadionu [25].

Stávající tribuny, na kterých probíhalo měření, mají konstrukci realizovanou pomocí ocelových nosníků, na kterých jsou příčně umístěny betonové desky. Desky tvoří pochozí plochu, na které jsou umístěny sedačky pro diváky. Jelikož ke stadionu neexistuje projektová dokumentace, v rámci experimentu proběhlo i geometrické zaměření nosné konstrukce zkoumané tribuny (Obr. 15) [25].



Obrázek 15: Příčný řez nosnou konstrukcí zkoumané tribuny na stadionu na Letné (zakresleno je pouze horní patro tribuny)





Obrázek 16: Několik pohledů na sledovanou tribunu a její nosnou konstrukci na stadionu na Letné

3.2.2 Provedení experimentu

Měření charakteristik vlastního kmitání probíhalo v rozmezí čtyř ocelových nosníků tribuny. Konstrukce tribuny byla rozdělena na šest podélných řezů a čtyři příčné řezy, ve kterých se sledovala odezva tribuny na budící síly. Rozkmitávání tribuny probíhalo pomocí silových impulzů vyvolaných skákáním dvojice osob, které se postupně střídaly.

3.2.3 Výsledky analýzy

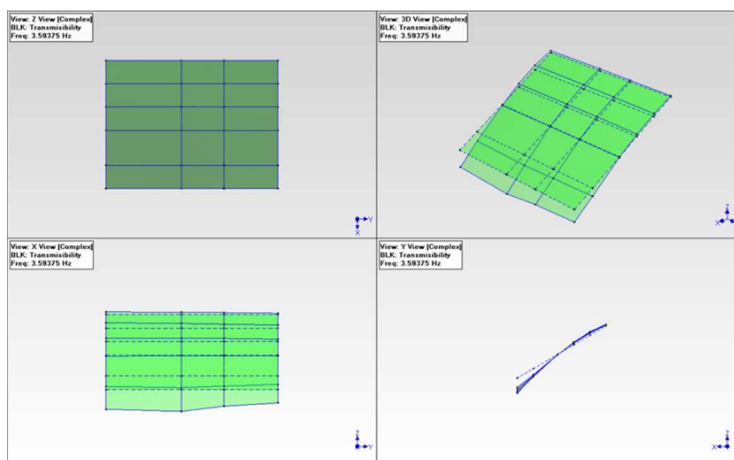
Z výsledků měření byly vyhodnoceny následující vlastní frekvence tribuny.

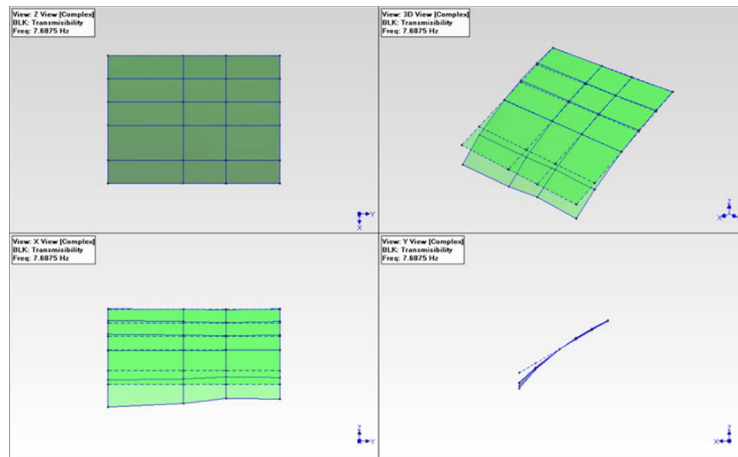
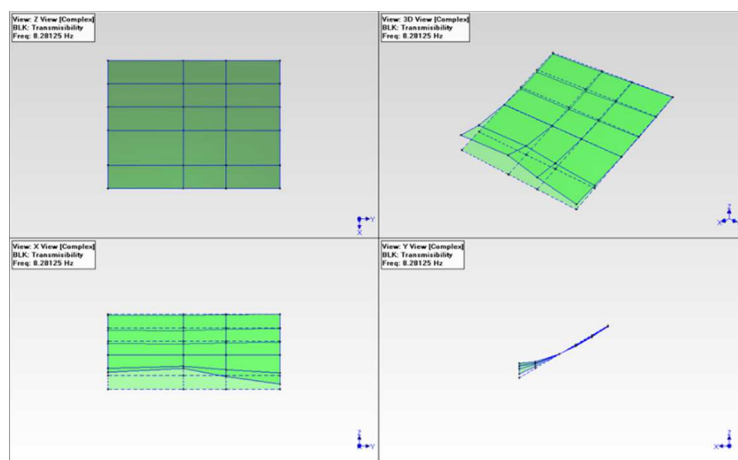
Tabulka 2: Vlastní frekvence tribuny na stadionu na Letné vyhodnocené při experimentu

Číslo frekvence	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Frekvence [Hz]	3,59	7,69	8,28	8,75	10,56	11,28

Na základě výsledků z matematického modelu tribuny bylo určeno, že první frekvence se vztahuje k zastřešení. Jedná se o podobnou situaci jako při experimentu v Polsku [20].

Na následujících obrázcích jsou vykresleny nejzajímavější vlastní tvary konstrukce tribuny.

Obrázek 17: 1. vlastní tvar pro $f_{(1)} = 3,59$ Hz

Obrázek 18: 2. vlastní tvar pro $f_{(2)} = 7,69$ HzObrázek 19: 3. vlastní tvar pro $f_{(3)} = 8,28$ Hz

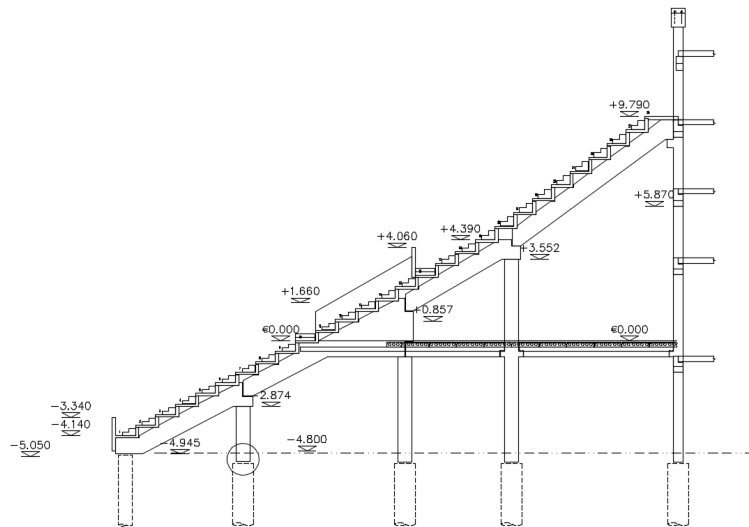
3.3 Stadion v Edenu

3.3.1 Historie stadionu a stručný popis konstrukce zkoumané tribuny

Stávající stadion v Edenu byl otevřen v roce 2008. Jedná se o jeden z nejmladších a nejmodernějších stadionů v České republice. Nosná konstrukce stadionu byla vybudována jako prefabrikovaný železobetonový systém, kde hlavní nosné prvky jsou příčné betonové rámy, na které jsou uloženy železobetonové desky s příčným řezem ve tvaru písmena „L“, které tvoří pochozí konstrukci tribuny. Tuhost v podélném směru stadionu je zabezpečena pomocí výplňového zdiva z dílců ztraceného bednění, které tvoří vnitřní zdi [26].

Zastřešení tribuny je realizováno pomocí ocelové příhradové konstrukce, která je opláštěná na spodní straně kanadským cedrem. Původní stadion v Edenu byl cedrem obložen a obložení má symbolizovat propojení současnosti s historií. Samotná konstrukce střechy je uložena na vnitřní straně stadionu na ocelových sloupech, které jsou ukotveny do horní části tribun, a na vnější straně na obvodových betonových sloupech, které jsou se střechou spojeny pomocí ocelových táhel [26].

Pro potřeby výzkumu poskytla společnost RECOC spol. s r.o. (zpracovatel prováděcí dokumentace stavby) digitální projektovou dokumentaci (Obr. 20).



Obrázek 20: Příčný řez betonovou částí konstrukce stadionu v Edenu, který poskytla firma RECOC spol. s r.o.



Obrázek 21: Pohledy na sledovanou část stadionu v Praze v Edenu a na nosnou konstrukci zkoumané tribuny

3.3.2 Provedení experimentu

Pro potřeby provedení experimentální modální analýzy byla tribuna rozdělena na devět příčných řezů a devět podélných řezů. Po vyměření sítě bodů, ve kterých bylo měření realizováno, se snímače postupně umísťovaly do jednotlivých uzlových bodů, ve kterých proběhlo měření zrychlení tribuny. Budící síla použitá k rozkmitávání tribuny byla obdobná jako na stadionu na Letné. Budící silové impulzy v budícím bodu byly vyvolávány skákáním dvojice osob, které s postupně střídaly.

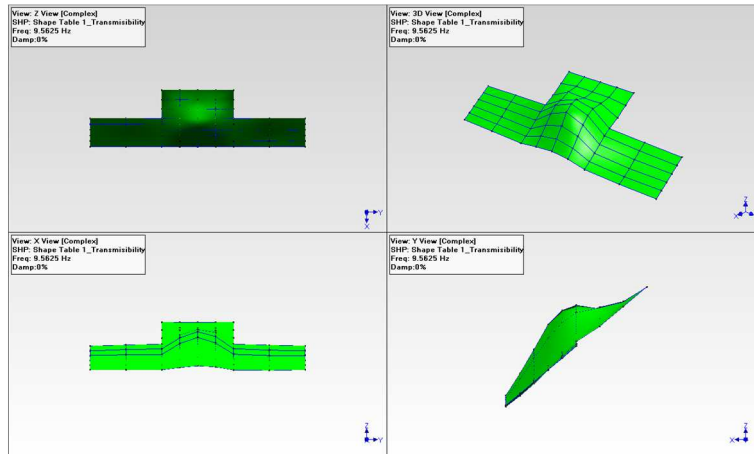
3.3.3 Výsledky experimentální modální analýzy

V rámci měření byly zjištěny následující vlastní frekvence tribuny.

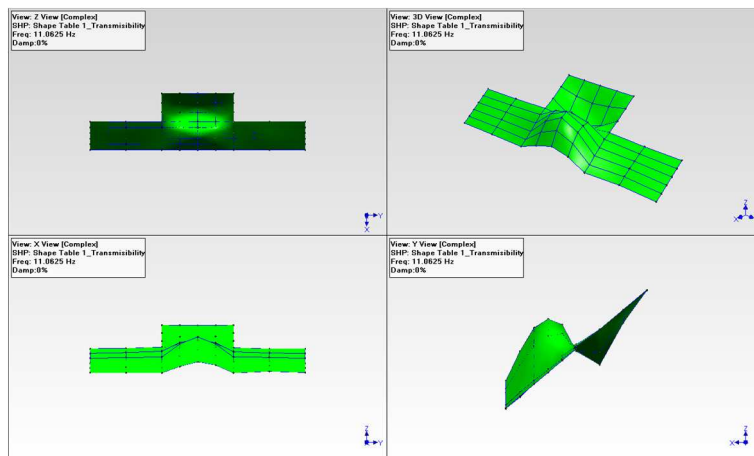
Tabulka 3: Vlastní frekvence tribuny na stadionu v Praze v Edenu vyhodnocené z experimentu

Číslo frekvence	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Frekvence [Hz]	9,56	11,06	12,72	13,47	15,41	17,19

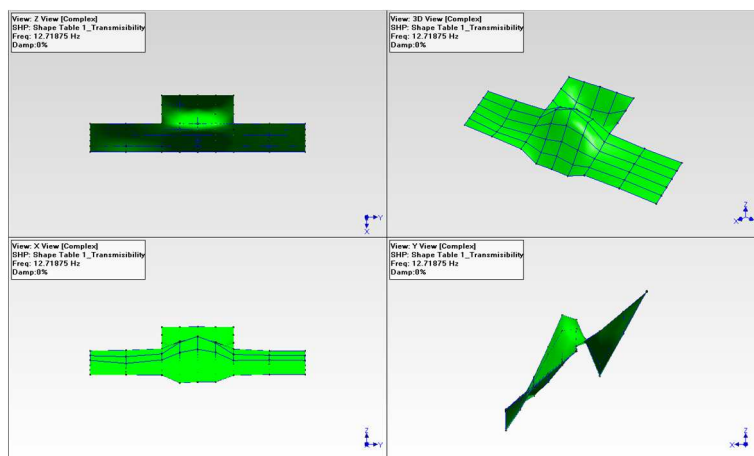
Na následujících obrázcích jsou vykresleny nejzajímavější vyhodnocené vlastní tvary zkoumané části tribuny.



Obrázek 22: Vlastní tvar pro $f_{(1)} = 9,56$ Hz



Obrázek 23: Vlastní tvar pro $f_{(2)} = 11,06$ Hz

Obrázek 24: Vlastní tvar pro $f_{(3)} = 12,72$ Hz

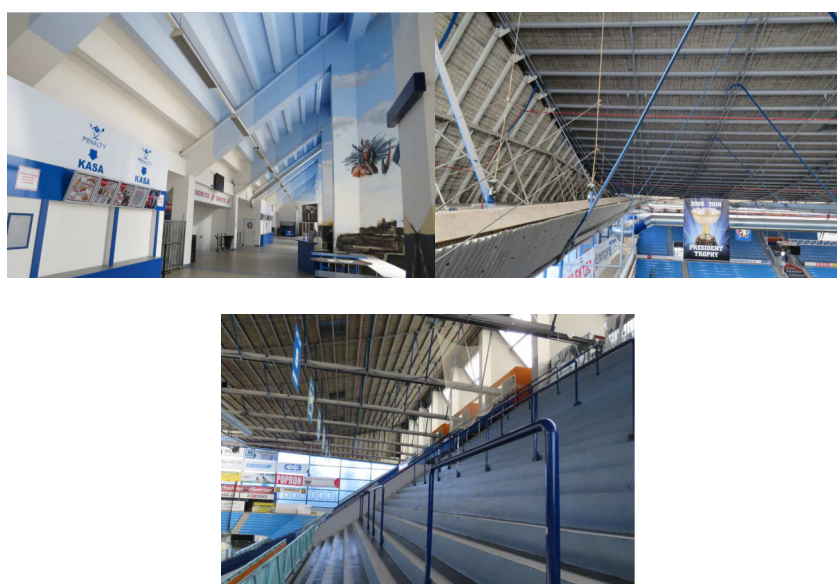
3.4 Stadion v Plzni

3.4.1 Historie stadionu a stručný popis nosné konstrukce zkoumané tribuny

Zimní stadion v Plzni byl postaven v roce 1950 jako nekrytá hokejová hala s umělou ledovou plochou. V roce 1969 byla dokončena rekonstrukce stadionu, která spočívala v přestavbě tribun a realizaci zastřešení. Stadion od 70. let neprošel výraznou přestavbou, pouze docházelo k dílčím úpravám a renovacím jeho konstrukcí (Obr. 25).

Konstrukce stadionu je tvořena železobetonovým prostorovým skeletem. Příčné vazby se skládají ze sloupů a šikmých průvlaků, na kterých jsou uloženy jednotlivé železobetonové desky s příčným řezem ve tvaru písmene „L“, které tvoří pochozí plochu tribuny. Střešní konstrukce je visutá, nosná lana střechy jsou kotvena do obvodových betonových sloupů.

Jelikož ke stadionu neexistuje projektová dokumentace, v rámci realizace experimentu proběhlo i geometrické zaměření nosné konstrukce sledované části tribuny [28].



Obrázek 25: Pohled na nosnou konstrukci zkoumané tribuny na stadionu v Plzni a na nosnou konstrukci jeho střechy

3.4.2 Provedení experimentu

Uspořádání experimentu bylo obdobné jako u předchozích dvou stadionů. Opětovně došlo k rozdělení sledované části tribuny na šest podélných a devět příčných řezů. Následně se měřilo zrychlení tribuny v uzlových bodech této sítě. Jako zdroj budící síly (silových impulzů) opětovně posloužila dvojice osob, které střídavě skákaly v budícím bodu tribuny.

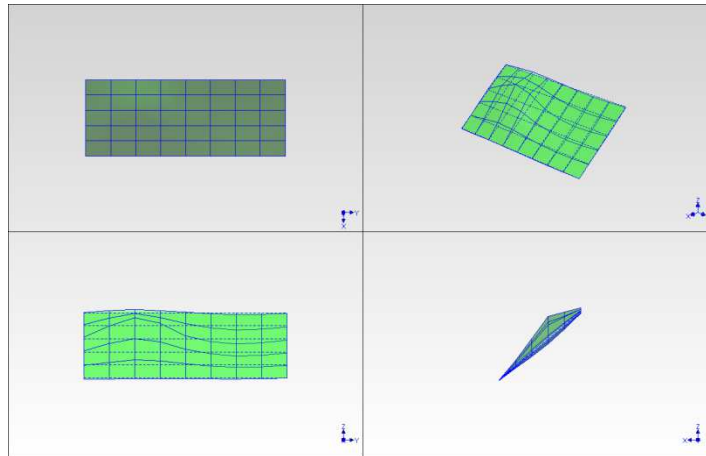
3.4.3 Výsledky analýzy

V rámci měření byly zjištěny následující vlastní frekvence tribuny.

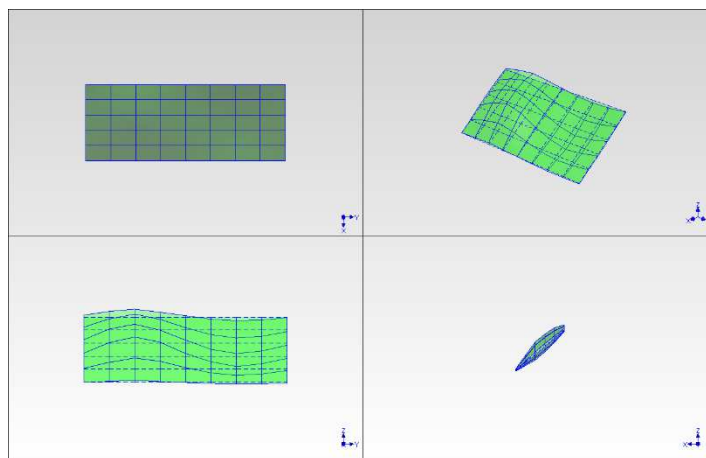
Tabulka 4: Vlastní frekvence sledované části tribuny na zimním stadionu v Plzni vyhodnocené z experimentu

Číslo frekvence	1.	2.	4.	5.	6.	7.
Frekvence [Hz]	16,13	18,00	22,38	24,50	28,44	29,10

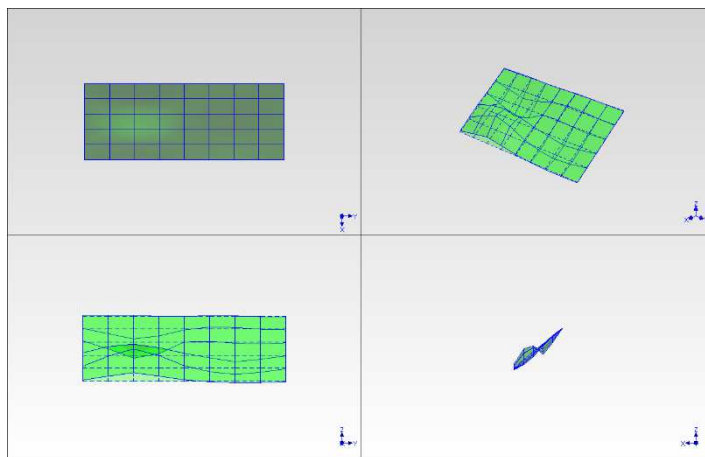
Na následujících obrázcích jsou vykresleny nejzajímavější vyhodnocené vlastní tvary zkoumané části tribuny.



Obrázek 26: Vlastní tvar pro $f_{(1)} = 16,13$ Hz



Obrázek 27: Vlastní tvar pro $f_{(2)} = 18,00$ Hz

Obrázek 28: Vlastní tvar pro $f_{(3)} = 22,38$ Hz

3.5 Stadion v Novém Městě na Moravě

3.5.1 Historie areálu a stručný popis nosné konstrukce sledované tribuny

Areál sportoviště byl prvotně vybudován koncem 19. století, kdy vznikl Bruslařský klub v Novém Městě na Moravě. V roce 1910 byly v prostoru sportoviště prvně pořádány závody na lyžích – konkrétně běh na 10 km. Od tohoto roku se zde každoročně pořádaly závody na lyžích. Současná podoba areálu vznikla v letech 2012 až 2013 pro potřeby konání mistrovství světa v biatlonu. Areál se skládá z běžeckých tras, administrativního centra, střelnice a železobetonové tribuny naproti střelnici. Pro potřeby konání významnějších závodů je kapacita areálu zvyšována pomocí mobilních montovaných tribun až o dalších 20 000 diváků.

Jako podklad pro experiment a jeho vyhodnocení posloužila projektová dokumentace poskytnutá společností PERI spol. s r.o., která zajišťovala kompletně dodávku montovaných tribun pro závody světového poháru v biatlonu konané v aréně v prosinci 2016. Montované tribuny byly realizovány ze systémového řešení PERI UP Rosett Flex. Jedná se o soustavu sloupků ($\text{Ø}48,3 \times 3,2$), které jsou vybaveny čtvercovými rozetami sloužící k uchycení (zaháknutí) vodovodních prvků. Vodorovné prvky mají rozměry $60 \times 30 \times 2$ mm. Celá konstrukce je ztužena pomocí diagonál ($\text{Ø}42,4$). Konstrukce je osazena ocelovými perforovanými podlázkami, které tvoří pochozí povrch tribuny (Obr. 29) [7].

Nosná konstrukce sledované části montované tribuny (segmentu) se v příčném směru skládala z 23 řad sloupků (5. sloupků v každé řadě) a z konzolové části ve výšce 6,5 m nad terénem, která byla vyložena 2,5 m. Celková výška konstrukce byla 13,5 m, délka sledované části tribuny byla 28,0 m a její šířka segmentu byla 8,5 m. Konstrukce byla zavětrována pomocí diagonál. Tribuna byla spojena se sousedním segmentem pomocí schodišťových segmentů. Konstrukce tribuny byla uložena na dřevěných roznášecích prvcích, které ležely na zemině, asfaltové cestě nebo na zpevněném podkladu [7].



Obrázek 29: Pohled na nosné prvky sledované ocelové montované tribuny

3.5.2 Provedení experimentu

Pro potřeby realizace a vyhodnocení experimentu byl na tribuně zvolen souřadný systém x, y, z (Obr. 30). V těchto směrech byly následně vyhodnoceny vlastní frekvence a vlastní tvary.



Obrázek 30: Směr zvolených os konstrukce [7]

Konstrukce zkoumané části tribuny byla rozdělena na 25 podélných řezů a 5 příčných, kde se sledovala odezva tribuny na budící sílu. Kmitání tribuny bylo způsobováno vodorovnými silovými impulzy, které byly vyvolávány klepáním pryžové palice do vybraného sloupku tribuny v referenčním bodu.

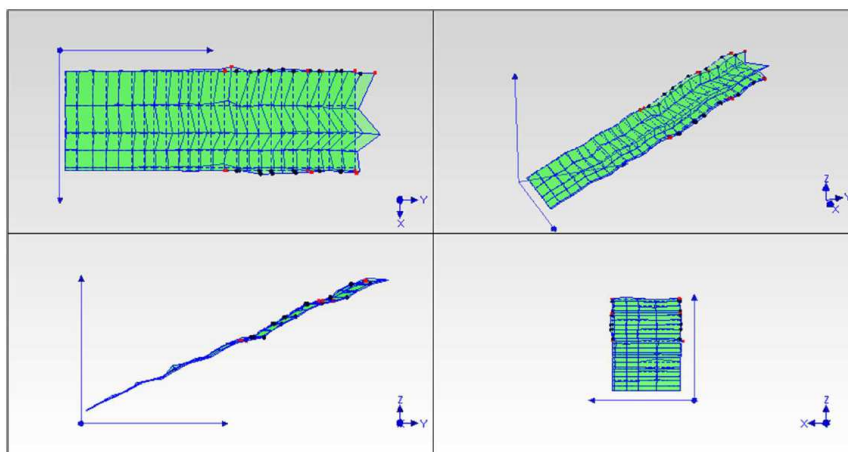
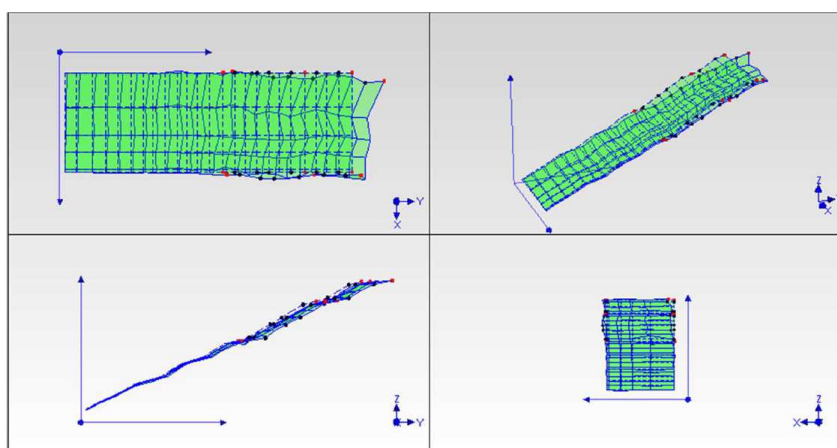
3.5.3 Výsledky experimentální modální analýzy

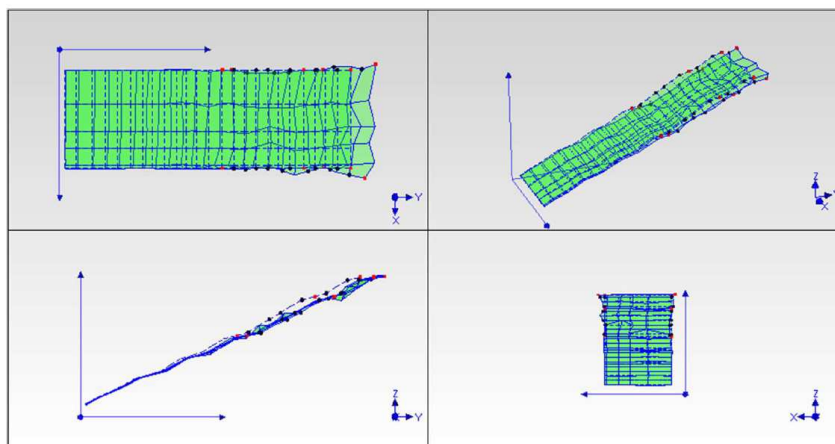
V rámci experimentu bylo vyhodnoceno devět vlastních frekvencí.

Tabulka 5: Vlastní frekvence nosné konstrukce sledované montované tribuny vyhodnocené z naměřených dat [7]

Číslo frekvence	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	6,90

Na následujících obrázcích jsou vykresleny nejzajímavější vyhodnocené vlastní tvary zkoumané části tribuny.

Obrázek 31: Vlastní tvar $f_{(1)} = 3,00$ Hz [7]Obrázek 32: Vlastní tvar $f_{(2)} = 3,22$ Hz [7]

Obrázek 33: Vlastní tvar $f_{(3)} = 3,45$ Hz [7]

4. Chování diváků

4.1 Úvodní informace

Abychom byli schopni popsat vibrace způsobené davem diváků, musíme nejdříve pochopit chování fanoušků při sportovní akci. Toto chování se v posledních dvou stoletích postupně vyvíjelo v souvislosti se změnami společnosti. Chování diváků je také závislé na aktuální situaci na sportovním kolbišti. V dlouhodobém časovém horizontu se z pasivních diváků, kteří pouze seděli nebo stáli a pasivně pozorovali sportovní utkání, stávají diváci aktivní. První výraznější změnou chování fanoušků byla tzv. „mexická vlna“ (ukázka je na Obr. č. 34), která pravděpodobně vznikla v Severní Americe. Nicméně není přesně známo, kdy a kde se poprvé objevila, ale do celosvětového povědomí se dostala během fotbalového mistrovství světa 1986 v Mexiku [21,22]. Při mexické vlně vytvářejí diváci živou choreografii na stadionu pro podporu fotbalových hráčů. Při mexické vlně diváci postupně vstávají ze svých sedaček, aby mávli rukama nad hlavou, a následně si opětovně sedli na svoje místo. Tehdy se tento typ chování začal ze Severní Ameriky šířit do dalších částí světa. Další významná změna v chování diváků nastává v 90. letech 20. století. Diváci tehdy začali po vzoru hudebních koncertů skákat na tribunách a poskoky povzbuzovat svůj tým. V České republice se skákání diváků na tribunách intenzivněji rozšířilo při mistrovství světa v ledním hokeji v roce 2004. Fanouškové tenkrát začali povzbuzovat český národní tým pomocí sloganu „Kdo neskáče, není Čech – Hop! Hop! Hop!“. Neaktivnější diváci začali na stadionech pravidelně skákat a zároveň vybízet ostatní diváky, aby se přidali. Chování, při kterém fanouškové skákejí, se následně rozšířilo z podpory reprezentace na klubovou úroveň, kdy diváci tímto chováním povzbuzují vlastní tým. Jeden z typů chování, který se časem vytratil, bylo povzbuzování používané na fotbalových stadionech za první republiky. Sedící diváci během zápasu začali v sedě dupat, tleskat a skandovat „TEMPO, TEMPO...“. Tento druh chování se v současné době téměř vůbec nevyskytuje.



Obrázek 34: Ukázka principu Mexické vlny, obrázek byl převzat ze zdroje [23]

Chování davu fanoušků při povzbuzování jejich oblíbeného týmu je rozdílné od běžného chování jedinců. Na stadionu člověk snadno podlehne davové psychóze. Z těchto důvodů je nezbytné řešit chování diváků v daném sektoru jako celek nikoliv každého fanouška samostatně. Diváci se zároveň začali postupem času rozdělovat na dvě části. Největší část diváků představují tzv. běžní diváci, kteří svůj tým podporují pomocí potlesku a ojedinele se zapojují do choreografie a poskakování. Druhou část diváků tvoří fanatičtí fanouškové, kteří vytvářejí atmosféru na stadionech, intenzivně povzbuzují, ale zároveň způsobují problémy svým chováním – perou se, přinášejí pyrotechniku, občas rasisticky urážejí hráče a v krajním případě jejich chování vede k ukončení

sportovního utkání. Tito fanoušci se nazývají „ULTRAS“, shromažďují se v určité části stadionu (tzv. „kotli“), formují se často z pravicových extrémistů. Svým chováním dokážou strhnout celý stadion, ostatní fanouškové se přizpůsobují jejich stylu fandění. ULTRAS mají přísnou hierarchii. Vždy mají svého lídra, který pomocí přenosného hlásiče řídí „kotel“, rozhoduje, jak se v daný okamžik bude fandit. Pomocníkem lídra jsou bubeníci. Bubeníci k vybranému typu chování udávají rytmus. Jelikož je použit buben, dochází poměrně rychle k synchronizaci pohybů fanoušků v celém sektoru tribuny a leckdy i na celém stadionu.

Při zkoumání chování diváků v rámci této disertační práce byly vysledovány následující základní kategorie chování fanoušků během sportovních událostí: [40,45]

- Statické chování (Static state)
- Chůze a běh (Walking and Running)
- Tleskání (Hand-Clapping)
- Skákání (Jumping)
- Pohupování (Bouncing/Bobbing/Jouncing)
- Kymáčení (Swaying)
- Mexická vlna (Mexican Wave)
- Vstřelení branky (Goal scoring)

4.1.1 Popis jednotlivých typů chování diváků

Statické chování (Static state): Fanouškové nevydrží aktivně povzbuzovat svůj tým během celého utkání. V průběhu zápasu nastanou chvíle, kdy fanoušci odpočívají, na stadionu je „téměř“ ticho a diváci pouze pasivně stojí a sledují zápas. [40,41,45]

Chůze a běh (Walking and Running): Jedná se o typické pohyby člověka. Tento typ chování nastává při příchodu diváků do daného sektoru stadionu a při jeho opouštění. Diváci opouštějí sektor zejména z důvodu občerstvení o přestávkách a v krajním případě při bojkotu, když demonstrativně odejdou ze sektoru pryč v průběhu sledovaného utkání. V jihoamerických zemích je tento typ chování využíván při oslavách gólů. Diváci jsou shromážděni v horní části tribuny, kde stojí a fandí, potom při vstřelení branky běží přes celý sektor k hřišti. [40,41,45]

Tleskání (Hand-Clapping): Potlesk je nejběžnějším typem chování diváků na stadionech. Jedná se o přirozený pohyb člověka, který se učí od dětských let. U stojících diváků při potlesku dochází k přirozenému pohupování v kolenou. Postesk není konstantní chování. V rámci tohoto chování dochází většinou ke změně rytmiky, v závislosti na aktuální situaci v hledišti či na hřišti. Při experimentech byly zaznamenány 3 druhy potlesků:

1. typ: Jedná se o běžný typ potlesku. Při tomto typu zůstávají ruce během potlesku trvale na úrovni hrudníku.
2. typ: Tleskání začíná na úrovni hrudníku a následně se ruce vzpaží nad hlavu do písmene „V“.
3. typ: Celý potlesk se odehrává s nataženýma rukama. Potlesk začíná na úrovni ramenou, poté diváci ruce postupně zvedají, následně je tleskání dokončeno s rukama nad hlavou.

Skákání (Jumping): Druhů skákání je více. Během experimentů byly zaznamenány a popsány 4. druhy skákání: [40,41,45]

- 1. typ: Jedná se o skákání jednotlivců bez fyzického kontaktu s jinými fanoušky. Nejčastěji se vyskytuje mezi běžnými diváky, kteří se aktivují skandováním např.: „Kdo neskáče, není Čech. HOP! HOP! HOP!“ Slogan se používá v různých variacích, kde se slovo Čech nahrazuje konkrétním názvem fanouška určitého klubu, např. podporovatelé Sparty Praha používají slovo Sparťan.
- 2. typ: Do České republiky se tento typ rozšířil z německých zemí. Nejčastěji se tento typ vyskytuje v „kotli“. Jedná se o skákání celých řad najednou. Diváci se chytí kolem ramen a začnou skákat na místě ve svislém směru. Při tomto typu chování dochází poměrně rychle k synchronizaci jednotlivých řad a následně celého sektoru stadionu.
- 3. typ: Tento typ je podobný 2. typu. Rozdíl spočívá v pohybu jednotlivých řad. Na rozdíl od předchozího typu diváci neskáčou na místě, ale celé řady se posouvají zprava doleva a zpět ve vodorovném směru. Navíc směry jednotlivých řad se střídají. Například liché řady skáčou doleva, sudé řady doprava.
- 4. typ: Posledním typem skákání, který byl pozorován, je typ „sedni a vyskoč (Sit and Jump)“. Všichni diváci v sektoru se na pokyn lídra „kotle“ posadí a na jednotný povel vyskočí a následně pokračují ve skákání způsobem popsáním výše jako 1. typ.

Pohupování (Bouncing/Bobbing/Jouncing): Jedná se o podobný typ chování, jako skákání jednotlivců (1. typ). Rozdíl spočívá v tom, že při pohupování v kolenou chodidla neopouští podložku (pochozí povrch tribuny). Při pohupování se člověk daleko lépe dokáže synchronizovat s kmitáním tribuny. [40,41,45]

Kymácení (Swaying): Jak název chování napovídá, vzniká kymácením diváků. Kymácení se hojně využívá v Severní Americe, kde se diváci kymácejí ze strany na stranu. Pohyb by se dal přirovnat k úvodnímu rituálu v Sumu. Diváci se lehce předkloní, nohy roztáhnou na úroveň ramen a zhoupnou se do strany tak, že jedna noha vždy pustí podložku (tribunu). Občas se při kymácení drží kolem ramen. Nicméně tento způsob chování diváků nebyl při popisovaných experimentech z České republiky zaznamenán. V této práci je pod pojmem kymácení myšlen způsob skandování, kdy diváci stojí a s jednou dopředu nataženou rukou se kymáčí dopředu a dozadu. Tento způsob je diváky zpravidla používán během sporných situací na hřišti a při vyvolávání hráčů. [40,41,45]

Mexická vlna (Mexican Wave): Mexická vlna je typem chování, který v sobě spojuje typy pohupování, kymácení a skákání (4. typ – „sedni a vyskoč“). Tento druh chování bývá uskutečňován na úplně celém stadionu. Jelikož diváci v „kotli“ převážně stojí, v tomto sektoru je „mexická vlna“ realizována pouhým zvednutím rukou nad hlavu, tudíž se jedná o typ chování někde mezi kymácením a pohupováním. [40,41,45]

Vstřelení gólů (Goal scoring): Jedná se o typ, který se nachází někde mezi skákáním, pohupováním, kymácením a potleskem. Nedá se zařadit přesně do předchozích kategorií a vždy trvá velmi krátce. [40,41,45]

4.2 Chování diváků během sledovaných sportovních událostí

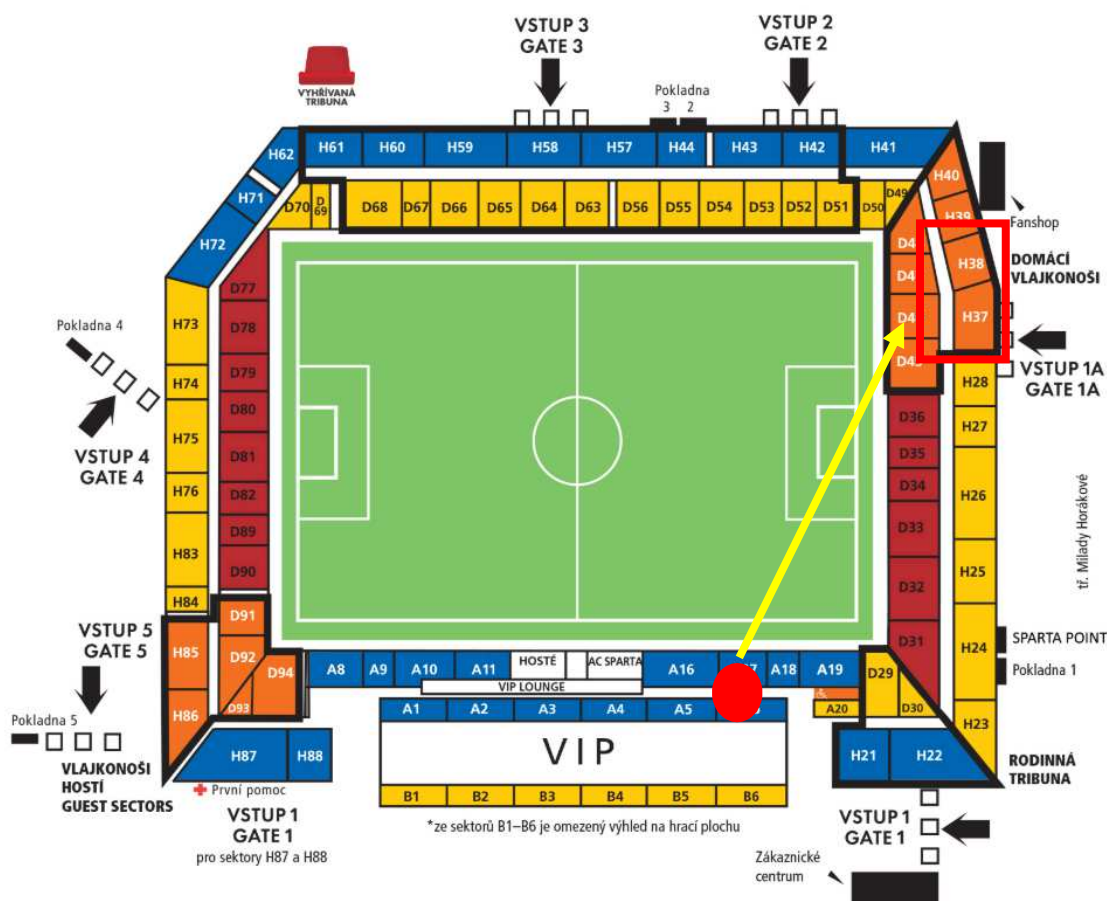
Během výzkumu se sledovalo chování diváků na čtyřech stadionech. Při fotbalových a hokejových utkáních se vždy sledovalo chování nejaktivnějších diváků, tzv. ULTRAS, kteří byly shromážděni v „kotli“. Na jaře 2015 bylo sledováno chování fanoušků fotbalového klubu AC Sparta Praha. Na jaře 2016 se experiment zaměřil na diváky fotbalového klubu SK Slavia Praha. V sezoně 2015/2016 bylo zkoumáno chování diváků

hokejového týmu HC ŠKODA Plzeň. Experiment byl ukončen během závodů Světového poháru v biatlonu v Novém Městě na Moravě, které se uskutečnily 17. a 18. 12. 2016.

Na každém sledovaném stadionu byla umístěna kamera, která snímala vybraný sektor zkoumané tribuny po celou dobu jednotlivých sportovních událostí zahrnutých do experimentu. Následně z jednotlivých pořízených videozáznamů proběhlo vizuální vyhodnocení chování diváků. Při základním zpracování byla vyhodnocována doba trvání jednotlivých typů chování a počet jejich výskytů při jednotlivých událostech. Ve vybraných zápasech proběhlo i vyhodnocení aktivity a pasivity diváků při různých typech chování.

4.2.1 Utkání fotbalového klubu AC Sparta Praha v průběhu jara 2015

AC Sparta Praha hraje svoje utkání na stadionu v Praze na Letné. Stadion na Letné má kapacitu 18 887 diváků. Kamera byla umístěna na novinářské lávce, ze které zabírala sektor s ULTRAS, tj. „kotel“. Vzdálenost mezi „kotlem“ a lávkou byla přibližně 100 m (Obr. 35).



Obrázek 35 - Plánek stadionu Letná převzatý z [25] s vyznačenou polohou kamery a sledovaného sektoru

Během experimentu bylo sledováno a vyhodnoceno celkem 5 zápasů nejvyšší české fotbalové ligy (v daném ročníku se nazývala „Synot liga“). V sezoně 2014/2015 bylo cílem AC Sparty Prahy opětovně vyhrát celou soutěž. Po podzimní části byl tým na druhém místě a vedení klubu vyhlášovalo útok na první místo. V půlce jarní sezony, po prohře ve 24. kole, se šance na titul snížila a započal boj nespokojených fanoušků s vedením sportovního klubu. Definitivní naděje na titul AC Sparta ztratila ve 27. kole, kdy došlo k domácí prohře

s pozdějším mistrem ligy, mužstvem FC Viktoria Plzeň. Při tomto utkání byla realizace experimentu vedením klubu zakázána z bezpečnostních důvodů. [32,33]

Ve sledovaných zápasech vždy domácí vyhráli, kromě posledního kola, kdy došlo k remíze s městským rivalem FC Bohemians Praha 1905. [32,33]

V následující tabulce jsou zaznamenány počty diváků přítomných na jednotlivých sledovaných utkáních.

Tabulka 6: Počet diváků přítomných na stadionu na Letné při sledovaných utkáních

Kolo Synot ligy	Tým	Celková návštěva na stadionu	Návštěvnost stadionu [%]	Počet diváku - sledovaný sektor	Obsazenost sektoru [%]	Poměr počtu diváků na stadionu/ vůči sledovanému sektoru [%]
19.	FK Dukla Praha	8638	45,7	355	154,0	4,1
21.	FK Teplice	8502	45,0	324	115,7	3,8
25.	FC Zbrojovka Brno	7811	41,4	145	98,6	1,9
28.	1. FC Slovácko	5705	30,2	53	18,9	0,9
30.	Bohemians Praha 1905	9330	49,4	122	69,7	1,3

Z výsledků uvedených v tabulce 6 je vidět, že obsazenost sledovaného sektoru 154,0 % odpovídá realitě. Do sektoru tehdy přešli diváci z jiných sektorů stadionu, a proto počet přítomných fanoušků byl cca o 54 % větší než počet sedadel v sektoru.

4.2.1.1 Záznamy chování diváků během jednotlivých zápasů

Tabulka 7: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha - FC Dukla Praha 8. 3. 2015

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	6:16	13,3	5:24	12,8	3:27	12,9	15:07	13,0
2.	Chůze	-	-	-	-	17:20	64,9	17:20	14,9
3.	Skákání - 1. typ	2:12	4,7	2:38	5,8	1:27	5,4	6:07	5,3
4.	Skákání – 2. typ	1:44	3,7	-	-	-	-	1:44	1,5
5.	Skákání – 3. typ	-	-	1:19	3,1	-	-	1:19	1,1
6.	Skákání – 4. typ	1:23	2,9	1:02	2,4	-	-	2:25	2,1
7.	Pohupování	2:48	6,0	14:49	35,0	0:48	3,0	18:25	15,9
8.	Kymáčení	20:26	43,4	3:04	7,2	-	-	23:30	20,2
9.	Tleskání – 1. typ	10:14	21,7	13:42	32,4	2:45	10,3	26:41	23,0
10.	Tleskání – 2. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
11.	Tleskání – 3. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
12.	Vstřelení branky	1:37	3,4	0:33	1,3	-	-	2:10	1,9
13.	Mexická vlna	0:24	0,9	-	-	0:56	3,5	1:20	1,2

Tabulka 8: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha - FK Teplice 21. 3. 2015

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	13:58	30,4	7:48	16,3	2:55	41,9	24:41	24,5
2.	Chůze	-	-	-	-	0:41	9,8	0:41	0,7
3.	Skákání - 1. typ	3:13	7,0	2:54	6,1	-	-	6:07	6,1
4.	Skákání – 2. typ	0:46	1,7	0:05	0,2	-	-	0:51	0,8
5.	Skákání – 3. typ	-	-	0:59	2,0	-	-	0:59	1,0
6.	Skákání – 4. typ	0:22	0,8	-	-	-	-	0:22	0,4
7.	Pohupování	1:02	2,3	5:02	10,5	-	-	6:04	6,0
8.	Kymáčení	5:21	11,7	2:55	6,1	0:55	13,2	9:11	9,1
9.	Tleskání – 1. typ	12:29	27,2	9:39	20,1	1:32	22,0	23:40	23,5
10.	Tleskání – 2. typ	0:18	0,7	8:47	18,3	0:35	8,4	9:40	9,6
11.	Tleskání – 3. typ	7:49	17,0	8:47	18,3	0:35	8,4	15:11	15,1
12.	Vstřelení branky	0:13	0,5	1:57	4,1	-	-	2:10	2,2
13.	Mexická vlna	0:22	0,8	0:30	1,0	0:20	4,8	1:12	1,2

Tabulka 9: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha – FC Zbrojovka Brno 26. 4. 2015

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	11:01	23,6	9:55	26,5	2:26	12,6	23:52	22,2
2.	Chůze	-	-	-	-	17:56	77,3	17:56	16,7
3.	Skákání - 1. typ	-	-	1:35	4,2	-	-	1:35	1,5
4.	Skákání – 2. typ	0:49	1,8	0:51	2,3	-	-	1:40	1,6
5.	Skákání – 3. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
6.	Skákání – 4. typ	0:56	2,0	-	-	-	-	0:56	0,9
7.	Pohupování	2:58	6,3	2:13	6,0	-	-	5:11	4,8
8.	Kymáčení	5:35	12,0	3:52	10,3	1:30	6,5	10:57	10,2
9.	Tleskání – 1. typ	6:48	14,5	1:21	3,6	0:11	0,8	8:20	7,8
10.	Tleskání – 2. typ	5:57	12,7	4:37	12,3	-	-	10:34	9,8
11.	Tleskání – 3. typ	9:57	21,3	10:30	28,0	0:18	1,3	20:45	19,3
12.	Vstřelení branky	1:29	3,2	1:53	5,0	-	-	3:22	3,1
13.	Mexická vlna	1:16	2,7	0:41	1,8	0:21	1,5	2:18	2,1

Tabulka 10: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha - 1. FC Slovácko 15. 5. 2015

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	19:56	45,5	15:11	39,1	6:25	19,5	41:32	36,0
2.	Chůze	-	-	-	-	22:17	67,8	22:17	19,3
3.	Skákání - 1. typ	-	-	0:33	1,4	0:24	1,22	0:57	0,8
4.	Skákání – 2. typ	-	-	0:57	2,5	-	-	0:57	0,8
5.	Skákání – 3. typ	-	-	0:25	1,1	-	-	0:25	0,4
6.	Skákání – 4. typ	-	-	0:55	2,4	-	-	0:55	0,8
7.	Pohupování	2:29	5,7	0:46	2,0	0:55	2,8	4:10	3,6
8.	Kymáčení	5:42	13,0	2:35	6,7	1:47	5,4	10:04	8,7
9.	Tleskání – 1. typ	1:14	2,8	1:45	4,5	0:09	0,5	3:08	2,7
10.	Tleskání – 2. typ	3:58	9,1	3:28	9,0	-	-	7:26	6,4
11.	Tleskání – 3. typ	7:32	17,2	11:30	29,61	0:56	2,8	19:58	17,3
12.	Vstřelení branky	2:07	4,8	0:45	2,0	-	-	2:52	2,5
13.	Mexická vlna	0:48	1,8	-	-	-	-	0:48	0,7

Tabulka 11: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha – Bohemians Praha 1905 30. 5. 2015

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	11:57	27,3	7:49	20,1	4:13	12,8	23:59	20,8
2.	Chůze	-	-	-	-	16:09	49,1	16:09	14,0
3.	Skákání - 1. typ	1:38	3,7	3:13	8,3	1:07	3,4	5:58	5,2
4.	Skákání – 2. typ	0:21	0,8	-	-	-	-	0:21	0,3
5.	Skákání – 3. typ	0:43	1,6	-	-	-	-	0:43	0,6
6.	Skákání – 4. typ	0:16	0,6	0:21	0,9	-	-	0:37	0,5
7.	Pohupování	0:39	1,5	2:39	6,8	1:30	4,6	4:48	4,2
8.	Kymácení	7:00	16,0	8:59	23,1	1:34	4,8	17:33	15,2
9.	Tleskání – 1. typ	7:44	17,7	4:20	11,2	0:42	2,1	12:46	11,1
10.	Tleskání – 2. typ	-	-	8:22	21,6	-	-	8:22	7,2
11.	Tleskání – 3. typ	13:49	31,6	8:59	23,1	1:04	3,2	23:52	20,7
12.	Vstřelení branky	0:31	1,2	0:35	1,5	-	-	1:06	1,0
13.	Mexická vlna	1:33	3,5	0:33	1,4	-	-	2:06	1,8

4.2.1.2 Určení poměru aktivních a pasivních diváků

Poměr aktivních a pasivních diváků byl vyhodnocován pouze v jednom zápase. Jednalo se konkrétně zápas AC Sparta Praha – 1. FC Slovácko, který se konal dne 15. 5. 2015. V tabulce (Tab. 12) je popsáno minimální zapojení diváků, maximální zapojení diváků a průměrné zapojení diváků do jednotlivých typů chování.

Tabulka 12: Vyhodnocení poměru mezi aktivními a pasivními diváky během vybraného zápasu

	Typy chování diváků	Minimální	Maximální	Průměrné
		zapojení diváků	zapojení diváků	zapojení diváků
		[%]	[%]	[%]
1.	Statické chování	52,4	100	90,1
2.	Chůze	-	100	100
3.	Skákání - 1. typ	68,7	88,4	80,6
4.	Skákání – 2. typ	89,8	93,9	91,2
5.	Skákání – 3. typ	-	89,8	89,8
6.	Skákání – 4. typ	94,6	100	97,3
7.	Pohupování	51,7	84,4	72,5
8.	Kymáčení	50,3	95,2	71,8
9.	Tleskání – 1. typ	53,7	97,3	77,0
10.	Tleskání – 2. typ	74,8	94,6	86,7
11.	Tleskání – 3. typ	52,4	95,9	84,2
12.	Vstřelení branky	80,3	100	93,5
13.	Mexická vlna	69,4	85	78,3

4.2.1.3 Zhodnocení

Z výsledků je vidět typické chování diváků. Návštěvnost zápasů v průběhu sezony vždy klesá, pokud se týmu nedaří podle představ fanoušků. V případě Sparty se tehdy jednalo o ztrácející se naději na získání titulu. Naprosto dominantním způsobem povzbuzování byl potlesk (všechny typy) a statické chování. Tímto chováním se diváci chovali až v polovině času na stadionu. Z pohledu vibrací tribuny (viz. kapitola 5) je nejvýraznějším chováním skákání. V každém sledovaném zápase se skákání vyskytlo a průměrné zapojení aktivních diváků bylo přes 80,6%.

4.2.2 Utkání fotbalového klubu SK Slavia Praha v průběhu jara 2016

SK Slavia Praha hraje svoje utkání na stadionu v Praze v Edenu. Stadion patří mezi nejmodernější a největší v České republice s kapacitou 19 370 diváků. Kamera byla při sledovaných zápasech opět umístěna na novinářské lávce, ze které zabírala sektor s ULTRAS v tzv. „kotli“. Vzdálenost mezi „kotlem“ a lávkou byla přibližně 60 m (Obr. 36) [26].



Obrázek 36: Plánek stadionu v Edenu převzatý z [27] s vyznačenou polohou kamery a sledovaného sektoru

Během experimentu byly sledovány a vyhodnoceny celkem 4 zápasy nejvyšší české fotbalové ligy v jarní části sezony 2015/2016. Jarní část byla fanoušky Slavie velmi očekávaná, jelikož v podzimní části byl odvrácen bankrot týmu a do klubu vstoupili noví sponzoři, kteří se zavázali investovat prostředky do hráčského kádru. Tento impuls navnadil diváky, kteří ve větším počtu začali povzbuzovat svůj tým přímo na stadionu. Od 21. kola se tým nacházel na 5. příčce tabulky, kterou si udržel až do konce sezony. Ve sledovaných zápasech SK Slavia vyhrála 3 zápasy a pouze s jeden s mužstvem FK Teplice remizovala. [34,35]

V následující tabulce jsou zaznamenány počty diváků přítomných na jednotlivých sledovaných zápasech.

Tabulka 13: Počet diváků přítomných na stadionu v Edenu při sledovaných zápasech

Kolo Synot ligy	Tým	Celková návštěvnost stadionu	Návštěvnost stadionu [%]	Počet diváku - sledovaná oblast	Obsazenost sektoru [%]	Poměr počtu diváků na stadionu/ vůči sledovanému sektoru [%]
19.	FC Baník Ostrava	12 985	67,0	135	100	1,0
21.	FC Fastav Zlín	6 673	34,5	105	90	1,6
26.	FK Teplice	6 157	31,8	95	85	1,5
28.	1. FC Slovácko	6 011	31,0	106	90	1,8

4.2.2.1 Záznamy chování diváků během jednotlivých zápasů

Tabulka 14: Chování diváků během zápasu SK Slavia Praha – FC Baník Ostrava 28. 2. 2016

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	16:14	37,0	17:48	44,3	1:57	7,9	35:59	33,0
2.	Chůze	-	-	-	-	15:37	62,9	15:37	14,3
3.	Skákání - 1. typ	4:42	10,7	4:25	11,0	1:44	7,0	10:51	10,0
4.	Skákání – 2. typ	-	-	1:01	2,5	-	-	1:01	1,0
5.	Skákání – 3. typ	0:32	1,2	-	-	-	-	0:32	0,5
6.	Skákání – 4. typ	-	-	0:46	1,9	0:43	2,9	1:29	1,4
7.	Pohupování	3:13	7,3	1:51	4,6	-	-	5:04	4,7
8.	Kymáčení	5:51	13,3	2:22	5,9	0:33	2,2	8:46	8,1
9.	Tleskání – 1. typ	6:07	14,0	5:48	14,4	2:34	10,3	14:29	13,3
10.	Tleskání – 2. typ	2:40	6,1	1:24	3,5	1:02	4,6	5:06	4,7
11.	Tleskání – 3. typ	3:49	8,7	3:18	8,2	0:39	2,6	7:46	7,1
12.	Vstřelení branky	0:10	0,4	0:18	0,8	-	-	0:28	0,4
13.	Mexická vlna	0:37	1,4	1:10	2,9	-	-	1:47	1,6

Tabulka 15: Chování diváků během zápasu SK Slavia Praha – FC Fastav Zlín 11. 3. 2016

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	15:41	34,8	20:57	44,5	20:37	65,2	57:15	46,3
2.	Chůze	-	-	-	-	2:55	9,2	2:55	2,36
3.	Skákání - 1. typ	2:22	5,2	0:52	1,8	0:31	1,6	3:45	3,0
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	0:33	1,2	-	-	0:33	0,4
6.	Skákání – 4. typ	0:37	1,4	0:18	0,6	0:31	1,6	1:26	1,2
7.	Pohupování	5:52	13,0	7:28	15,9	0:09	0,5	13:29	10,9
8.	Kymáčení	7:01	15,6	7:19	15,6	2:03	6,5	16:23	13,2
9.	Tleskání – 1. typ	7:55	17,5	3:05	6,6	1:55	6,1	12:55	10,4
10.	Tleskání – 2. typ	2:21	5,2	1:25	3,0	2:31	8,0	6:17	5,1
11.	Tleskání – 3. typ	2:48	6,2	4:32	9,6	0:13	0,7	7:33	6,1
12.	Vstřelení branky	0:31	1,1	0:11	0,4	-	-	0:42	0,6
13.	Mexická vlna	-	-	0:22	0,8	0:11	0,6	0:33	6,1

Tabulka 16: Chování diváků během zápasu SK Slavia Praha – FK Teplice 23. 4. 2016

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	13:32	29,7	19:50	39,8	7:03	26,9	40:25	33,2
2.	Chůze	-	-	0:37	1,2	16:00	61,0	16:37	13,7
3.	Skákání - 1. typ	2:25	5,3	3:54	7,8	-	-	6:19	5,2
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	0:29	1,0	-	-	0:29	0,4
6.	Skákání – 4. typ	2:25	5,3	3:54	7,8	-	-	6:19	5,2
7.	Pohupování	7:00	15,4	4:47	9,6	0:10	0,6	11:57	9,8
8.	Kymáčení	7:32	16,6	10:13	20,5	0:16	1,0	18:01	14,8
9.	Tleskání – 1. typ	6:32	14,4	1:30	3,0	1:38	6,2	9:40	8,0
10.	Tleskání – 2. typ	2:23	5,2	1:09	2,3	0:36	2,3	4:08	3,4
11.	Tleskání – 3. typ	4:33	10,0	4:11	8,4	-	-	8:44	7,2
12.	Vstřelení branky	-	-	2:13	4,6	-	-	2:13	2,2
13.	Mexická vlna	0:22	0,8	0:05	0,2	-	-	0:27	0,4

Tabulka 17: Chování diváků během zápasu SK Slavia Praha – 1. FC Slovácko 8. 5. 2016

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	13:06	26,6	13:54	22,3	19:04	65,48	46:04	32,8
2.	Chůze	-	-	-	-	3:02	10,42	3:02	2,2
3.	Skákání - 1. typ	2:38	5,4	4:59	8,0	1:47	6,1	9:24	6,7
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	0:30	0,8	-	-	0:30	0,4
6.	Skákání – 4. typ	-	-	0:38	1,0	0:16	0,9	0:54	0,6
7.	Pohupování	8:42	17,7	3:33	5,7	1:10	4,0	13:25	9,5
8.	Kymáčení	9:38	19,6	7:29	12,0	1:08	3,9	18:15	13,0
9.	Tleskání – 1. typ	8:13	16,7	22:23	36,0	1:04	3,7	31:40	22,5
10.	Tleskání – 2. typ	4:40	9,5	2:15	3,6	0:36	2,1	7:31	5,3
11.	Tleskání – 3. typ	1:14	2,5	3:38	5,8	1:00	3,4	5:52	4,2
12.	Vstřelení branky	1:05	2,2	1:43	2,8	-	-	2:48	2,0
13.	Mexická vlna	-	-	1:14	2,0	-	-	1:14	0,9

4.2.2.2 Určení poměru aktivních a pasivních diváků

Poměr aktivních a pasivních diváků byl sledován pouze v jednom zápase. Jednalo se konkrétně zápas SK Slavia Praha – FC Baník Ostrava, který se konal dne 28. 2. 2019. V tabulce (Tab. 18) jsou popsána minimální zapojení diváků, maximální zapojení diváků a průměrné zapojení diváků.

Tabulka 18 Vyhodnocení poměru mezi aktivními a pasivními diváky během vybraného zápasu

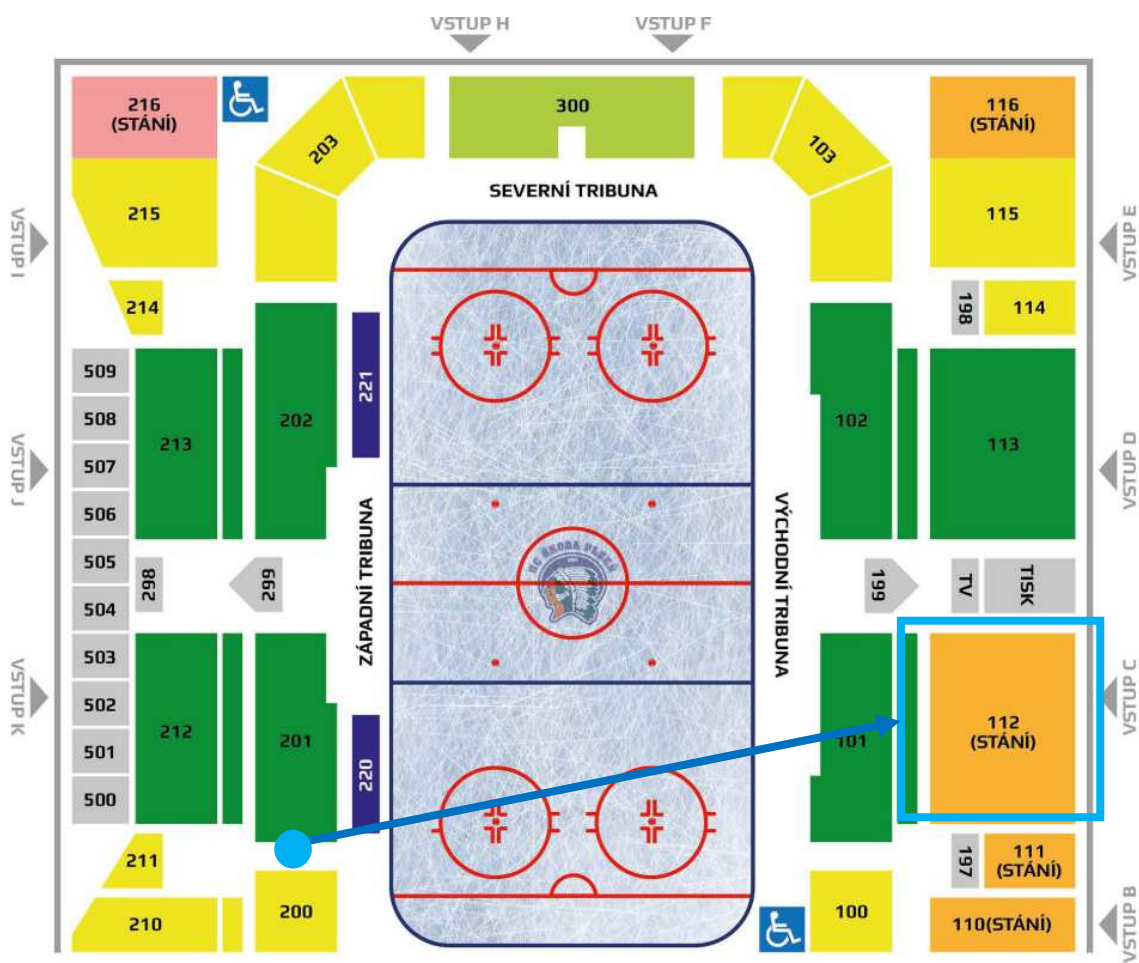
	Typy chování diváků	Minimální	Maximální	Průměrné
		zapojení diváků	zapojení diváků	zapojení diváků
		[%]	[%]	[%]
1.	Statické chování	85	100	90,2
2.	Chůze	50,0	100	85,0
3.	Skákání - 1. typ	40,0	97,8	60,3
4.	Skákání – 2. typ	97,8	97,8	97,8
5.	Skákání – 3. typ	98,5	98,5	98,5
6.	Skákání – 4. typ	100	100	100
7.	Pohupování	40	100	70,6
8.	Kymáčení	50	100	79,3
9.	Tleskání – 1. typ	40	100	83,1
10.	Tleskání – 2. typ	90	100	94,0
11.	Tleskání – 3. typ	90	100	91,9
12.	Vstřelení branky	93,3	100	97,0
13.	Mexická vlna	91,9	100	96,7

4.2.2.3 Zhodnocení

Návštěvnost zápasů klesala s narůstající pravděpodobností konečného umístění týmu na 5. místě tabulky Synot ligy. Nejběžnějším typem chování diváků byl potlesk (všechny druhy) a statické sledování zápasů. V každém zápase bylo zaznamenáno skákání jednotlivých řad diváků. Jednalo se o skákání jednotlivých řad horizontálně. Zapojení diváků do tohoto typu chování bylo 98,5%

4.2.3 Utkání hokejového mužstva HC ŠKODA Plzeň v průběhu ligové sezony 2015/2016

HC ŠKODA Plzeň hraje svoje utkání na zimním stadionu v Plzni. Stadion má kapacitu 8 236 diváků. Kamera, pomocí které bylo sledováno chování diváků, byla umístěna na schodišti mezi dvěma sektory a vždy na přestávky se musela demontovat. Vzdálenost mezi kamerou a „ kotlem“ byla na tomto stadionu cca 50 m (Obr. 37).



Obrázek 37: Plánek zimního stadionu v Plzni převzatý z [29] s vyznačenou polohou kamery a sledovaného sektoru stadionu

Během experimentu bylo sledováno celkem 25 zápasů nejvyšší české hokejové ligy v sezoně 2015/2016. HC ŠKODA Plzeň se v sezoně probojovala do vyřazovací části soutěže a zde až do semifinále. Vyhodnoceno bylo šest vybraných zápasů (z toho jeden v play-off). V základní části se tým umístil na konečném 4. místě tabulky. U dvou zápasů bylo vyhodnoceno chování diváků vyhodnoceno pouze v první třetině. První třetina byla vybrána z důvodu podobného vývoje utkání v obou zápasech a podobného typu chování. V následující tabulce jsou zaznamenány počty diváků ve vyhodnocovaných zápasech. [36,37]

Tabulka 19: Počet diváků na Plzeňském zimním stadionu během experimentu

Kolo Tipsport extraliga	Tým	Celková návštěva na stadionu	Návštěvnost stadionu [%]	Počet diváku - sledovaná oblast	Obsazenost sektoru [%]	Poměr počtu diváků na stadionu/ vůči sledovanému sektoru [%]
3.	HC Bílí Tygři Liberec	4 321	52,5	94	99	2,2
7.	HC Kometa Brno	4 724	57,4	86	94	1,8
21.	HC Mountfield Hradec Králové	3 750	45,5	63	85	1,7
43.	HC Olomouc	4 790	58,2	83	84	1,7
47.	HC Mountfield Hradec Králové	4 564	55,4	90	96	2,0
Play-off	HC Olomouc	5 009	60,8	102	105	2,0

4.2.3.1 Záznamy chování diváků během jednotlivých zápasů

Tabulka 20: Chování diváků během zápasu HC Škoda Plzeň – HC Bílí Tygři Liberec 18.9.2015

	Typy chování diváků	První třetina		Druhá třetina		Třetí třetina		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	8:36	23,3	8:49	24,8	10:16	24,2	27:41	24,1
2.	Chůze	1:11	3,2	2:21	6,6	2:25	5,7	5:57	5,2
3.	Skákání - 1. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
6.	Skákání – 4. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
7.	Pohupování	-	-	0:12	0,6	0:42	1,7	0:54	0,8
8.	Kymáčení	4:40	12,7	8:13	23,1	10:14	24,2	23:07	20,1
9.	Tleskání – 1. typ	17:00	46,2	11:33	32,5	15:36	36,8	44:09	38,5
10.	Tleskání – 2. typ	0:22	1,0	-	-	0:10	0,4	0:32	0,5
11.	Tleskání – 3. typ	4:26	12,0	0:55	11,0	2:37	6,2	10:58	9,6
12.	Vstřelení branky	0:35	1,6	0:30	1,4	0:22	0,9	1:27	1,3
13.	Mexická vlna	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka 21: Chování diváků během zápasu HC Škoda Plzeň – HC Kometa Brno 2. 10. 2015

	Typy chování diváků	První poločas		Druhý poločas		Ostatní části		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	10:07	28,1	7:30	18,3	5:18	14,0	22:55	20,0
2.	Chůze	0:44	2,0	-	-	0:21	0,9	1:05	0,9
3.	Skákání - 1. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
6.	Skákání – 4. typ	-	-	-	-	-	-	-	-
7.	Pohupování	0:34	1,6	1:05	2,6	1:31	4,0	3:10	2,8
8.	Kymáčení	7:37	21,1	11:42	28,5	7:59	21,1	27:18	23,8
9.	Tleskání – 1. typ	9:26	26,2	14:25	35,1	15:54	50,0	42:45	37,2
10.	Tleskání – 2. typ	0:58	2,7	-	-	-	-	0:58	0,8
11.	Tleskání – 3. typ	5:49	16,1	5:11	12,6	2:38	7,0	13:38	11,9
12.	Vstřelení branky	0:46	2,1	1:08	2,8	0:50	2,2	2:44	2,4
13.	Mexická vlna	-	-	-	-	0:16	0,7	0:16	0,2

Tabulka 22: Chování diváků během zápasu HC Škoda Plzeň – HC Olomouc 5. 2. 2016 - základní část

	Typy chování diváků	První třetina		Druhá třetina		Třetí třetina		Prodloužení		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	7:28	24,8	9:33	30,9	10:40	32,5	12:56	2,2	40:37	34,0
2.	Chůze	1:17	4,3	0:29	1,6	-	-	0:15	1,0	2:01	1,7
3.	Skákání – 1. typ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6.	Skákání – 4. typ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7.	Pohupování	0:03	0,2	0:19	1,0	0:44	2,2	-	-	1:06	0,9
8.	Kymáčení	3:28	11,5	2:44	8,9	5:15	16,0	2:12	8,6	13:39	11,4
9.	Tleskání – 1. typ	13:42	45,4	15:10	49,1	13:55	42,3	6:31	25,3	49:18	41,2
10.	Tleskání – 2. typ	2:48	9,3	1:31	4,9	1:01	3,1	2:58	11,5	8:18	6,9
11.	Tleskání – 3. typ	-	-	0:08	0,4	0:27	1,4	-	-	0:35	0,5
12.	Vstřelení branky	0:50	2,8	0:58	3,1	0:38	1,9	0:41	2,7	3:07	2,6
13.	Mexická vlna	0:33	1,8	-	-	0:12	0,6	0:10	0,6	0:55	0,8

Tabulka 23: Chování diváků během zápasu HC Škoda Plzeň – HC Olomouc 8. 3. 2016 – play-off

	Typy chování diváků	První třetina		Druhá třetina		Třetí třetina		Prodloužení		Celkem	
		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	10:58	29,1	6:30	21,6	6:29	20,1	8:05	20,9	32:02	23,1
2.	Chůze	0:22	1,0	-	-	0:13	0,7	0:11	0,5	0:46	0,6
3.	Skákání - 1. typ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6.	Skákání – 4. typ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7.	Pohupování	-	-	0:28	1,5	0:02	0,1	-	-	0:30	0,4
8.	Kymáčení	3:01	8,0	4:41	15,6	5:10	15,9	3:02	7,8	15:54	11,4
9.	Tleskání – 1. typ	14:54	39,6	15:10	50,4	14:30	44,7	15:37	40,3	1:00:11	43,3
10.	Tleskání – 2. typ	3:52	10,3	1:02	3,4	4:15	13,1	8:03	20,8	17:12	12,4
11.	Tleskání – 3. typ	3:20	8,8	0:53	2,9	0:32	1,6	1:33	4,0	6:18	4,5
12.	Vstřelení branky	0:50	2,2	0:42	2,3	0:28	1,4	1:25	3,7	3:25	2,5
13.	Mexická vlna	0:23	1,0	0:41	2,3	0:49	2,5	0:47	2,0	2:40	1,9

Tabulka 24: Chování diváků během první třetiny zápasů HC Škoda Plzeň – HC Mountfield Hradec Králové 20. 11. 2015 (vlevo) a HC Škoda Plzeň – HC Mountfield Hradec Králové 21. 2. 2016 (vpravo)

	Typy chování diváků	První třetina	
		Doba trvání	
		[min]	[%]
1.	Statické chování	9:22	30,8
2.	Chůze	-	-
3.	Skákání - 1. typ	-	-
4.	Skákání – 2. typ	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-
6.	Skákání – 4. typ	-	-
7.	Pohupování	0:13	0,7
8.	Kymácení	2:04	6,8
9.	Tleskání – 1. typ	14:56	49,1
10.	Tleskání – 2. typ	1:39	5,4
11.	Tleskání – 3. typ	1:11	3,9
12.	Vstřelení branky	0:19	1,0
13.	Mexická vlna	0:40	2,2

	Typy chování diváků	První třetina	
		Doba trvání	
		[min]	[%]
1.	Statické chování	9:30	28,8
2.	Chůze	-	-
3.	Skákání - 1. typ	-	-
4.	Skákání – 2. typ	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-
6.	Skákání – 4. typ	-	-
7.	Pohupování	0:19	0,9
8.	Kymácení	4:23	13,1
9.	Tleskání – 1. typ	17:03	50,9
10.	Tleskání – 2. typ	0:11	0,5
11.	Tleskání – 3. typ	0:27	1,3
12.	Vstřelení branky	1:36	4,8
13.	Mexická vlna	-	-

4.2.3.2 Určení poměru aktivních a pasivních diváků

Poměr aktivních a pasivních diváků byl sledován pouze ve dvou utkáních. Jednalo se konkrétně o dva zápasy shodných soupeřů HC Škoda Plzeň a HC Mountfield Hradec Králové, které se konaly dne 20. 11. 2015 resp. 21. 2. 2016. V tabulce (Tab. 25) je popsáno zaznamenané minimální zapojení diváků do aktivního fandění, maximální a průměrné zapojení diváků.

Tabulka 25: Vyhodnocení poměru mezi aktivními a pasivními diváky v průběhu zápasu ze dne 20. 11. 2015

	Typy chování diváků	Minimální	Maximální	Průměrné
		zapojení diváků	zapojení diváků	zapojení diváků
		[%]	[%]	[%]
1.	Statické chování	36,5	100	91,7
2.	Chůze	-	-	-
3.	Skákání - 1. typ	-	-	-
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	-
6.	Skákání – 4. typ	-	-	-
7.	Pohupování	73,0	73,0	73,0
8.	Kymáčení	12,7	100	68,0
9.	Tleskání – 1. typ	19,0	100	63,3
10.	Tleskání – 2. typ	17,5	88,9	55,0
11.	Tleskání – 3. typ	74,6	88,9	83,8
12.	Vstřelení branky	71,4	100	87,8
13.	Mexická vlna	9,5	19	13,0

Tabulka 26: Vyhodnocení poměru mezi aktivními a pasivními diváky během zápasu ze dne 21. 2. 2016

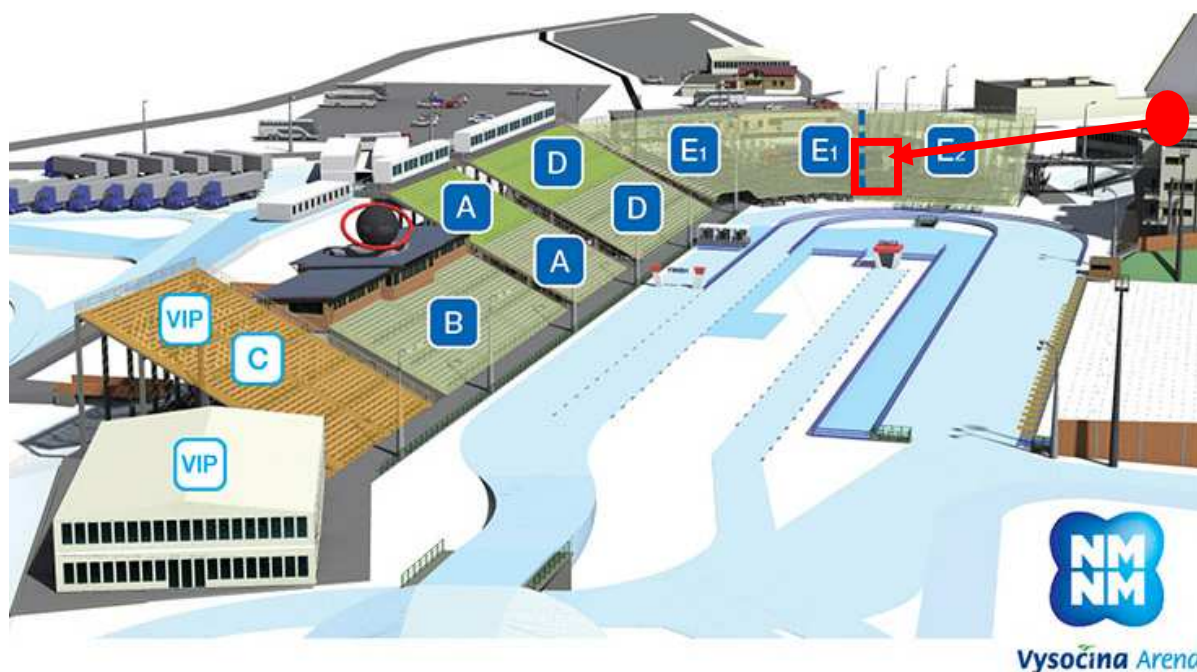
	Typy chování diváků	Minimální	Maximální	Průměrné
		zapojení diváků	zapojení diváků	zapojení diváků
		[%]	[%]	[%]
1.	Statické chování	83	100	97,8
2.	Chůze	-	-	-
3.	Skákání - 1. typ	-	-	-
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	-
6.	Skákání – 4. typ	-	-	-
7.	Pohupování	73,3	73,3	73,3
8.	Kymáčení	11	100	68,6
9.	Tleskání – 1. typ	11,1	100	67,0
10.	Tleskání – 2. typ	82,2	82,2	82,2
11.	Tleskání – 3. typ	93,3	95,6	94,4
12.	Vstřelení branky	90	100	96,7
13.	Mexická vlna	-	-	-

4.2.3.3 Zhodnocení

Během celé sezony byla zaznamenána zhruba shodná návštěvnost hokejových utkání. Hokejovému týmu se po celou dobu sezony dařilo pohybovat se v horní části ligové tabulky. Na zápasy play-off došlo k mírnému zvýšení jejich návštěvnosti (Tab. 19). Ani v jednom z 25 sledovaných zápasů nebylo zaznamenáno skákání diváků ve sledovaném sektoru stadionu. Nejčastěji diváci povzbuzovali svůj tým pomocí potlesku.

4.2.4 Závody světového poháru v biatlonu ve Vysočina Aréně v Novém Městě na Moravě – 12/ 2016

Sledované závody, které byly pořádány v rámci světového poháru v biatlonu, se konaly ve Vysočina Aréně v prosinci 2016. Arénu tvoří betonová tribuna, která má omezenou kapacitu. Během konání významných událostí je kapacita areálu rozšířena pomocí montovaných tribun ze systémového lešení. Během čtyř sportovních dnů, kdy proběhlo dohromady 6 závodů, byla celková návštěvnost 123 500 diváků [31]. Kamera, která sloužila ke sledování způsobu chování diváků, byla umístěna na televizní věži a sledovala vybranou část tribuny. Vzdálenost mezi pozicí kamery a sledovanou oblastí tribuny byla přibližně 150 m (Obr. 38).[30,31]



Obrázek 38: Plánek Vysočina Arény převzatý z [30] s vyznačenou polohou kamery a sledovaným sektorem tribuny

Při experimentu bylo chování diváků sledováno v průběhu 4 závodů světového poháru v biatlonu. Jednalo se o stíhací závod žen a stíhací závod mužů, které proběhly v rámci sobotního programu, a o závod s hromadným startem žen a závod s hromadným startem mužů, které se konaly v neděli. Aktivita diváků a způsob jejich chování byly vyhodnoceny pouze pro nedělní program. Výsledky získané při této sportovní události bylo možné následně porovnat s výsledky předchozích experimentů zaměřených na sledování chování diváků během hokejových a fotbalových zápasů.

Tabulka 27: Počet diváků ve Vysočina Aréně během realizovaných experimentů

Tým	Celková návštěvnost stadionu	Návštěvnost stadionu [%]	Počet diváku sledovaná oblast	Obsazenost sektoru [%]	Poměr počtu diváků na stadionu/ vůči sledovanému sektoru [%]
Sobotní program	35 000	110	20	100	0,05
Nedělní program	34 000	100	20	100	0,06

4.2.4.1 Záznamy chování diváků během jednotlivých dnů

Tabulka 28: Chování diváků během nedělního programu 18. 12. 2016

	Typy chování diváků	Hromadný start mužů		Hromadný start žen	
		Doba trvání		Doba trvání	
		[min]	[%]	[min]	[%]
1.	Statické chování	21:40	58,11	17:36	47,78
2.	Chůze	-	-	-	-
3.	Skákání - 1. typ	-	-	-	-
4.	Skákání – 2. typ	-	-	-	-
5.	Skákání – 3. typ	-	-	-	-
6.	Skákání – 4. typ	-	-	-	-
7.	Pohupování	5:17	14,17	3:45	10,18
8.	Kymáčení	-	-	-	-
9.	Tleskání – 1. typ	10:20	27,72	15:29	42,04
10.	Tleskání – 2. typ				
11.	Tleskání – 3. typ				
12.	Vstřelení branky	-	-	-	-
13.	Mexická vlna	-	-	-	-

4.2.4.2 Určení poměru aktivních a pasivních diváků

Poměr aktivních a pasivních diváků byl sledován pouze v nedělním programu, kdy probíhal závod s hromadným startem.

Tabulka 29: Aktivita diváků během nedělního programu 18. 12. 2016

Typy chování diváků	Hromadný start mužů		Hromadný start žen	
	Zapojení diváků		Zapojení diváků	
	[min]	[max]	[min]	[max]
Statické chování	80,2	100	81,5	100
Chůze	-	-	-	-
Skákání - 1. typ	-	-	-	-
Skákání – 2. typ	-	-	-	-
Skákání – 3. typ	-	-	-	-
Skákání – 4. typ	-	-	-	-
Pohupování	50,4	70,2	58,7	65,5
Kymáčení	-	-	-	-
Tleskání – 1. typ	90,2	100	91,3	100
Tleskání – 2. typ				
Tleskání – 3. typ				
Vstřelení branky	-	-	-	-
Mexická vlna	-	-	-	-

4.2.4.3 Zhodnocení

Chování diváků ve sledovaném sektoru tribuny bylo silně ovlivněno nařízením pořadatele, který zakázal skákání lidí na tribunách kvůli obavě ze zhroucení tribuny. A tento zákaz v průběhu závodů pravidelně připomínal.

V průběhu závodů byl zaznamenán pouze normální potlesk (potlesk - 1. typ). Potlesk byl nejčastěji zaznamenán při závodě s hromadným startem žen, jelikož se závodě účastnila česká reprezentantka, která celý závod vyhrála. Během závodů diváci jednou realizovali mexickou vlnu, která ale nebyla zaznamenána přístroji pro měření vibrací ani na kameře.

4.3 Celkové zhodnocení

Chování diváků je v průběhu sportovní události velmi proměnné. Například během jednoho fotbalového zápasu byli diváci schopni i 600 krát změnit svoje chování. Průměrně jeden typ chování trval cca 20 s. Celkem bylo klasifikováno 13 typů chování diváků, v některých sledovaných zápasech se vyskytly všechny typy, v některých pouze část. Z výše uvedených výsledků dále vyplývá, že čeští diváci jsou velmi ovlivněni aktuální situací svého týmu. Pokud se týmu nedaří, klesá návštěvnost jednotlivých zápasů a zároveň se snižuje míra aktivity diváků přítomných na stadionu.

Nejčastějším způsobem povzbuzování napříč jednotlivými sporty je potlesk ve všech svých podobách. Pokud diváci nemají nikoho, kdo by je synchronizoval a vedl, tak se vyskytuje pouze potlesk normální – viz biatlon. Když jsou diváci organizováni za pomoci lídra, tak během utkání velmi často mění druhy potlesku. Druhým významným typem chování z hlediska četnosti výskytu je statické sledování zápasu. Diváci nejsou schopni neustále povzbuzovat svůj tým a nastávají chvíle, kdy odpočívají. Z pohledu dynamického namáhání tribuny ale obě tato chování nepředstavují významné dynamické zatížení. Pro dynamiku byly nejzajímavější situace, kdy na fotbalových stadionech bylo zaznamenáno skákání jednotlivých řad diváků (tj. skákání 2. a 3. typu), kteří se dokázali plně synchronizovat v důsledku chycení kolem ramen. Tento druh chování vždy trval mezi 30-50 vteřinami a docházelo při něm k velmi rychlé synchronizaci zapojených diváků. Z dynamických účinků tohoto typu chování mají obavy například výrobci (PERI apod.) montovaných tribun, a proto je skákání na těchto tribunách zakázáno. Při experimentech realizovaných na hokejových zápasech nebylo skákání zaznamenáno, ačkoliv se skákání v českých zemích rozmohlo právě po MS v ledním hokeji v Praze v roce 2004. Vývoj chování diváků pokročil a již i diváci na hokejových stadionech povzbuzují svůj tým pomocí skákání. Toto bylo pozorováno např. dne 3. 11. 2019 během utkání HC Sparta Praha a HC Kometa Brno, kdy fanouškové oslavovali každý gól skákáním jednotlivých řad svise.

5. Naměřená dynamická odezva konstrukcí tribun

Experimenty se zabývaly sledováním úrovně vibrací sledovaných sektorů tribun na všech dříve zmíněných stadionech. Vyhodnocovaly se základní parametry dynamického chování tribuny. Jednalo se primárně o špičkové hodnoty a RMS hodnoty zrychlení sledované tribuny (byl uvažován interval 10 s dle doporučení normy ISO 10137:2007 [18]), budicí frekvence při výrazném kmitání tribuny, a jako poslední parametr se z vybraných záznamů výrazného kmitání tribuny vyhodnocoval z naměřených zrychlení pomocí dvojnásobné integrace v časové oblasti dynamický průhyb nosné konstrukce tribuny. Budicí frekvence byly vyhodnoceny pomocí FFT z nejzajímavějších částí záznamů sportovních klání.

5.1 Tribuna na stadionu v Praze na Letné

5.1.1 Popis experimentu

V roce 2013 byl na stadionu v Praze na Letné proveden první experiment, při kterém byla sledována úroveň vibrací tribuny způsobené chováním diváků. Měření proběhlo během posledních dvou zápasů podzimní části české nejvyšší fotbalové soutěže v ročníku 2013/2014. AC Sparta Praha se tehdy stala půlmistrem. Při tomto experimentu se zaznamenávána pouze dynamická odezva konstrukce tribuny, chování diváků sledováno nebylo. Na tento prvotní experiment navázalo měření vibrací tribuny ve stejném sektoru stadionu během jarní části české nejvyšší fotbalové soutěže v ročníku 2014/2015. V tomto ročníku se týmu AC Sparta Praha nedařilo a došlo k postupnému snížení návštěvnosti (viz kap. 4.2.1.) a také intenzity zaznamenaných vibrací. Při druhém experimentu bylo již sledováno i chování diváků ve zkoumaném sektoru tribuny. Videozáznamy chování diváků byly následně synchronizovány se záznamy vibrací tribuny.

Na letenském stadionu došlo v průběhu prvního desetiletí 21. století k postupnému přesunutí nejnervnějších a zároveň nejradikálnějších fanoušků, tzv. „Ultras“, ze spodního patra tribuny do jejího horního patra, kde nejnižší část nosné konstrukce tribuny působí staticky jako konzola, která je z hlediska odolnosti vůči dynamickým účinkům méně odolná. Přesunutí bylo částečně způsobeno velkým množstvím výtržností fanoušků.

Samotné měření probíhalo za pomoci trojice (2013) resp. čtveřice (2015) miniaturních piezoelektrických snímačů zrychlení Delta Tron typ 4507 B005, které byly pomocí magnetů připevněny na koncích ocelových nosníků tribuny. V roce 2013 byly použity pouze tři snímače a zrychlení tribuny bylo sledováno pouze ve svislém směru (Obr. 39). Při přípravě experimentu v roce 2015 byla na základě výsledků získaných z předchozího měření pozice snímačů modifikována (Obr. 39). Došlo k posunutí krajního snímače blíže ke středu „kotle“ a zároveň byl na pozici číslo tři instalován čtvrtý snímač, který zaznamenával zrychlení tribuny i ve vodorovném směru. Větší počet snímačů nebylo možné na tribunu umístit, protože kvůli nenápadnosti měřicí aparatury byla pro snímání použita měřicí ústředna Frontend 3050-B-040 Brüel & Kjær, která umožňovala připojení pouze 4 snímačů.



Obrázek 39: Sledovaný sektor tribuny se zakreslenými pozicemi snímačů při experimentu z roku 2013 (vlevo) a 2015 (vpravo)

5.1.2 Výsledky měření vibrací tribuny

V roce 2013 byly vibrace tribuny sledovány při utkáních, kdy hrála AC Sparta Praha s týmy FK Teplice a FK Mladá Boleslav. Oba zápasy skončily vítězně pro domácí tým. V následujících tabulkách a grafech jsou uvedeny jednotlivé vyhodnocené parametry dynamického chování nosné konstrukce tribuny ve sledovaných bodech.

Tabulka 30: Vyhodnocené maximální špičkové hodnoty zrychlení tribuny z roku 2013

kolo	Maximální zrychlení tribuny [ms^{-2}] v bodu			
	1.	2.	3.	4.
13.	1,28	-	1,35	0,92
15.	1,00	-	1,71	1,59

Tabulka 31: Vyhodnocené maximální RMS hodnoty zrychlení tribuny z roku 2013

kolo	RMS hodnota m.s^{-2}			
	1.	2.	3.	4.
13.	0,37	-	0,37	0,31
15.	0,32	-	0,49	0,38

Tabulka 32: Naměřené budící frekvence z roku 2013

kolo	Budící frekvence diváků [Hz]			
	1.	2.	3.	4.
13.	2,41	4,81	7,22	9,84
15.	2,38	4,72	7,09	9,25

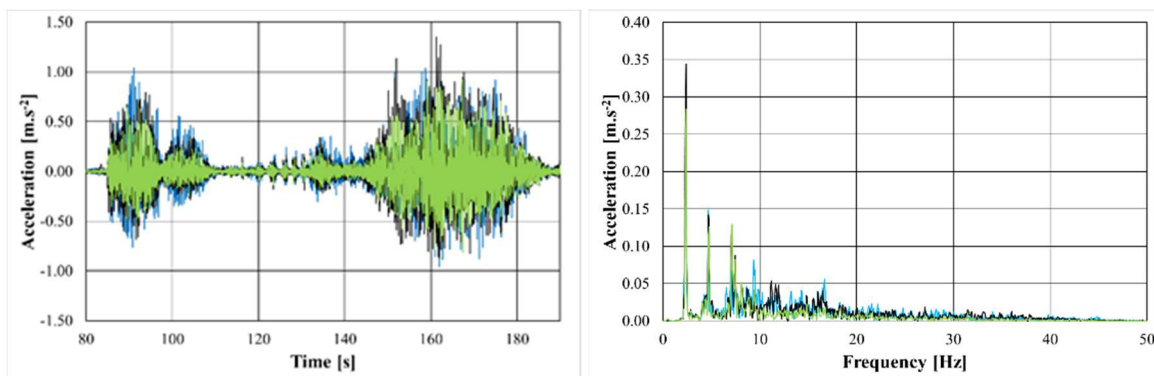
Tabulka 33: Vyhodnocené maximální vážené RMS hodnoty zrychlení tribuny – 2013

kolo	Váhová funkce W_k				Váhová funkce W_m			
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
13.	0,280	-	0,340	0,295	0,246	-	0,324	0,276
15.	0,226	-	0,428	0,276	0,235	-	0,365	0,283

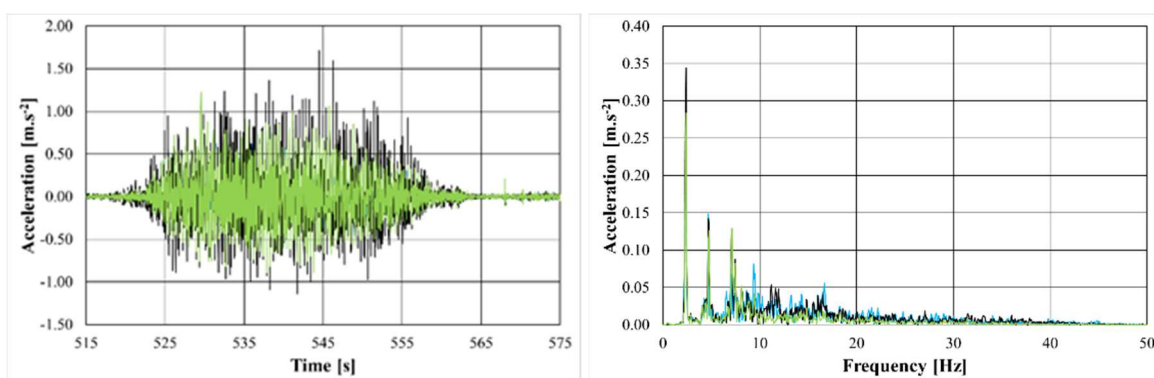
Tabulka 34: Vyhodnocené maximální výkmity výchylek konstrukce tribuny – 2013

kolo	Amplituda kladná [mm]				Amplituda záporná [mm]				Rozkmit [mm]			
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
13.	1,8	-	2,2	1,9	-1,8	-	-2,2	-2,1	3,6	-	4,4	4,0
15.	2,0	-	2,6	2,4	-2,0	-	-2,3	-2,3	4,0	-	4,9	4,7

V následujících grafech je ukázka nejzajímavější částí záznamu vibrací tribuny. Na základě vizuálního pozorování se jedná o skákání diváků, konkrétně o typ 2.



Obrázek 40: Vyhodnocení záznamu z utkání s FK Teplice. Záznam zrychlení tribuny ve svislém směru (vlevo) a převedení do frekvenční oblasti (vpravo).



Obrázek 41: Vyhodnocení záznamu z utkání s FK Mladá Boleslav. Záznam zrychlení tribuny ve svislém směru (vlevo) a převedení do frekvenční oblasti (vpravo)

V roce 2015 bylo kmitání tribuny sledováno při více zápasech, při kterých se AC Sparta Praha postupně utkala s týmy FK Dukla Praha, FK Teplice, FC Zbrojovka Brno, 1. FC Slovácko a Bohemians Praha 1905. Jak již bylo řečeno dříve, domácí tým ztratil naději na titul po 23. kole soutěže, což se projevilo v postupném snížení

úrovně zaznamenaných vibrací. V následujících tabulkách a grafech jsou uvedeny jednotlivé vyhodnocené maximální parametry kmitání tribuny.

Tabulka 35: Vyhodnocené maximální špičkové hodnoty zrychlení tribuny - 2015

kolo	Maximální zrychlení tribuny [ms^{-2}] v bodu				Druh chování
	1.	3z	4.	3x	
19.	0,65	0,83	0,92	0,22	Skákání – celé řady – svisle
21.	0,94	1,15	1,10	0,26	Skákání – celé řady – svisle
25.	0,69	1,06	1,45	0,28	Skákání – celé řady – svisle
28.	0,67	0,80	0,96	0,23	Skákání – celé řady – svisle
30.	1,10	1,53	1,27	0,30	Skákání – celé řady – vodorovně

Pozn.: „3z“ jsou označené výsledky vyhodnocené v bodu 3 ve svislém směru a „3x“ popisuje výsledky z bodu 3 ve vodorovném směru.

Tabulka 36: Budicí frekvence 2015

kolo	Budicí frekvence diváků [Hz]				Druh chování
	1.	3z	4.	3x	
19.	2,34	4,75	7,74	8,13	Skákání – celé řady – svisle
21.	1,94	3,88	5,88	7,59	Skákání – celé řady – svisle
25.	2,02	3,97	5,97	7,97	Skákání – celé řady – svisle
28.	1,94	3,94	5,88	7,81	Skákání – celé řady – svisle
30.	2,03	4,02	6,00	8,06	Skákání – celé řady – vodorovně

Tabulka 37: Vyhodnocené maximální RMS hodnoty zrychlení tribuny z roku 2015

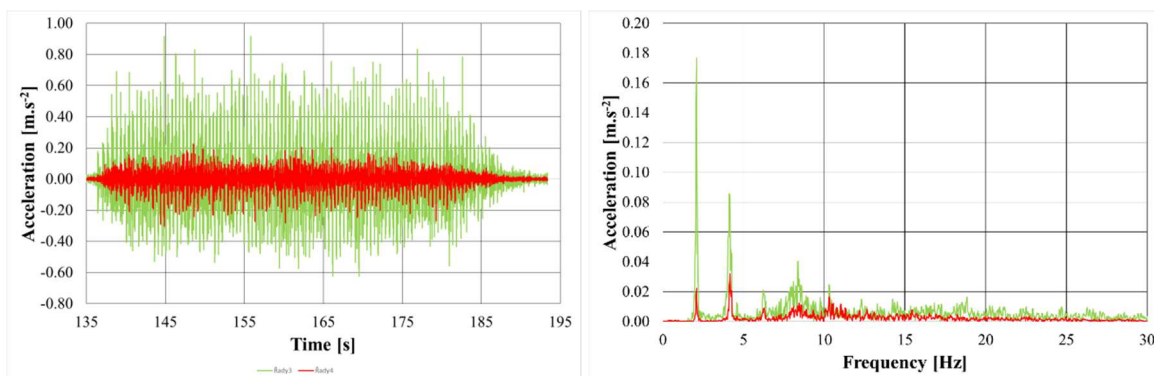
kolo	RMS hodnota m.s^{-2}				Druh chování
	1.	3z	4.	3x	
19.	0,170	0,213	0,238	0,070	Skákání – celé řady – svisle
21.	0,236	0,299	0,314	0,090	Skákání – celé řady – svisle
25.	0,142	0,220	0,271	0,074	Skákání – celé řady – svisle
28.	0,151	0,207	0,244	0,071	Skákání – celé řady – svisle
30.	0,214	0,282	0,354	0,10	Skákání – celé řady – vodorovně

Tabulka 38: Vyhodnocené maximální vážené RMS hodnoty zrychlení z roku 2015

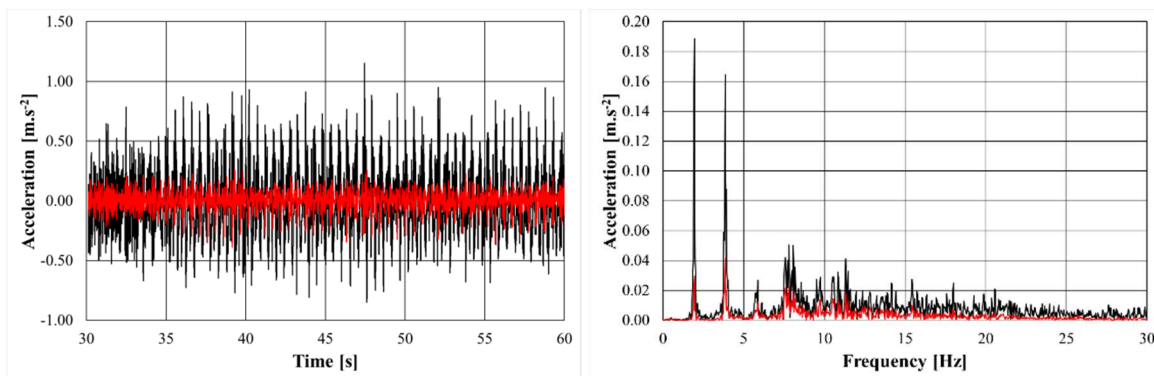
kolo	Váhová funkce W_k			Váhová funkce W_d	Váhová funkce W_m			
	1.	3z	4.	3x	1.	3z	4.	3x
19.	0,010	0,014	0,016	0,001	0,006	0,008	0,009	0,003
1.	0,203	0,258	0,283	0,034	0,165	0,221	0,243	0,056
25.	0,128	0,200	0,258	0,027	0,099	0,159	0,217	0,047
28.	0,121	0,170	0,195	0,022	0,110	0,152	0,193	0,035
30.	0,176	0,225	0,295	0,036	0,162	0,217	0,285	0,057

Tabulka 39: Vyhodnocené maximální výchylky konstrukce z roku 2015

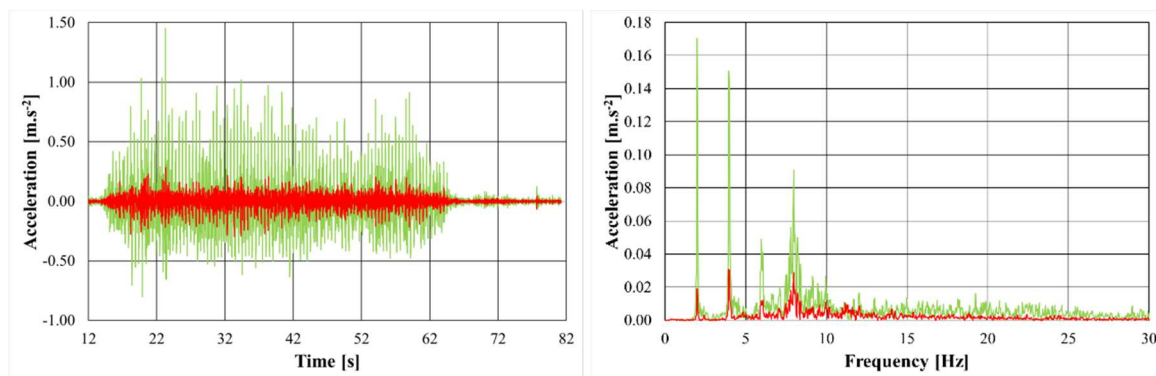
kolo	Amplituda kladná [mm]				Amplituda záporná [mm]				Rozkmit [mm]			
	1.	3z	4.	3x	1.	3z	4.	3x	1.	3z	4.	3x
19.	1,2	1,5	1,9	0,5	-1,0	-1,3	-1,6	-0,4	2,2	2,8	3,5	0,9
21.	1,6	2,3	2,2	0,5	-1,1	-1,7	-1,7	-0,5	2,7	4,0	3,9	1,0
25.	0,8	1,4	1,7	0,4	-0,7	-1,2	-1,6	-0,3	1,5	2,6	3,3	0,7
28.	1,1	1,4	1,8	0,4	-0,8	-1,1	-1,4	-0,3	1,9	2,5	3,2	0,7
30.	1,7	2,3	2,8	0,8	-1,2	-1,8	-2,1	-0,6	2,9	4,1	4,9	1,4



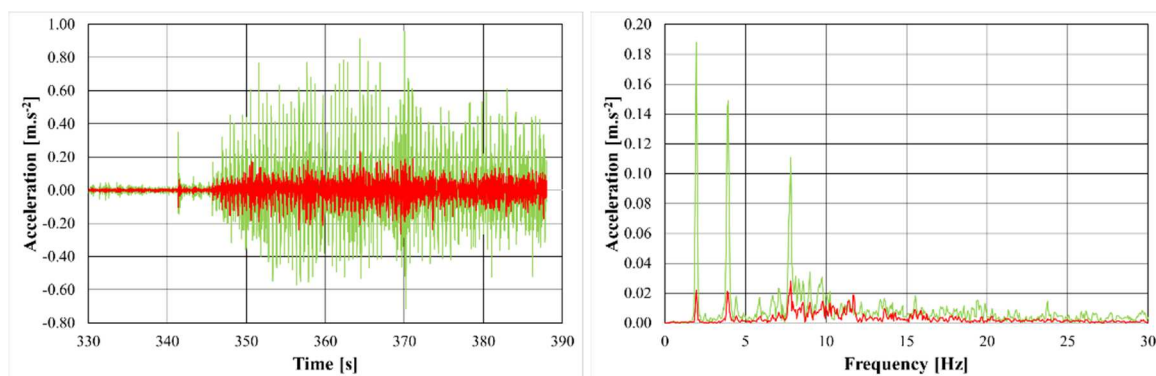
Obrázek 42: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FK Dukla Praha, snímač č. 4 (zeleně) a snímač č. 3x (červeně)



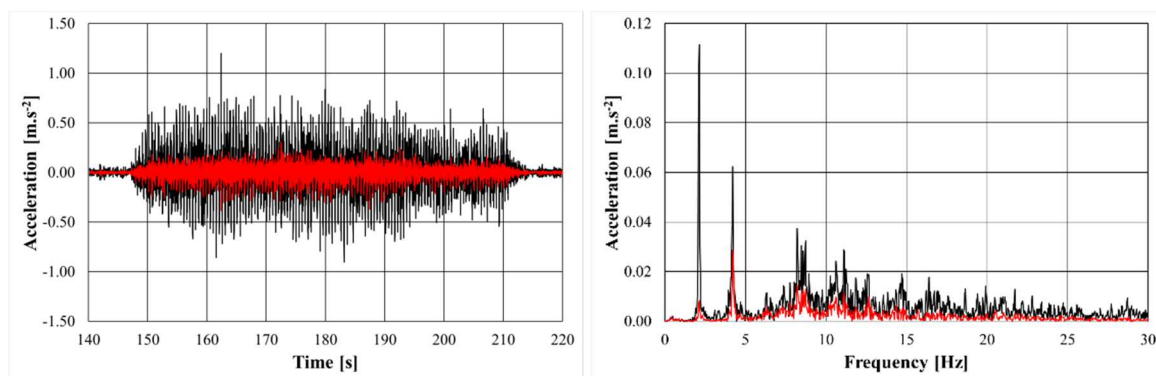
Obrázek 43: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FK Dukla Praha, snímač č. 3z (černě) a snímač č. 3x (červeně)



Obrázek 44: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FC Zbrojovka Brno, snímač č. 4 (zeleně) a snímač č. 3x (červeně)



Obrázek 45: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu 1 FC Slovácko, snímač č. 4 (zeleně) a snímač č. 3x (červeně)



Obrázek 46: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FC Bohemians Praha 1905, snímač č. 3z (černě) a snímač č. 3x (červeně)

5.1.3 Vyhodnocení

Z výsledků je vidět, že maximální dynamická odezva tribuny na účinky diváků byla zaznamenána v druhém zápase podzimní části (rok 2013), když probíhala oslava úspěšného ukončení podzimní části soutěže. Bohužel se nedá přesně určit, při jakém druhu chování fanoušků tato úroveň vibrací nastala.

Při experimentu v roce 2015 bylo zjištěno, že diváci vyvolávají největší úroveň vibrací tribuny při skákání jednotlivých řad ve svislém směru (skákání - 2. typ). Při tomto druhu chování diváci budili konstrukci s frekvencí okolo 2 Hz. Tato budicí frekvence je vzdálená od vlastních frekvencí tribuny.

Dle ISO 10137:2007 [18] se i u maximálních zaznamenaných úrovní kmitání jedná o přípustné vibrace pro stadiony. Nicméně tyto vibrace již pasivní diváci vnímají. Dle ČSN ISO 2631-1 [14] vnímá člověk vibrace již od $W_k > 0,015 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Během experimentů byla nejvyšší hodnota frekvenčně vážených vibrací podle váhové křivky W_k vyhodnocena o velikosti $0,428 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (experiment z roku 2013) resp. $0,248 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (experiment z roku 2015). Z pohledu pohodlí diváků můžeme vibrace sledované tribuny zařadit do kategorie „trochu nepohodlné“. Během skákání byl maximální rozkmit výchylky tribuny 4,9 mm. Snímače byly umístěny na konci tribuny, dá se tvrdit, že tribuna se deformovala jako celek nikoliv pouze lokálně na příčnicích.

Při nejintenzivnějších formách skákání (rok 2013 a první zápas 2015) diváci skákali s budicí frekvencí 2,35-2,40 Hz a v následujících zápasech došlo k poklesu budicí frekvence k hodnotě okolo 2,0 Hz.

5.2 Tribuna na stadionu SK Slavia Praha v Edenu

5.2.1 Popis experimentu

Experiment na stadionu v Praze Edenu probíhal v jarní části české nejvyšší fotbalové soutěže ročníku 2015/2016. Jak již bylo řečeno dříve, během podzimní části soutěže SK Slavia Praha byla na pokraji bankrotu a v zimní přestávce došlo ke změně majitelů, kteří přivedli nové posily a tím vzbudili velká očekávání diváků. Očekávání se projevilo v naštvanosti prvního domácího zápasu s týmem FC Baník Ostrava, který domácí tým vyhrál. V dalších kolech tým střídavě vyhrával (na domácím hřišti) a prohrával (na venkovních stadionech) a ustálil se na konečném 5. místě tabulky, což vedlo k poklesu návštěvnosti (kap. 4.2.2.). Během experimentu byly sledovány vibrace tribuny při zápasech SK Slavia Praha s týmy FC Baník Ostrava, FC Fastav Zlín, FK Teplice a 1. FC Slovácko.

Slavie během měření většinu zápasů vyhrála, pouze zápas s FK Teplice skončil remízou.

Měření probíhalo obdobně jako na Letné za pomoci čtveřice miniaturních piezoelektrických snímačů zrychlení Delta Tron typ 4507 B005, které byly pomocí lepidla připevněny na betonovou konstrukci tribuny (Obr. 47). Dva snímače byly umístěny na šikmých betonových průvlacích, kde snímaly zrychlení ve svislém směru a dvojice snímačů byla umístěna uprostřed vodorovné nosné konstrukce tribuny a zaznamenávala zrychlení ve vodorovném směru a svislém směru. Opětovně byla použita měřicí ústředna Frontend 3050-B-040 Brüel & Kjær, která umožňovala připojit pouze 4 snímače.



Obrázek 47: Pozice snímačů během experimentu na stadionu v Praze v Edenu

5.2.2 Výsledky měření

V následujících tabulkách a grafech jsou zaznamenány úrovně vibrací vyhodnocené při jednotlivých zápasech.

Tabulka 40: Vyhodnocené maximální špičkové hodnoty zrychlení tribuny při experimentu z roku 2016

kolo	Maximální zrychlení tribuny [ms^{-2}]				Druh chování
	1.	2.	3.	4.	
19.	0,420	2,84	0,50	0,76	Skákání – celé řady – svisle
21.	0,329	1,74	0,26	0,63	Skákání – celé řady – vodorovně
26.	0,310	1,79	0,27	0,74	Skákání – celé řady – vodorovně
28.	0,315	2,05	0,31	0,68	Skákání – svislé řady – vodorovně

Tabulka 41: Budicí frekvence z roku 2016

kolo	Budící frekvence diváků [Hz]				Druh chování
	1.	2.	3.	4.	
19.	2,16	4,34	6,53	8,69	Skákání – celé řady – svisle
21.	2,03	4,02	5,88	8,25	Skákání – svislé řady – vodorovně
26.	2,06	4,19	6,38	8,25	Skákání – svislé řady – vodorovně
28.	2,13	4,19	6,31	8,43	Skákání – svislé řady – vodorovně

Tabulka 42: Vyhodnocené maximální RMS hodnoty zrychlení tribuny při experimentu z roku 2016

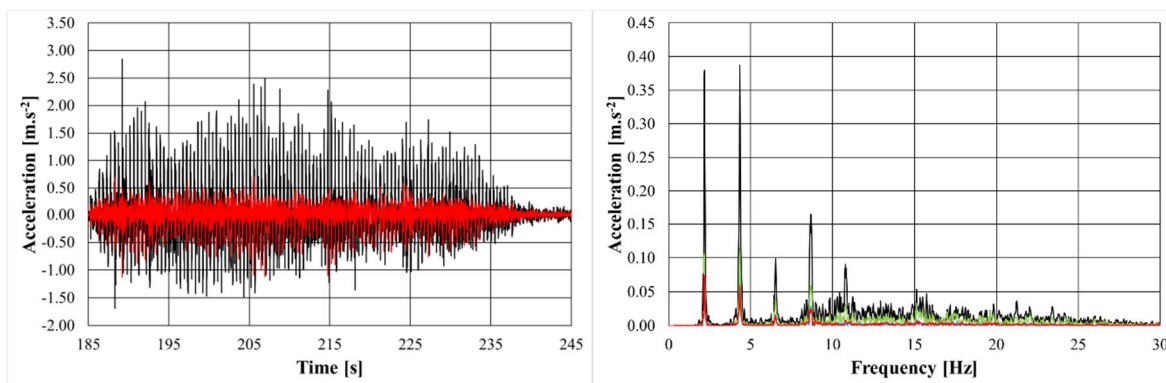
kolo	RMS hodnota m.s^{-2}				Druh chování
	1.	2.	3.	4.	
19.	0,113	0,652	0,113	0,229	Skákání – celé řady – svisle
21.	0,083	0,420	0,067	0,166	Skákání – svislé řady – vodorovně
26.	0,068	0,422	0,072	0,174	Skákání – svislé řady – vodorovně
28.	0,070	0,462	0,072	0,191	Skákání – svislé řady – vodorovně

Tabulka 43: Maximální vážené RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené při experimentu z roku 2016

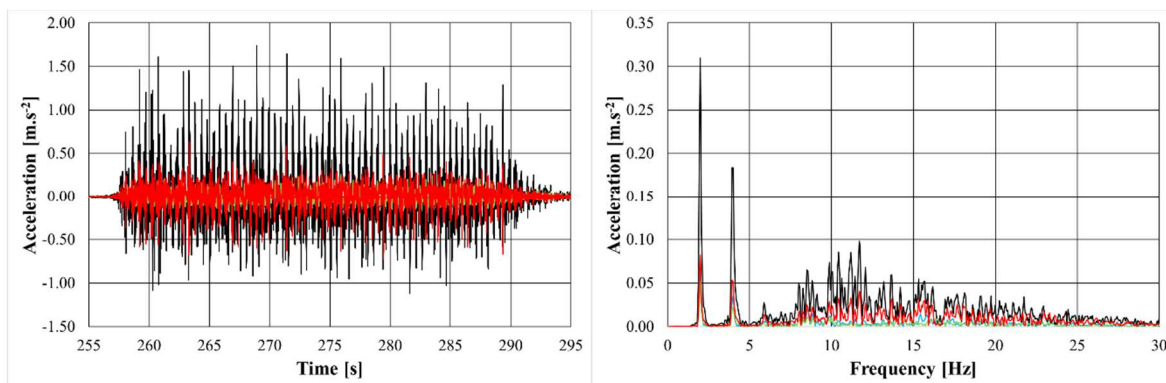
kolo	Váhová funkce W_k			Váhová funkce W_d	Váhová funkce W_m			
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
19.	0,078	0,471	0,072	0,066	0,060	0,346	0,054	0,115
21.	0,062	0,324	0,045	0,070	0,058	0,301	0,046	0,093
26.	0,055	0,349	0,055	0,067	0,049	0,296	0,052	0,096
28.	0,053	0,356	0,051	0,076	0,049	0,322	0,048	0,103

Tabulka 44: Maximální vyhodnocené výkmity výchylky nosné konstrukce sledovaného sektoru tribuny z roku 2016

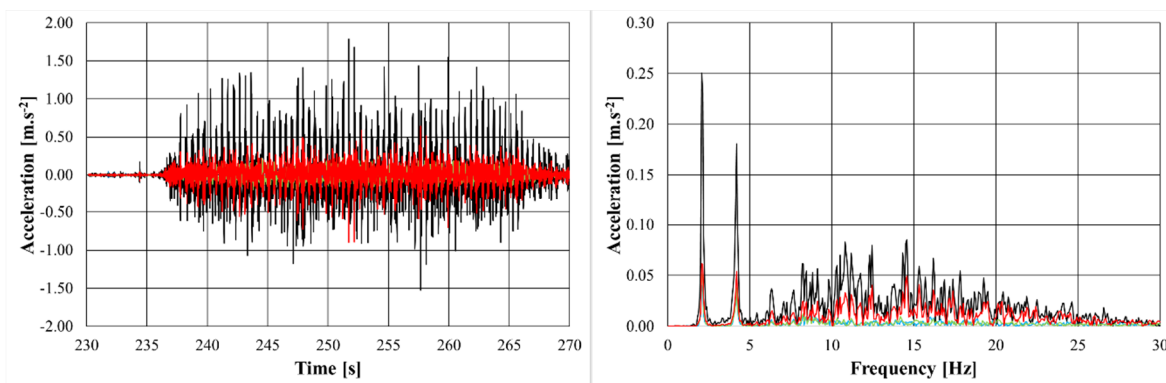
kolo	Amplituda kladná [mm]				Amplituda záporná [mm]				Rozkmit [mm]			
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
19.	0,8	3,1	0,8	1,4	-0,1	-3,7	-0,9	-1,1	0,9	6,8	1,7	2,5
21.	0,7	2,6	0,7	0,9	-0,7	-2,9	-0,1	-0,9	1,4	5,5	0,8	1,8
26.	0,5	2,3	0,5	0,8	-0,6	-2,7	-0,6	-0,7	1,1	5,0	1,1	1,5
28.	0,5	2,4	0,6	1,7	-0,6	-2,7	-0,7	-1,5	1,1	5,1	1,3	3,2



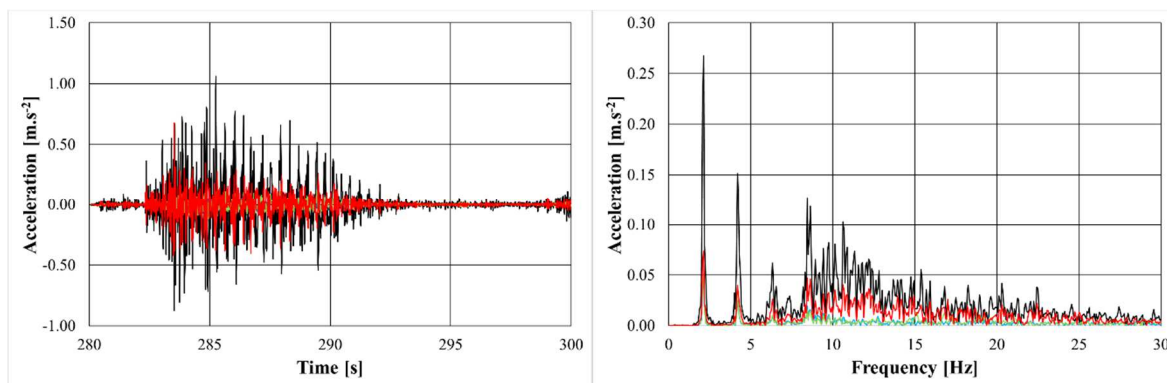
Obrázek 48: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FC Baník Ostrava, snímač č. 2 (černě) a snímač č. 4 (červeně) [44]



Obrázek 49: Záznam skákání diváků (3. typ) ze zápasu s FC Fastav Zlín, snímač č. 2 (černě) a snímač č. 4 (červeně) [51]



Obrázek 50: Záznam skákání diváků (3. typ) ze zápasu s FC Teplice, snímač č. 2 (černě) a snímač č. 4 (červeně)



Obrázek 51: Záznam skákání diváků (3. typ) ze zápasu s 1 FC Slovácko, snímač č. 2 (černě) a snímač č. 4 (červeně)

5.2.3 Vyhodnocení

Na Slavii byla největší dynamická odezva tribuny zaznamenána během skákání jednotlivých řad ve vswislém směru (2. typ) při prvním sledovaném utkání. V dalších zápasech diváci tento způsob chování již nepoužili a největší kmitání bylo zaznamenáno při skákání jednotlivých řad ve vodorovném směru (3. typ). Dle ISO 10137:2007 [18] se jedná o přípustné vibrace pro stadiony. Tyto vibrace již člověk vnímá. Dle ČSN ISO 2631-1[14] vnímá člověk vibrace již od úrovně vibrací vážených podle křivky $W_k > 0,015 \text{ ms}^{-2}$. Během experimentů byla nejvyšší hodnota vibrací vážených podle křivky W_k vyhodnocena o velikosti $0,471 \text{ ms}^{-2}$. Z pohledu pohodlí diváků můžeme tribunu zařadit do kategorie „trochu nepohodlné“. Diváci budili tribunu základní frekvencí mezi 2,06-2,15 Hz. Tato budící frekvence je vzdálená od vlastních frekvencí tribuny

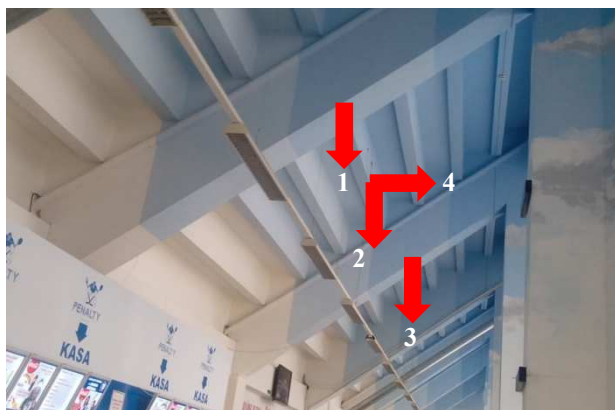
Během skákání byl vyhodnocen maximální rozkmit průhybu tribuny 6,8 mm. Tyto výchylky byly vyhodnoceny uprostřed rozpětí vodorovné nosné konstrukce tribuny. Na šikmých průvlacích byl vyhodnocen maximální rozkmit výchylek 1,7 mm na snímači č. 3.

5.3 Tribuna na zimním stadionu v Plzni

5.3.1 Popis experimentu

Experiment, který byl realizován na zimním stadionu v Plzni, probíhal během extraligy ledního hokeje v sezoně 2015/2016. Měření probíhalo během celého ročníku včetně play-off. Vyhodnoceno bylo 6 nejzajímavějších zápasů. Konkrétně se jednalo o utkání domácího mužstva HC ŠKODA Plzeň s týmy HC Bílí tygři Liberec (3. kolo), HC Kometa Brno (7. kolo), HK Mountfield Hradec Králové (21. a 47 kolo) a HC Olomouc (43. kolo a play-off) [36,37].

Měření probíhalo obdobně jako na předchozích dvou stadionech pomocí čtveřice miniaturních piezoelektrických snímačů zrychlení Delta Tron typ 4507 B005, které byly pomocí lepidla připevněny na betonovou konstrukci tribuny. Dva snímače byly umístěny na šikmých železobetonových průvlacích, kde snímaly zrychlení ve vswislém směru, a zbývající dvojice snímačů byla uchycena uprostřed rozpětí vodorovné nosné konstrukce tribuny, kde zaznamenávala zrychlení ve vodorovném a vswislém směru. Opětovně byla použita měřicí ústředna Brüel & Kjær (3560 B), která umožňovala připojit pouze 4 snímače.



Obrázek 52: Pohled na spodní líc sletované tribuny na zimním stadionu v Plzni s vyznačenou polohou použitých snímačů vibrací

5.3.2 Výsledky měření

V následujících tabulkách a grafech jsou zaznamenány maximální úrovně vibrací vyhodnocené při jednotlivých zápasech.

Tabulka 45: Vyhodnocené maximální výkmity zrychlení sledovaného sektoru tribuny – 2015/2016

Kolo	Maximální výkmit zrychlení tribuny [ms^{-2}]				Druh chování
	1.	2.	3.	4.	
3.	0,05	0,21	0,07	0,11	Vstřelení gólu
7.	0,04	0,20	0,56	0,10	Vstřelení gólu
21.	0,05	0,21	0,10	0,10	Vstřelení gólu
43.	0,07	0,32	0,07	0,28	Vstřelení gólu
47.	0,07	0,32	0,12	0,17	Vstřelení gólu
Play-off	0,08	0,45	0,12	0,22	Vstřelení gólu

Tabulka 46: Budící frekvence - 2015/2016

kolo	Budící frekvence diváků [Hz]				Druh chování
	1.	2.	3.	4.	
3.	2,37	4,56	4,94	6,94	Vstřelení gólu
7.	2,82	4,00	4,43	5,58	Vstřelení gólu
21.	2,25	3,37	4,50	6,19	Vstřelení gólu
43.	2,19	3,25	4,28	5,71	Vstřelení gólu
47.	2,88	3,87	4,46	6,25	Vstřelení gólu
Play-off	2,34	2,88	4,12	5,13	Vstřelení gólu

Tabulka 47: Vyhodnocené maximální RSM hodnoty zrychlení sledované tribuny- 2015/2016

kolo	RMS hodnota $m.s^{-2}$				Druh chování
	1.	2.	3.	4.	
3.	0,006	0,027	0,007	0,021	Vstřelení gólu
7.	0,009	0,032	0,009	0,024	Vstřelení gólu
21.	0,007	0,021	0,006	0,017	Vstřelení gólu
43.	0,008	0,031	0,010	0,033	Vstřelení gólu
47.	0,007	0,029	0,009	0,021	Vstřelení gólu
Play-off	0,013	0,057	0,017	0,037	Vstřelení gólu

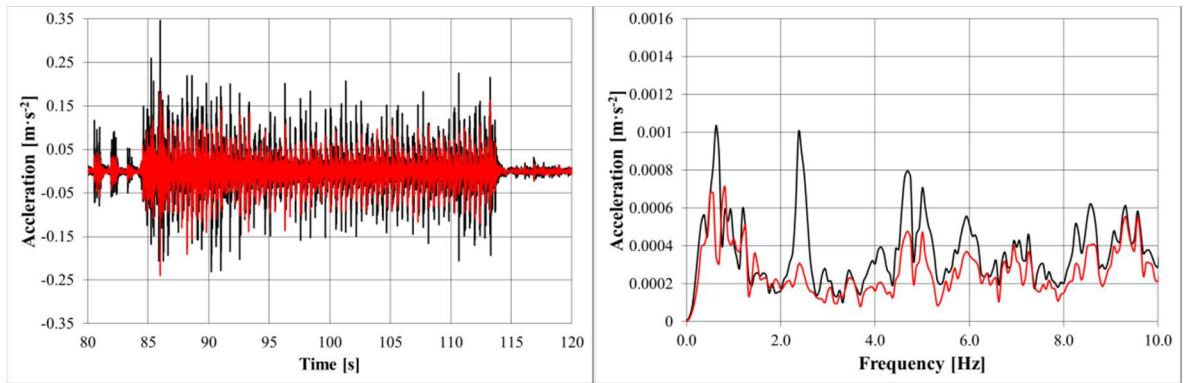
Tabulka 48: Vyhodnocené maximální vážené RMS hodnoty zrychlení sledované tribuny – 2015/2016

kolo	Váhová funkce W_k			Váhová funkce W_d	Váhová funkce W_m			
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
3.	0,008	0,027	0,010	0,003	0,004	0,013	0,004	0,008
7.	0,002	0,007	0,002	0,001	0,007	0,003	0,009	0,002
21.	0,003	0,010	0,003	0,002	0,002	0,005	0,002	0,004
43.	0,008	0,030	0,010	0,021	0,004	0,014	0,005	0,010
47.	0,004	0,015	0,006	0,002	0,002	0,007	0,003	0,005
Play-off	0,012	0,039	0,014	0,005	0,005	0,018	0,006	0,013

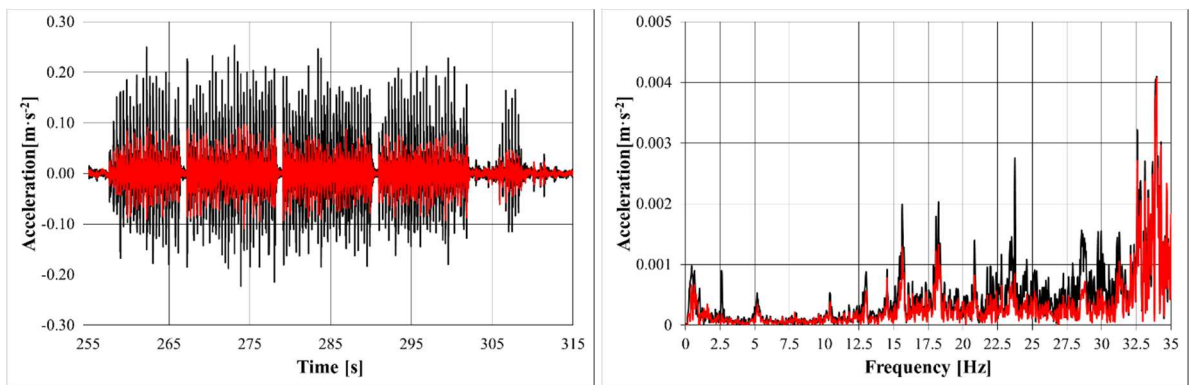
Tabulka 49: Vyhodnocené maximální výkmity výchylky sledovaného sektoru tribuny - 2015/2016

Kolo	Amplituda kladná [mm]				Amplituda záporná [mm]				Rozkmit [mm]			
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
3.	0,4	0,9	0,5	0,4	-0,5	-0,9	-0,7	-0,4	0,9	1,8	1,2	0,8
7.	0,4	0,8	0,7	0,5	-0,4	-0,8	-0,7	-0,5	0,8	1,6	1,4	1,0
21.	0,5	0,9	1,4	0,7	-0,4	-0,8	-1,0	-0,7	0,9	1,7	2,4	1,4
43.	0,5	0,8	0,7	0,4	-0,4	-0,9	-0,9	-0,5	0,9	1,7	1,6	0,9
47.	0,4	1,0	0,7	0,4	-0,4	-1,0	-0,9	-0,5	0,8	2,0	1,6	0,9
Play-off	0,4	0,6	0,7	0,4	-0,4	-0,7	-0,9	-0,4	0,8	1,3	1,5	0,8

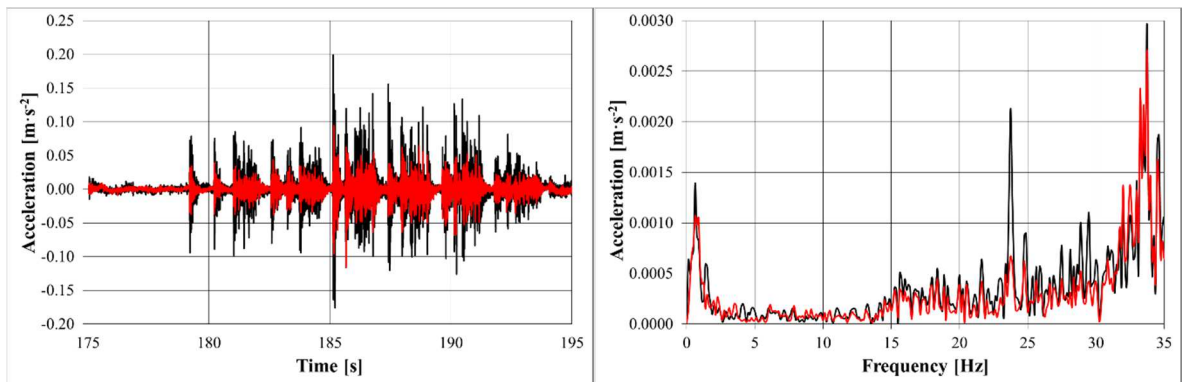
Ukázka nejzajímavější naměřené odezvy konstrukce tribuny.



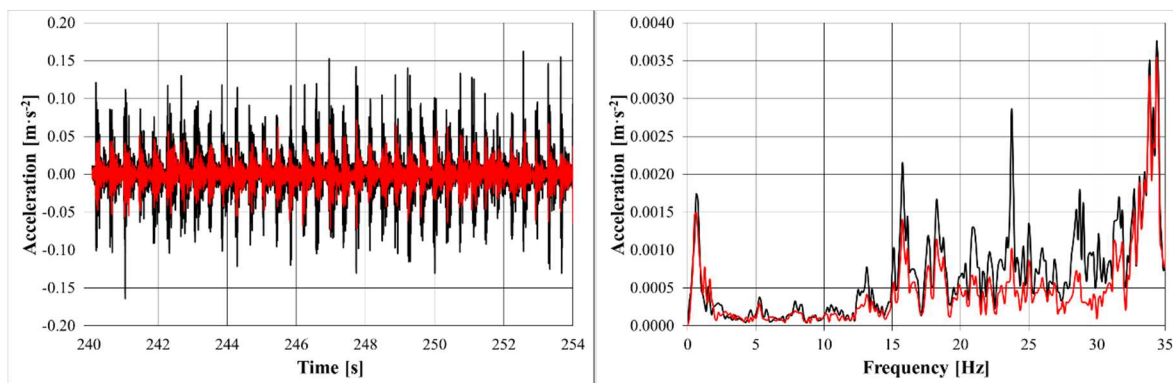
Obrázek 53: Záznam vibrací tribuny při vstřelení gólu na snímačích č. 2 (černá) a snímači č. 4 (červená)



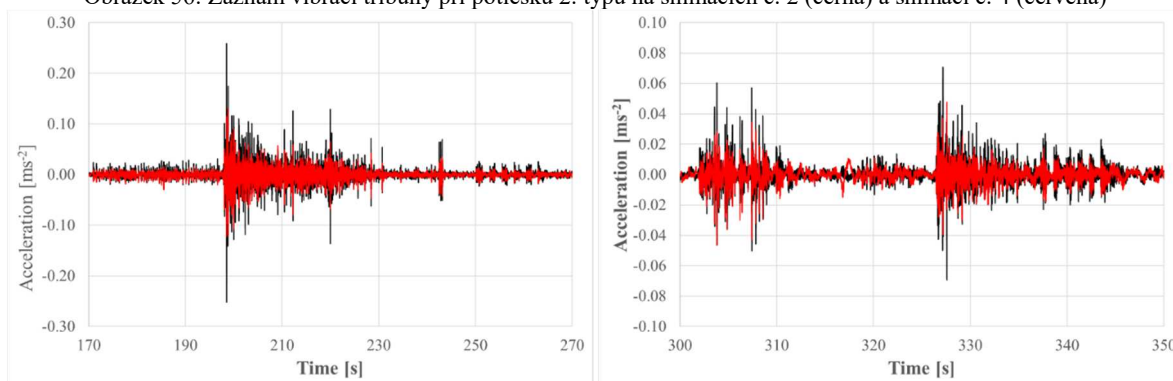
Obrázek 54: Záznam vibrací při vstřelení vítězného gólu na snímačích č. 2 (černá) a snímači č. 4 (červená)



Obrázek 55: Záznam vibrací tribuny při potlesku 1. typu na snímačích č. 2 (černá) a snímači č. 4 (červená)



Obrázek 56: Záznam vibrací tribuny při potlesku 2. typu na snímačích č. 2 (černá) a snímači č. 4 (červená)



Obrázek 57: Záznam úrovně vibrací tribuny při vstřelení vítězného gólu v základní části ligové sezony (vlevo) a v play-off (vpravo)

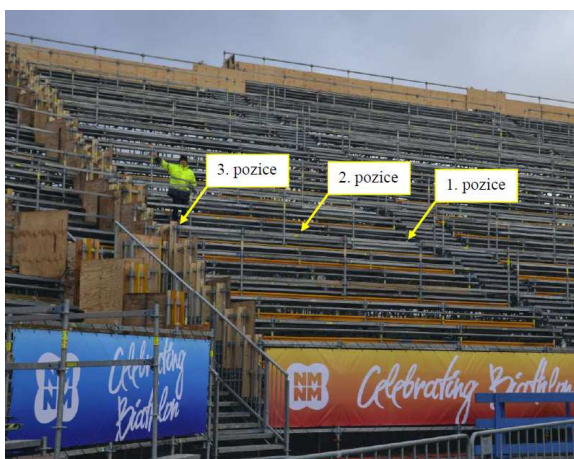
5.3.3 Vyhodnocení

Největší dynamická odezva tribuny na účinky diváků byla vždy zjištěna během vstřelení gólu domácím mužstvem. Maximální intenzita vibrací tribuny byla naměřena při vstřelení vítězného gólu v prodloužení zápasu play-off. Dle ISO 10137:2007[18] tyto vibrace nepřekračují přípustnou úroveň pro stadiony. Nicméně tyto vibrace osoba přítomná na tribuně cítí. Totiž dle ČSN ISO 2631-1 [14] vnímá člověk vibrace již od úrovně vibrací vážených podle váhové funkce $W_k > 0,015 \text{ ms}^{-2}$. Během experimentů byla nejvyšší hodnota vibrací vážených podle váhové funkce W_k vyhodnocena o velikosti $0,039 \text{ ms}^{-2}$. Z pohledu pohodlí diváků můžeme tribunu na základě zjištěných největších úrovní vibrací zařadit do kategorie, kde vibrace „nejsou nepohodlné“.

5.4 Montovaná tribuna v areálu Vysočina Arény v Novém Městě na Moravě

5.4.1 Popis experimentu

Poslední provedený experiment se zaměřil na kmitání montované tribuny. Měření probíhalo během čtyř závodů světového poháru v biatlonu, který se v Novém Městě nad Metují konal v prosinci 2016. Snímače byly upevněny na konstrukci tribuny tak, aby sledovaly vibrace ve směru tří os x, y, z. Bylo použito devět piezoelektrických snímačů zrychlení Delta Tron, pět snímačů typu 4507 B005 a čtyři snímače typu 8344. Snímače byly pomocí magnetů připevněny na vybraných ocelových nosných prvcích tribuny [7].



Obrázek 58: Pozice snímačů na tribuně [7]

Na pozicích č. 1 a č. 3 byly snímače umístěny na ocelových sloupcích konstrukce. Na pozici č. 2 byly snímače umístěny na vodorovné spojovací nosníky, které byly v blízkosti podlážek konstrukce.



Obrázek 59: Ukázka snímačů instalovaných na konstrukci – pozice č. 2 (vlevo a uprostřed) a krajní pozice č. 3 (vpravo) [7]

5.4.2 Výsledky měření

Výsledky měření, které jsou popsány v této kapitole, disertant vyhodnocoval ve spolupráci s Ing. Jiřím Hubkou v rámci jeho diplomové práce [7]. Samotný experiment byl velmi ovlivněn konstrukcí tribuny. Často docházelo k přebuzení snímačů zrychlení typu 8344, jak lidé kopali do ocelových prvků, na kterých byly snímače upevněny. V těchto případech špičková hodnota zrychlení překročila amplitudový rozsah snímačů deklarovaný hodnotou $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Tyto vysoké hodnoty, které souvisejí s přebuzením snímačů, byly z vyhodnocení vyloučeny a následně byly vyhodnoceny hodnoty maximálních zrychlení tribuny a RMS hodnoty pouze ze zbylých částí záznamů. Budicí frekvence byly vyhodnoceny pouze pro směr X a Y. Ve směru Z se nadalo přesně určit, jaká je hodnota budicí frekvence. Podrobné vyhodnocení vibrací tribuny proběhlo pouze pro závody s hromadným startem, které byly z pohledu dynamiky na základě předběžného vyhodnocení nejzajímavější.

V následujících tabulkách a grafech jsou uvedeny vyhodnocené maximální špičkové hodnoty (výkmity) a RMS hodnoty zrychlení tribuny. V následujících tabulkách a grafech jsou uvedeny hodnoty zrychlení tribuny a RMS hodnoty.

Tabulka 50: Maximální výkmity zrychlení tribuny během hromadného závodu mužů a žen [7]

Kolo	Maximální zrychlení tribuny [ms ⁻²]									Druh chování
	1x	1y	1z	2x	2y	2z	3x	3y	3z	
Muži	0,739	0,645	0,330	0,316	0,976	0,189	0,220	0,307	0,090	potlesk
Ženy	0,242	0,849	0,126	0,235	1,28	0,310	0,326	1,194	0,104	potlesk

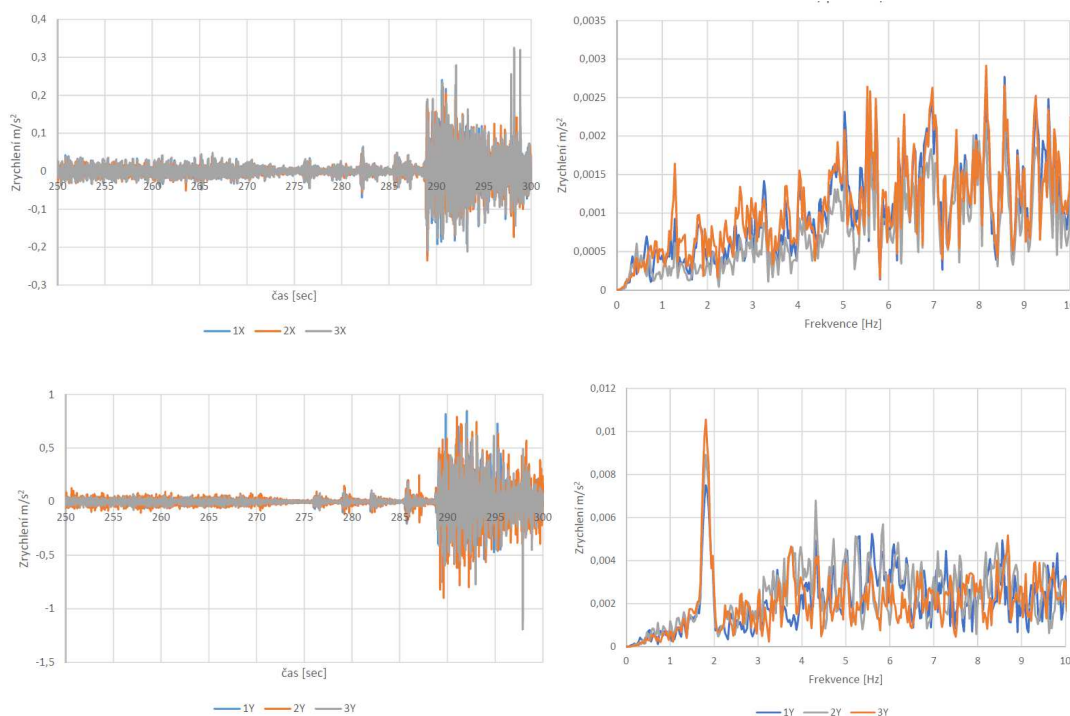
Tabulka 51: Maximální RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené během hromadného závodu mužů a žen [7]

Kolo	RMS hodnota m.s ⁻²								
	1x	1y	1z	2x	2y	2z	3x	3y	3z
Muži	0,121	0,156	0,140	0,062	0,195	0,019	0,058	0,040	0,022
Ženy	0,058	0,179	0,078	0,055	0,215	0,029	0,063	0,193	0,023

Tabulka 52: Budící frekvence během hromadného závodu mužů a žen [7]

Kolo	Budící frekvence [Hz]								Druh chování
	Osa X				Osa Y				
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	
Muži	1,75	5,0	5,875	6,35	1,85	2,20	4,40	6,05	Potlesk
Ženy	1,75	4,13	4,88	5,63	1,82	4,00	5,06	5,56	Potlesk

Ukázka vibrací tribuny v průběhu poslední úspěšné střelby české závodnice Gabriely Koukalové, která v závodu zvítězila.



Obrázek 60: Záznam vibrací tribuny v průběhu poslední střelby české závodnice při závodu žen - osa x (nahore) a osa y (dole) [51].

5.4.3 Vyhodnocení

Záznamy vibrací z biatlonových závodů v Novém Městě na Moravě jsou velmi ovlivněny přebuzením několika použitých snímačů, které nastávalo při kopnutí do ocelových částí konstrukce diváky, kteří si pravděpodobně o konstrukci tribuny oklepávali boty. Největší odezva konstrukce tribuny byla zachycena při závěrečném závodě (hromadný závod žen), který vyhrála česká závodnice. Konkrétně se jednalo o situaci při její bezchybné závěrečné střelbě, kdy diváci tleskali jejímu úspěchu. Frekvence budící síly vyvolané diváky při byla nižší než na zbývajících sledovaných stadionech. Vibrace tribuny naměřené při experimentu byly do značné míry ovlivněny tím, že pořadatel zakázal skákání.

5.5 Zhodnocení

Výsledky získané v rámci práce ukázaly, že diváci tribuny nejvíce rozkmitali při skákání celých řad. Skákání bylo během realizovaných experimentů zaznamenáno pouze na fotbalových stadionech, kde diváci budili tribuny se základní budící frekvencí mezi 2,0 až 2,4 Hz. Největší dynamická odezva tribuny byla znamenána na tribuně, které je součástí stadionu v Edenu. Je velký předpoklad, že podobná odezva by se naměřila i na letenském stadionu, kdyby snímače byly umístěny nikoliv na koncích konzolových ocelových nosníků ale uprostřed rozpětí betonové desky, která tvoří vodorovnou nosnou konstrukci tribuny. Na obou fotbalových stadionech byly zaznamenány vibrace, které je lidské tělo již schopné vnímat a které mohou v člověku vyvolat nepříjemné pocity. Na tribuně hokejového stadionu v Plzni byla největší dynamická odezva zaznamenána během reakce diváků na vstřelení gólů. Při experimentech prováděných na zimním stadionu nebylo ani jednou zaznamenáno synchronní skákání diváků, a to je vedle vyšší základní vlastní frekvence tribuny druhý podstatný důvod, proč byla intenzita zaznamenaných vibrací výrazně nižší než na fotbalových zápasech. Vibrace zaznamenané na všech třech sledovaných pevných tribunách je člověk schopen vnímat, jelikož hraniční RMS hodnota zrychlení váženého podle váhové funkce W_k pro vnímání vibrací byla na každém stadionu alespoň v jednom měření překročena.

Specifickou konstrukcí jsou montované tribuny. Tyto tribuny jsou velmi náchylné na rozkmitávání a z těchto důvodů je na nich zpravidla skákání diváků zakázáno. Při biatlonových závodech byla největší dynamická odezva montované tribuny zaznamenána během potlesku diváků při střelbě.

Všechny realizované experimenty ukázaly i to, že úroveň vibrací tribuny vyvolaných diváky úzce souvisí s aktuálním postavením podporovaného týmu v tabulce či s pozicí oblíbených závodníků na trati. Pokud diváci mají naději, že „jejich“ tým nebo závodník bude dobře umístěn, je úroveň vibrací vyšší (půlmistr, nový majitel, play-off v hokeji, výhra závodnice). Diváci vždy budili tribunu bez ohledu na druh sportu a typ nosné konstrukce tribuny základní frekvencí okolo 2,0 Hz. Tento výsledek koresponduje se závěry experimentů provedených ve světě, kde diváci budili základní frekvenci v rozmezí od 2,0 do 2,4 Hz [8,20].

Největší výchylky tribuny byly zaznamenány během utkání SK Slavia Praha, jednalo se o výchylky vodorovné nosné konstrukce tribuny – příčné desky, kde byl zachycen rozkmit 6,7 mm, přičemž šikmý průvlak, na kterém je vodorovná nosná konstrukce uložena, kmital s rozkmitem pouze 1,7 mm. Na letenském stadionu byly zaznamenány výchylky ocelových nosníků ve sledovaných bodech s rozkmitem o velikosti 4,9 mm. Toto kmitání tribun bylo viditelné pouhým okem.

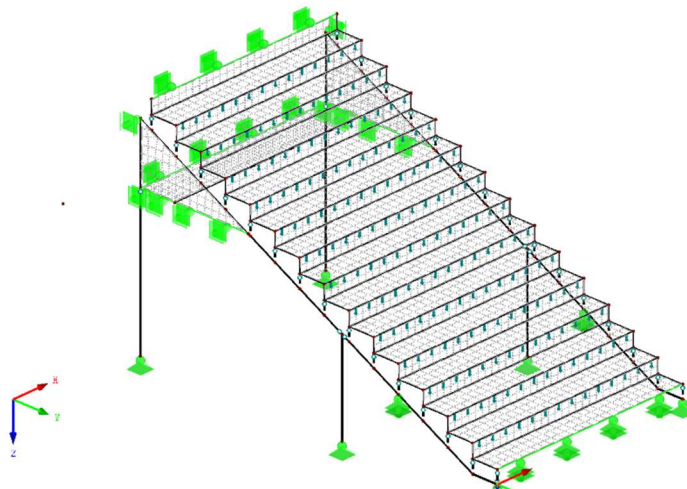
Sledované tribuny jsou z pohledu dynamiky bezpečné, jelikož budící frekvence jsou vzdáleny od vlastních frekvencí tribun, pouze jsou „trochu nepohodlné“ dle ČSN ISO 2631-1 [14].

6. Model dynamického zatížení tribun

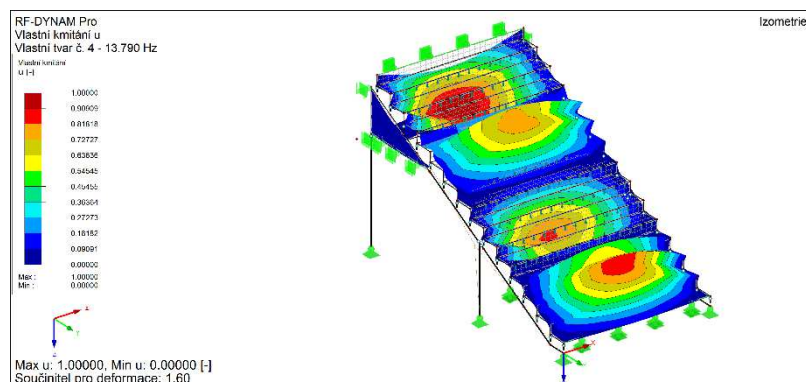
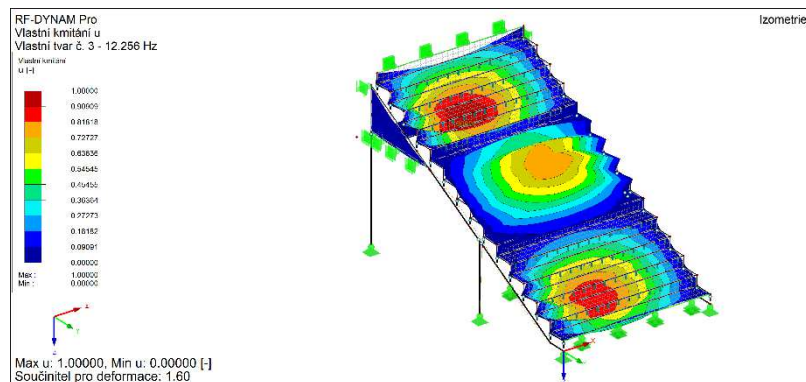
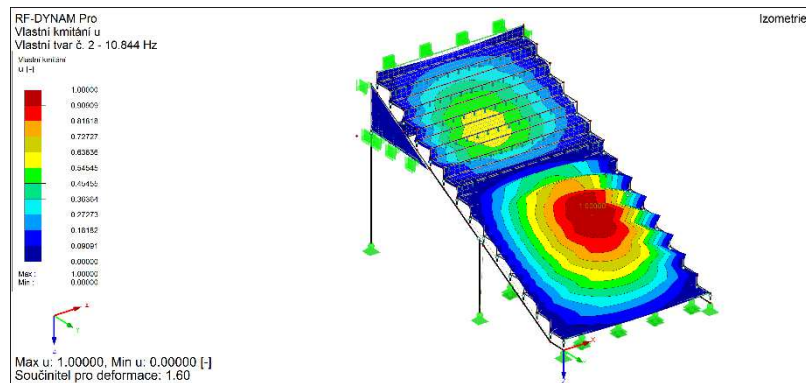
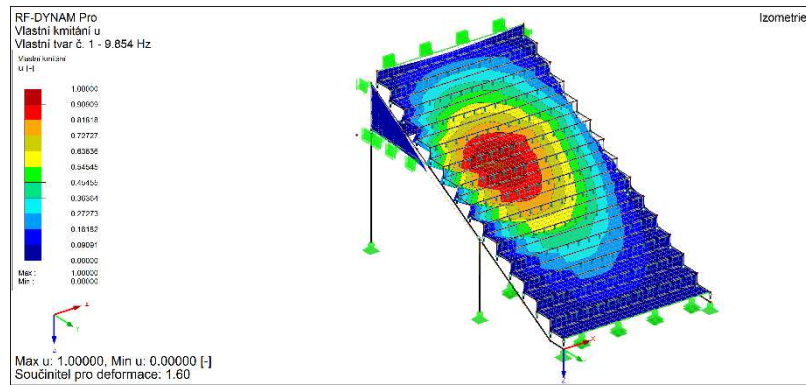
6.1 Vstupní údaje

Během experimentální modální analýzy jednotlivých sledovaných tribun, proběhla pasportizace jejich nosných konstrukcí. V rámci jednání s pořadatelem jednotlivých sportovních událostí se podařilo získat projektovou dokumentaci sledované tribuny na stadionu v pražském Edenu (poskytla společnost RECOC s.r.o.) a ve Vysočina Aréně v Novém Městě na Moravě (poskytla společnosti PERI s.r.o.). Během pasportizace těchto tribun byly ověřeny jejich rozměry. Pro zkoumanou tribunu na stadionu na Letné a ani pro tribunu na stadionu v Plzni se nepodařilo zajistit původní projektovou dokumentaci. Pro tyto dvě tribuny byly v rámci realizovaných experimentů zaměřeny jejich rozměry a zjištěny druhy použitého stavebního materiálu, materiálové parametry ale nebyly vyšetřeny. Na základě pasportizace byly na katedře mechaniky sestaveny matematické modely všech čtyř sledovaných tribun, kde následně došlo k úpravě materiálových vlastností a okrajových podmínek uložení jednotlivých prvků tak, aby se vypočtené vlastní frekvence a vlastní tvary tribuny co nejvíce shodovaly s vlastními frekvencemi a vlastními tvary získanými z experimentální modální analýzy tribuny.

Pro účely této práce byly použity pouze dva matematické modely, model tribuny na stadionu v Praze v Edenu a model tribuny na stadionu v Praze na Letné. Oba tyto modely byly realizovány jako systém kombinující prutové a deskostěnové prvky, který byl sestaven v softwaru R-FEM vydaném společností Dlubal software GmbH.



Obrázek 61: Matematický model zkoumané tribuny na stadion v Edenu



Obrázek 62: Ukázka vlastních tvarů vypočtených na matematickém modelu tribuny na stadionu v Edenu

Tabulka 53: Verifikace matematického modelu na základě změřených vlastních frekvencí – tribuna stadionu v Edenu

Vlastní frekvence	Experiment	R-FEM
f (1) [Hz]	9,6	9,9
f (2) [Hz]	11,1	10,8
f (3) [Hz]	12,7	12,3
f (4) [Hz]	13,5	13,8
f (5) [Hz]	15,4	14,9

Z výše uvedeného porovnání (viz Tab. 53) je vidět, že sestavený matematický model dostatečně vystihuje dynamické vlastnosti skutečné tribuny. Frekvence, které byly naměřeny při experimentu in situ, se od matematického modelu odlišují do 5%. Tato odchylka byla na všech betonových tribunách (stadion v Edenu, zimní stadion v Plzni) a ocelobetonových (stadion na Letné).

6.2 Výběr modelu dynamického zatížení tribun

Pro návrh tribuny v pražském Edenu byla použita doporučení dle příručky britských inženýrů [15]. V tomto doporučení se dají dohledat budící frekvence pro jednotlivé typy chování diváků. Z příručky vyplynulo, že se nemusí posuzovat dynamické účinky diváků na tribunu, jelikož její vlastní frekvence je vyšší než 8 Hz. I přesto při návrhu stadionu v Edenu vyvstal požadavek na dynamické posouzení tribun. Bohužel ve světě neexistuje v normě definovaný relevantní model, který by popisoval matematicky dynamické chování diváků a jejich vliv na vibrace tribuny. Projektant stadionu v Edenu využil konzultace s panem profesorem Bittnarem. Společně navrhli model dynamického zatížení, který uvažoval výskok diváků na místě do výšky 5 mm nad podložku (pochozí povrch tribuny) s budící frekvencí 3,0 Hz a velikosti amplitudy zatížení 1,6 kN/m² [46].

V rámci konzultací autora této práce s projektanty, kteří se zabývají danou problematikou, došla diskuze k závěrům, že nejlepší by bylo použít modifikaci modelu pro dynamické zatížení lávek pro chodce definovaného v [24] výrazem:

$$F(t) = 180 * \sin(2\pi f_0 t) \quad [\text{N}] \quad (1)$$

nebo hodnotou ekvivalentního statického zatížení.

Parametry modelu navržené v rámci této práce byly optimalizovány tak, aby se výsledné vypočtené zrychlení tribuny neodlišovalo od výsledků experimentu do 5%. Výpočet byl realizován v softwaru R-FEM.

6.3 Návrh parametrů matematického modelu dynamického zatížení tribun

Pro optimalizaci modelu dynamického zatížení tribun byl použit model tribuny na stadionu v Edenu. Při výpočtu vynuceného kmitání modelu této tribuny byl použit logaritmický dekrement útlumu o velikosti 0,10. Největší dynamická odezva tribuny byla zaznamenána (viz. Tab. 40) v prvním zápase SK Slavia Praha – FC Baník Ostrava. Tehdy bylo naměřeno špičkové zrychlení tribuny 2,84 m.s⁻². Jak bylo řečeno výše, z výsledků experimentů vyplynulo, že největší odezva sledovaných tribun byla zaznamenána při synchronním skákání diváků ve svislém směru.

6.3.1 Návrh ekvivalentního statické zatížení

Z výsledků měření v měřítku zrychlení byla pomocí dvojnásobné integrace v časové oblasti určena maximální dynamická výchylka konstrukce tribuny na stadionu v Edenu. Maximální špičková hodnota výchylky konstrukce byla 3,7 mm. Následně bylo hledáno statické spojité zatížení, které vyvolá statický průhyb nosné konstrukce tribuny o stejné velikosti jako špičková hodnota výchylky vyhodnocena z výsledků experimentu pro typ chování diváků skákání jednotlivých řad svisle. Požadovaného průhybu bylo docíleno při zatížení 5,1 kN/m². Následně bylo toto zatížení aplikováno na matematický model tribuny na stadionu na Letné, kde byl vypočten výsledný průhyb konstrukce o velikosti 3,0 mm. Špičková hodnota výchylky vyhodnocená ze zrychlení naměřeného během experimentů byla 3,1 mm.

Z výsledků je patrné, že ekvivalentní statické zatížení o hodnotě 5,1 kN/m² reprezentuje maximální dynamické účinky diváků, které byly v rámci této práce zjištěny při experimentech na dvou fotbalových stadionech. Při uvažování návrhového zatížení tribuny od diváků podle normy ČSN EN 1990-1-1 [10] hodnotou 3,0 kN/m² lze na základě výrazu (2) stanovit dynamický součinitel pro toto zatížení o velikosti 2,7.

$$\delta = \frac{q_{statické} + q_{dynamické}}{q_{statické}} = \frac{5,1}{3,0} + 1 = 2,7 \quad (2)$$

6.3.2 Návrh parametrů dynamického modelu zatížení

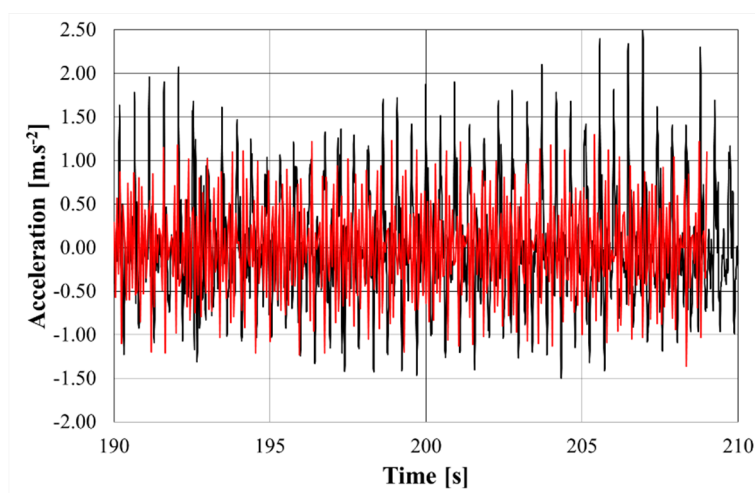
Druhým navrhovaným jednoduchým modelem dynamického zatížení tribun, který je definován výrazem (3), je použití upravené rovnice pro dynamické zatížení lávek pro chodce (1) [45]. Do rovnice byly použity hodnoty budících frekvencí, které byly zjištěny během zápasu SK Slavie Praha – FC Baník Ostrava (viz Tab. 41).

$$F(t) = \sum_{i=1}^4 A_i * \sin(2\pi f_i t) \quad (3)$$

Při návrhu dynamického zatížení byly ve výrazu (3) použity první čtyři budící frekvence, optimalizace koeficientů A_i byla provedena na základě dosažení co největší shody mezi výsledky experimentů a výpočtu. Výpočet byl proveden v programu R-FEM pomocí lineární implicitní Newmarkovy metody. Byly nastaveny následující parametry: Délka časového kroku 0,01 s, logaritický dekrement útlumu 0,1.

Tabulka 54: Navržené výsledné hodnoty parametrů A_i a příslušných budících frekvencí

Parametr A	Hodnota [kN/m ²]	Frekvence [Hz]
A ₁	0,65	2,16
A ₂	0,25	4,34
A ₃	0,20	6,53
A ₄	0,10	8,69



Obrázek 63: Porovnání výsledků vypočtených na matematickém modelu (červená) s odpovídajícími změřenými daty (černá)

Hlavním kritériem pro porovnání vypočtených výsledků s experimentálními daty byla shoda RMS hodnot vypočtených a změřených zrychlení tribuny. Z výsledků experimentu vyšla RMS hodnota zrychlení $0,652 \text{ m.s}^{-2}$. RMS hodnota zrychlení tribuny, které bylo vypočteno pro budící sílu definovanou vztahem (3) s hodnotami koeficientů A_i uvedenými v tabulce 54, byla $0,650 \text{ m.s}^{-2}$. Bylo dosaženo vysoké shody výsledků z modelu a z experimentu. Navržený model dynamického zatížení tribun je nutné ověřit při dalších experimentech, zda je tento model univerzální nebo zda bude muset být pro jiné typy tribun modifikován.

7. Závěr

V této disertační práci jsou popsány výsledky výzkumu, který byl zaměřen na zkoumání vibrací sportovních tribun v České republice. Výzkum navazoval na již uskutečněné experimenty ve světě, zejména v anglosaských zemích [8] a v Polsku [20], které se zabývaly chováním diváků a jimi vyvolanými vibracemi tribun během sportovní či hudební akce.

Činnosti spojené s touto disertační prací byly rozděleny do dvou základních částí. První část, v rámci které byla realizována převážná většina popsaného výzkumu, se zabývala sledováním chování diváků a současně měřením úrovně vyvolaných vibrací sportovních tribun na dvou fotbalových stadionech v Praze na Letné a v Edenu, na hokejovém stadionu v Plzni a na montované tribuně v Nové Městě na Moravě při světovém poháru v biatlonu.

Ve druhé části byly navrženy parametry dvou zjednodušených modelů dynamického zatížení tribuny diváky. Parametry navržených modelů byly verifikovány na základě výsledků provedených experimentů.

Základní výsledky disertační práce je možné shrnout do těchto několika bodů:

- Sportovní diváky nelze považovat za statické („mrtvé“) zatížení, ale je nutné s nimi pracovat jako se zatížením dynamickým, jehož charakter se však v průběhu sportovní události mění. Diváci jsou schopni během jednoho hokejového utkání či fotbalového zápasu změnit svoje chování více jak 600 krát.
- Při provedených experimentech bylo celkově identifikováno 13 typů chování diváků. Napříč sporty je nejčastějším typem chování potlesk – normální. Ostatní druhy potlesku jsou fanoušky používány pouze za předpokladu, že diváci jsou organizováni buď pořadatelem, nebo lídra fanoušků (tzv. „kotelníkem“), který chování diváků v daném sektoru stadionu řídí. Druhým nejčastějším typem chování diváků je statické chování. V tomto případě diváci jednoduše stojí na tribuně a nevyvozují žádnou aktivitu.
- Z pohledu dynamiky je nejzajímavějším typem chování diváků skákání celých řad – svisle (2. typ) nebo vodorovně (3. typ). Při tomto typu chování dochází k rychlé synchronizaci diváků, kteří následně minimálně po dobu 30 s skáčí synchronně na tribuně. Tento druh chování byl během realizovaných experimentů zaznamenán pouze na fotbalových utkáních, ale prvně se v Českých zemích objevil při hokejových zápasech v rámci MS v ledním hokeji v roce 2004. V posledních dvou letech začínají i hokejoví fanoušci během soutěžních utkání na tribuně synchronně skákat. Dodavatelé dočasných montovaných tribun na sportovní akce nejsou schopni deklarovat stabilitu konstrukce při tomto typu chování, a proto skákání diváků na svých tribunách zakazují.
- Výchozí předpoklad této práce, že z pohledu dynamického namáhání tribuny bude nejzajímavějším typem chování diváků synchronní skákání celých řad ve svislém směru (2. typ), byl potvrzen výsledky realizovaných měření zaměřených na sledování úrovně vibrací tribun. Největší špičková hodnota zrychlení tribuny $2,84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ se základní budicí frekvencí 2,16 Hz byla zachycena při fotbalovém utkání na stadionu v Edenu. I další získané hodnoty korespondují

s výsledky experimentů v Polsku [20], kde bylo zaznamenáno zrychlení okolo $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ se základní budicí frekvencí 2,31 Hz.

- Vibrace na všech sledovaných stadionech byl divák schopen vnímat pocitově, na fotbalových stadionech dokonce i opticky. Člověk pohyb konstrukce vnímá, když úroveň zrychlení vážených pomocí váhové funkce W_k jsou větší než $0,015 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (ČSN ISO 2631-1 [14]), a tato úroveň byla na všech sledovaných stadionech překročena. Největší dynamické výchylky tribuny byly zaznamenány během utkání SK Slavia Praha, jednalo se o výchylky vodorovné nosné konstrukce tribuny s rozkmitem 6,7 mm, ale trámy vykazovaly výchylku pouze 1,7 mm. Na letenském stadionu ve sledovaných bodech docházelo k svislým výchylkám tribuny s rozkmitem 4,9 mm. Tyto výchylky obou tribun byly viditelné pouhým lidským okem.
- Z pohledu projektanta, který navrhuje tribuny, jsou sice experimenty zajímavé, ale důležitější je použitelný a zároveň dostatečně výstižný matematický model dynamického zatížení tribuny. V rámci disertační práce byly navrženy parametry dvou modelů. První model vychází z ekvivalentního statického zatížení, které bylo určeno na základě porovnání průhybu konstrukce tribuny, který byl vyvolán tímto zatížením, s dynamickým průhybem (výchylkou), který byl vypočítán integrací změřeného zrychlení tribuny. Velikost zatížení byla pro dva fotbalové stadiony stanovena shodně $5,1 \text{ kN/m}^2$. Při použití charakteristické hodnoty zatížení dle normy ČSN EN 1990-1-1 [10] o intenzitě $3,0 \text{ kN/m}^2$ se doporučuje použít dynamický součinitel o velikosti 2,7.
- Druhý model dynamického zatížení tribun vychází ze vztahu (3) Navržené hodnoty koeficientů A_i a budících frekvencí $f_{(i)}$ pro tento model jsou uvedeny v Tabulce 54. Navržené parametry modelu byly verifikovány, bylo dosaženo vysoké míry shody teoretických výsledků z modelu a z experimentu. Navržený model dynamického zatížení tribun je nutné ověřit při dalších experimentech, zda je tento model univerzální nebo zda bude muset být pro jiné typy tribun modifikován.
- Pokud při návrhu tribuny nebude proveden dynamický výpočet, doporučuje se použít charakteristickou hodnotu proměnného zatížení na horní hranici intervalu stanoveného v ČSN EN 1991-1-1 [10].

Vytyčené cíle z úvodu práce se podařilo naplnit. Z pohledu disertanta hlavní přínosy práce jsou:

- Určení úrovně kmitání tribun způsobeného diváky, které bylo zaznamenáno v reálném prostředí. Na rozdíl o některých jiných experimentů ve světě [20] se buzení nevyvolávalo uměle.
- Určení chování diváků během sportovní události a zjištění typu chování s největšími dynamickými účinky na tribunu.
- Určení základních parametrů modelu dynamického zatížení, který věrohodně zachycuje chování diváků.

8. Seznam použité literatury

- [1.] *Kdo neskáče, není Čech? Hopsání poničilo O2 arenu, oprava stála miliony* [online]. Praha: MAFRA, 2015 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/ponicene-tribuny-v-o2-arene-kvuli-skakani.A150429_095223_ekonomika_neh
- [2.] *Brno žije hokejem pod širým nebem. Tisíce lidí omezí u Lužánek dopravu* [online]. Praha: MAFRA, 2016 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/brno/zpravy/hokejove-hry-brno-kometa-skoda-plzen.A160101_230314_brno-zpravy_tr
- [3.] *To není vtip! Fanoušci Leicesteru způsobili při zápase zemětřesení!* [online]. Praha: TV Nova, 2016 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://sport.tn.nova.cz/clanek/to-neni-vtip-fanousci-leicesteru-zpusobili-pri-zapase-zemetreseni.html>
- [4.] *Biatlonovou hvězdu zaskočila na Vysočině změť trubek: Nevím, jestli bych na tuhle tribunu vlezl* [online]. Praha: Právo & Seznam.cz, 2016 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.sport.cz/ostatni/biatlon/clanek/836069-biatlonovou-hvezdu-zaskocila-na-vysocine-zmet-trubek-nevim-jestli-bych-na-tuhle-tribunu-vlezl.html>
- [5.] *Ibrox disaster of 1902- one of the UK's worst football ground tragedies* [online]. Glasgow: Glasgow Live, 2016 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.glasgowlive.co.uk/news/history/first-ibrox-disaster-118-years-14493179>
- [6.] *TJ absolve Bobô por acidente no estádio da Fonte Nova* [online]. São Paulo: Globo Comunicação e Participações S.A, 2015 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <http://g1.globo.com/brasil/noticia/2010/07/tj-absolve-bobo-por-acidente-no-estadio-da-fonte-nova.html>
- [7.] HUBKA, Jiří. *Dynamická analýza tribuny*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT, fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Tomáš Plachý Ph.D.
- [8.] BROWNING, Gillian Gordon. *Human Perception of Vibrations due to Synchronised Crowd Loading in Grandstands*. Bath, 2011. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. University of Bath, Department of Architecture and Civil Engineering.
- [9.] ČSN EN 1990 (730002). *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Aktuálním znění. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [10.] ČSN EN 1991-1-1 (730035). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Aktuálním znění. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [11.] ČSN EN 13200-5 (735905). *Zařízení pro diváky - Část 5: Teleskopické tribuny*. Aktuálním znění. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [12.] ČSN EN 13200-6 (735905). *Zařízení pro diváky - Část 6: Demontovatelné (dočasné) tribuny*. Aktuálním znění. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [13.] ČSN EN 13814 (276001). *Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky - Bezpečnost*. Aktuálním znění. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [14.] ČSN ISO 2631-1 (011405). *Vibrace a rázy - Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím - Část 1: Všeobecné požadavky*. Aktuálním znění. Praha: Český normalizační institut, 1999.

- [15.] BS 6399-1:1996. *Loading for buildings. Code of practice for dead and imposed loads*. Neplatná. London: BSI, 1999
- [16.] BS EN 1991-1-1:2002. *Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Current. London: BSI, 2002.
- [17.] *Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action*. Current. London: IStructE Joint Working Group, 2008.
- [18.] ISO 10137:2007. *Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. Current. Geneva: ISO, 2007.
- [19.] CAPRIOLI, Alessandro, Paul REYNOLDS, Marcello VANALI a Emanuele ZAPPA. COMPARISON OF THE EFFECTS OF A MOVING CROWD ON DIFFERENT GRANDSTANDS DURING SIMILAR EVENTS. *Modal Analysis Conference 2007 : IMAC-XXV; a Conference & Exposition on Structural Dynamics; February 19 - 22, 2007, Orlando, Florida, USA / Society for Experimental Mechanics*. Orlando, Fla: SEM, 2007, **2007**(XXV), 9. ISSN 0912053968.
- [20.] WILDE, Krzysztof. Non-Destructive Testing of a Sport Tribune under Synchronized Crowd-Induced Excitation Using Vibration Analysis. *Materials*. 2019, **12**(13), 19. DOI: 10.3390/ma12132148. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/13/2148>
- [21.] *Who invented the Mexican Wave?* [online]. London: BBC News, 2010 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/8742454.stm>
- [22.] Wave (audience). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_\(audience\)#1986_FIFA_World_Cup_in_Mexico](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_(audience)#1986_FIFA_World_Cup_in_Mexico)
- [23.] *Mexican Wave Active Brain Breaks Twinkl Move PE KS2 Black and White RGB* [online]. Sheffield: Twinkl, 2020 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.twinkl.com/illustration/mexican-wave-active-brain-breaks-twinkel-move-pe-ks2-black-and-white-rgb>
- [24.] ČSN EN 1991-2 (736203). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Aktuálním znění. 2005: Český normalizační institut, 2005.
- [25.] *Generali Arena* [online]. Praha: AC Sparta Praha, 2020 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://sparta.cz/cs/klub/generali-arena/>
- [26.] *O sinobo-stadiomu* [online]. Praha: SK Slavia Praha, 2020 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.slavia.cz/zobraz.asp?t=klub-sinobo-stadium>
- [27.] *VŠE O NÁVŠTĚVĚ ZÁPASU SLAVIE* [online]. Praha: Slávistické Noviny, 2018 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.slavistickenoviny.cz/pages/print/36>
- [28.] *Historie, Zimní Stadion* [online]. Plzeň: HOCKEY CLUB PLZEŇ 1929, 2020 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.zimnistadionplzen.cz/arena/historie/>
- [29.] *Plán haly* [online]. Plzeň: HOCKEY CLUB PLZEŇ 1929, 2018 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.zimnistadionplzen.cz/arena/plan-haly/>
- [30.] *Nové Město na Moravě 19.-23.12.2018* [online]. Praha: Ticketlive PRO, 2018 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.ticketlive.cz/en/event/biatlon-2018>

- [31.] POHLED: Češi v Novém Městě vyhráli. Už předtím, než přijela Koukalová [online]. Praha: MAFRA, 2016 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/sport/biatlon/biatlon-nove-mesto-na-morave.A161218_212452_biatlon_par
- [32.] Synot liga 2014/15. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Synot_liga_2014/15
- [33.] VÝSLEDKY, Všechny proběhlé zápasy [online]. Praha: AC Sparta Praha, 2015 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://sparta.cz/cs/zapasy/vysledky/a-tym/2014-2015>
- [34.] Zápasy A-tým 2015/16 [online]. Praha: SK Slavia Praha, 2016 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.slavia.cz/zapasy.asp?sezona=2016&kategorie=MUZ&druh=>
- [35.] Synot liga 2015/16. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Synot_liga_2015/16
- [36.] Česká hokejová extraliga 2015/2016. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cesk%C3%A1_hokejov%C3%A1_extraliga_2015/2016
- [37.] *Tipsport extraliga 2015/16* [online]. Plzeň: HC ŠKODA PLZEŇ, 2016 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.hcskoda.cz/zapasy.asp?sezona=2016>
- [38.] Světový pohár v biatlonu 2016/2017 – Nové Město na Moravě. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Btov%C3%BD_poh%C3%A1r_v_biatlonu_2016/2017_%E2%80%93_Nov%C3%A9_M%C4%9Bsto_na_Morav%C4%9B
- [39.] VERNER, Martin, Michal POLÁK a Tomáš PLACHÝ. An Experimental Study Focused to Spectators-Induced Vibrations of a Cantilever Grandstand During Two Sport Matches. In: *Experimental Stress Analysis 2015*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015, s. 460-465. ISBN 978-80-01-05734-6. ISSN 1660-9336.
- [40.] VERNER, Martin, Michal POLÁK a Tomáš PLACHÝ. Experimentální analýza chování diváků a jimi vyvolaných vibrací tribuny při fotbalovém utkání. In: *Proceedings of the 13th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015, s. 5. ISBN 978-80-227-4463-8. ISSN 1660-9336.
- [41.] VERNER, Martin, Michal POLÁK a Tomáš PLACHÝ. An Experimental Analysis of Grandstand Vibrations Caused by Crowd of Spectators during Two Football Matches. In: *Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines II*. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS, 2016, s. 312-315. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.827.312>. ISBN 978-3-03835-531-1. ISSN 1660-9336.
- [42.] VERNER, Martin, Michal POLÁK a Tomáš PLACHÝ. An Experiment Focused on Fans Behaviour and Induced Grandstand Vibrations During a Football Match. In: *Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines II*. Zurich: TRANS TECH

- PUBLICATIONS, 2016, s. 75-78. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.837.85>. ISBN 978-3-03835-538-0. ISSN 1660-9336.
- [43.] POLÁK, Michal, Tomáš PLACHÝ a Martin VERNER. A Comparison of Spectators Induced Grandstand Vibrations and Fans Behavior during Two Ice Hockey Games between the Same Teams in the Regular Season and in the Playoffs. In: *Procedia Engineering*. Oxford: Elsevier, 2017, s. 510-515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.371>. ISBN 978-3-03835-538-0. ISSN 1877-7058
- [44.] PLACHÝ, Tomáš, Michal POLÁK a Martin VERNER. An Experimental Study Focused on Spectators' Behavior and Induced Vibrations of a Reinforced Concrete Grandstand on a Football Stadium. In: *Procedia Engineering*. Oxford: Elsevier, 2017, s. 2871-2876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.574>. ISSN 1877-7058.
- [45.] JONES, C. A. a PAVIC, A. Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review. *Journal of Sound and Vibration*. 2011, **330**(8), 1531-1566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.10.032>.
- [46.] *Statické řešení stavby stadionu* [online]. Praha: Časopis stavebnictví, 2008 [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/staticke-reseni-stavby-stadionu_N1076
- [47.] Real Crowd Behavior on the Grandstands. In: VERNER, Martin. *Proceedings of the 4th Conference Nano & Macro Mechanics*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2013, s. 215-220. ISBN 978-80-01-05332-4.
- [48.] EXPERIMENTAL ANALYSIS OF VIBRATION GRANDSTANDS CAUSED BY CROWD OF SPECTATORS. In: VERNER, Martin. *Proceedings of the 4th Conference Nano & Macro Mechanics*. Praha: Czech Technical University, 2014, s. 207-212. ISBN 978-80-01-05570-0.
- [49.] VERNER, Martin. Behaviour of Fans during the Football Match. *Applied Mechanics and Materials*. 2016, **825**, 77-80. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.825.77. ISSN 1662-7482. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/AMM.825.77>
- [50.] VERNER, Martin. THE OCCURRENCE OF SYNCHRONIZED JUMPING CROWD AT SPORTS STADIUMS. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2017, **13**, 152-156. DOI: 10.14311/APP.2017.13.0152. ISSN 2336-5382. Dostupné také z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/APP/article/view/4656>
- [51.] VERNER, Martin. WHICH FANS ARE THE BIGGEST ACCELERATION OF THE GRANDSTAND? *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2018, **15**, 137-141. DOI: 10.14311/APP.2018.15.0137. ISSN 2336-5382. Dostupné také z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/APP/article/view/5347>

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Ukázka článku MF Dnes ze dne 29. 4. 2015 [1]	4
Obrázek 2: Úryvek z doporučení pořadatelů návštěvníkům Hokejových her [2]	4
Obrázek 3: Titulní stránka z novinového článku Nova Sport [3].....	5
Obrázek 4: Komentář ke konstrukci tribun v Novém Městě na Moravě – Martin Fourcade [4]	5
Obrázek 5: Pohled na zborcenou tribunu – Glasgow 1902 [5]	6
Obrázek 6: Zborcená tribuna na stadionu v brazilském Salvadoru [6]	6
Obrázek 7: Křivka rozhraní pohodlných a nepohodlných vibrací ve vertikálním směru (v ose z) [18]	10

Obrázek 8: Schéma stadionu Giuseppe Meazza v Miláně [19].....	11
Obrázek 9: Příčný řez tribun stadionu v Manchesteru [19]	11
Obrázek 10: Průběh zrychlení tribuny (v časové a ve frekvenční oblasti) během koncertu v Miláně (vlevo) a v Manchesteru (vpravo) [19]	12
Obrázek 11: Souhrn naměřených výsledků v průběhu studie [8]	13
Obrázek 12: Příčný řez konstrukcí stadionu - obrázek byl převzat z [20]	14
Obrázek 13: Zrychlení během experimentu nesynchronní skákání; a) nosník b) střecha [20]	14
Obrázek 14: Zrychlení naměřené během experimentu při plné synchronizaci diváků při tzv. "Labado dance"; a) nosník b) střecha [20]	14
Obrázek 15: Příčný řez nosnou konstrukcí zkoumané tribuny na stadionu na Letné (zakresleno je pouze horní patro tribuny)	17
Obrázek 16: Několik pohledů na sledovanou tribunu a její nosnou konstrukci na stadionu na Letné	18
Obrázek 17: 1. vlastní tvar pro $f_{(1)} = 3,59$ Hz.....	18
Obrázek 18: 2. vlastní tvar pro $f_{(2)} = 7,69$ Hz.....	19
Obrázek 19: 3. vlastní tvar pro $f_{(3)} = 8,28$ Hz.....	19
Obrázek 20: Příčný řez betonovou částí konstrukce stadionu v Edenu, který poskytla firma RECOC spol. s r.o.20	
Obrázek 21: Pohledy na sledovanou část stadionu v Praze v Edenu a na nosnou konstrukci zkoumané tribuny..20	
Obrázek 22: Vlastní tvar pro $f_{(1)} = 9,56$ Hz.....	21
Obrázek 23: Vlastní tvar pro $f_{(2)} = 11,06$ Hz.....	21
Obrázek 24: Vlastní tvar pro $f_{(3)} = 12,72$ Hz.....	22
Obrázek 25: Pohled na nosnou konstrukci zkoumané tribuny na stadionu v Plzni a na nosnou konstrukci jeho střechy.....	22
Obrázek 26: Vlastní tvar pro $f_{(1)} = 16,13$ Hz.....	23
Obrázek 27: Vlastní tvar pro $f_{(2)} = 18,00$ Hz.....	23
Obrázek 28: Vlastní tvar pro $f_{(3)} = 22,38$ Hz.....	24
Obrázek 29: Pohled na nosné prvky sledované ocelové montované tribuny	25
Obrázek 30: Směr zvolených os konstrukce [7]	25
Obrázek 31: Vlastní tvar $f_{(1)} = 3,00$ Hz [7]	26
Obrázek 32: Vlastní tvar $f_{(2)} = 3,22$ Hz [7]	26
Obrázek 33: Vlastní tvar $f_{(3)} = 3,45$ Hz [7]	27
Obrázek 34: Ukázka principu Mexické vlny, obrázek byl převzat ze zdroje [23]	28
Obrázek 35 - Plánek stadionu Letná převzatý z [25] s vyznačenou polohou kamery a sledovaného sektoru.....	31
Obrázek 36: Plánek stadionu v Edenu převzatý z [27] s vyznačenou polohou kamery a sledovaného sektoru.....	39
Obrázek 37: Plánek zimního stadionu v Plzni převzatý z [29] s vyznačenou polohou kamery a sledovaného sektoru stadionu	45
Obrázek 38: Plánek Vysočina Arény převzatý z [30] s vyznačenou polohou kamery a sledovaným sektorem tribuny.....	54
Obrázek 39: Sledovaný sektor tribuny se zakreslenými pozicemi snímačů při experimentu z roku 2013 (vlevo) a 2015 (vpravo).....	59

Obrázek 40: Vyhodnocení záznamu z utkání s FK Teplice. Záznam zrychlení tribuny ve svislém směru (vlevo) a převedení do frekvenční oblasti (vpravo)	60
Obrázek 41: Vyhodnocení záznamu z utkání s FK Mladá Boleslav. Záznam zrychlení tribuny ve svislém směru (vlevo) a převedení do frekvenční oblasti (vpravo)	60
Obrázek 42: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FK Dukla Praha, snímač č. 4 (zeleně) a snímač č. 3x (červeně)	62
Obrázek 43: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FK Dukla Praha, snímač č. 3z (černě) a snímač č. 3x (červeně)	62
Obrázek 44: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FC Zbrojovka Brno, snímač č. 4 (zeleně) a snímač č. 3x (červeně)	63
Obrázek 45: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FC Slovácko, snímač č. 4 (zeleně) a snímač č. 3x (červeně)	63
Obrázek 46: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FC Bohemians Praha 1905, snímač č. 3z (černě) a snímač č. 3x (červeně)	63
Obrázek 47: Pozice snímačů během experimentu na stadionu v Praze v Edenu	64
Obrázek 48: Záznam skákání diváků (2. typ) ze zápasu s FC Baník Ostrava, snímač č. 2 (černě) a snímač č. 4 (červeně) [44].....	66
Obrázek 49: Záznam skákání diváků (3. typ) ze zápasu s FC Fastav Zlín, snímač č. 2 (černě) a snímač č. 4 (červeně) [51].....	66
Obrázek 50: Záznam skákání diváků (3. typ) ze zápasu s FC Teplice, snímač č. 2 (černě) a snímač č. 4 (červeně)	66
Obrázek 51: Záznam skákání diváků (3. typ) ze zápasu s FC Slovácko, snímač č. 2 (černě) a snímač č. 4 (červeně)	67
Obrázek 52: Pohled na spodní líc sletované tribuny na zimním stadionu v Plzni s vyznačenou polohou použitých snímačů vibrací	68
Obrázek 53: Záznam vibrací tribuny při vstřelení gólu na snímačích č. 2 (černá) a snímači č. 4 (červená).....	70
Obrázek 54: Záznam vibrací při vstřelení vítězného gólu na snímačích č. 2 (černá) a snímači č. 4 (červená).....	70
Obrázek 55: Záznam vibrací tribuny při potlesku 1. typu na snímačích č. 2 (černá) a snímači č. 4 (červená).....	70
Obrázek 56: Záznam vibrací tribuny při potlesku 2. typu na snímačích č. 2 (černá) a snímači č. 4 (červená)	71
Obrázek 57: Záznam úrovně vibrací tribuny při vstřelení vítězného gólu v základní části ligové sezony (vlevo) a v play-off (vpravo).....	71
Obrázek 58: Pozice snímačů na tribuně [7]	72
Obrázek 59: Ukázka snímačů instalovaných na konstrukci – pozice č. 2 (vlevo a uprostřed) a krajní pozice č. 3 (vpravo) [7].....	72
Obrázek 60: Záznam vibrací tribuny v průběhu poslední střelby české závodnice při závodě žen - osa x (nahore) a osa y (dole) [51].....	73
Obrázek 61: Matematický model zkoumané tribuny na stadion v Edenu.....	76
Obrázek 62: Ukázka vlastních tvarů vypočtených na matematickém modelu tribuny na stadionu v Edenu	77
Obrázek 63: Porovnání výsledků vypočtených na matematickém modelu (červená) s odpovídajícím změřenými daty (černá)	80

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Ukázka pokynů pro použití křivek frekvenčního vážení při základním vážení. [14]	8
Tabulka 2: Vlastní frekvence tribuny na stadionu na Letné vyhodnocené při experimentu	18
Tabulka 3: Vlastní frekvence tribuny na stadionu v Praze v Edenu vyhodnocené z experimentu.....	21
Tabulka 4: Vlastní frekvence sledované části tribuny na zimním stadionu v Plzni vyhodnocené z experimentu .23	
Tabulka 5: Vlastní frekvence nosné konstrukce sledované montované tribuny vyhodnocené z naměřených dat [7]	26
Tabulka 6: Počet diváků přítomných na stadionu na Letné při sledovaných utkáních	32
Tabulka 7: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha - FC Dukla Praha 8. 3. 2015	33
Tabulka 8: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha - FK Teplice 21. 3. 2015.....	34
Tabulka 9: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha – FC Zbrojovka Brno 26. 4. 2015.....	35
Tabulka 10: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha - 1. FC Slovácko 15. 5. 2015	36
Tabulka 11: Chování diváků během zápasu AC Sparta Praha – Bohemians Praha 1905 30. 5. 2015	37
Tabulka 12: Vyhodnocení poměru mezi aktivními a pasivními diváky během vybraného zápasu	38
Tabulka 13: Počet diváků přítomných na stadionu v Edenu při sledovaných zápasech	39
Tabulka 14: Chování diváků během zápasu SK Slavia Praha – FC Baník Ostrava 28. 2. 2016.....	40
Tabulka 15: Chování diváků během zápasu SK Slavia Praha – FC Fastav Zlín 11. 3. 2016.....	41
Tabulka 16: Chování diváků během zápasu SK Slavia Praha – FK Teplice 23. 4. 2016.....	42
Tabulka 17: Chování diváků během zápasu SK Slavia Praha – 1. FC Slovácko 8. 5. 2016	43
Tabulka 18 Vyhodnocení poměru mezi aktivními a pasivními diváky během vybraného zápasu	44
Tabulka 19: Počet diváků na Plzeňském zimním stadionu během experimentu.....	46
Tabulka 20: Chování diváků během zápasu HC Škoda Plzeň – HC Bílí Tygři Liberec 18.9.2015	47
Tabulka 21: Chování diváků během zápasu HC Škoda Plzeň – HC Kometa Brno 2. 10. 2015	48
Tabulka 22: Chování diváků během zápasu HC Škoda Plzeň – HC Olomouc 5. 2. 2016 - základní část	49
Tabulka 23: Chování diváků během zápasu HC Škoda Plzeň – HC Olomouc 8. 3. 2016 – play-off	50
Tabulka 24: Chování diváků během první třetiny zápasů HC Škoda Plzeň – HC Mountfield Hradec Králové 20. 11. 2015 (vlevo) a HC Škoda Plzeň – HC Mountfield Hradec Králové 21. 2. 2016 (vpravo).....	51
Tabulka 25: Vyhodnocení poměru mezi aktivními a pasivními diváky v průběhu zápasu ze dne 20. 11. 2015....	52
Tabulka 26: Vyhodnocení poměru mezi aktivními a pasivními diváky během zápasu ze dne 21. 2. 2016.....	53
Tabulka 27: Počet diváků ve Vysočina Aréně během realizovaných experimentů	54
Tabulka 28: Chování diváků během nedělního programu 18. 12. 2016	55
Tabulka 29: Aktivita diváků během nedělního programu 18. 12. 2016.....	56
Tabulka 30: Vyhodnocené maximální špičkové hodnoty zrychlení tribuny z roku 2013.....	59
Tabulka 31: Vyhodnocené maximální RMS hodnoty zrychlení tribuny z roku 2013.....	59
Tabulka 32: Naměřené budicí frekvence z roku 2013	59
Tabulka 33: Vyhodnocené maximální vážené RMS hodnoty zrychlení tribuny – 2013.....	60
Tabulka 34: Vyhodnocené maximální výkmity výchylek konstrukce tribuny – 2013.....	60
Tabulka 35: Vyhodnocené maximální špičkové hodnoty zrychlení tribuny - 2015.....	61
Tabulka 36: Budicí frekvence 2015.....	61
Tabulka 37: Vyhodnocené maximální RMS hodnoty zrychlení tribuny z roku 2015.....	61

Tabulka 38: Vyhodnocené maximální vážené RMS hodnoty zrychlení z roku 2015	62
Tabulka 39: Vyhodnocené maximální výchylky konstrukce z roku 2015	62
Tabulka 40: Vyhodnocené maximální špičkové hodnoty zrychlení tribuny při experimentu z roku 2016.....	65
Tabulka 41: Budicí frekvence z roku 2016	65
Tabulka 42: Vyhodnocené maximální RMS hodnoty zrychlení tribuny při experimentu z roku 2016	65
Tabulka 43: Maximální vážené RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené při experimentu z roku 2016	65
Tabulka 44: Maximální vyhodnocené výkmity výchylky nosné konstrukce sledovaného sektoru tribuny z roku 2016	66
Tabulka 45: Vyhodnocené maximální výkmity zrychlení sledovaného sektoru tribuny – 2015/2016	68
Tabulka 46: Budicí frekvence - 2015/2016.....	68
Tabulka 47: Vyhodnocené maximální RSM hodnoty zrychlení sledované tribuny- 2015/2016	69
Tabulka 48: Vyhodnocené maximální vážené RMS hodnoty zrychlení sledované tribuny – 2015/2016.....	69
Tabulka 49: Vyhodnocené maximální výkmity výchylky sledovaného sektoru tribuny - 2015/2016.....	69
Tabulka 50: Maximální výkmity zrychlení tribuny během hromadného závodu mužů a žen [7].....	73
Tabulka 51: Maximální RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené během hromadného závodu mužů a žen [7].....	73
Tabulka 52: Budicí frekvence během hromadného závodu mužů a žen [7]	73
Tabulka 53: Verifikace matematického modelu na základě změřených vlastních frekvencí – tribuna stadionu v Edenu.....	78
Tabulka 54: Navržené výsledné hodnoty parametrů A_i a příslušných budicích frekvencí.....	79

8.3 Seznam zkratk a symbolů

W_k	frekvenční vážení ve svislém směru
W_d	frekvenční vážení ve vodorovném směru
W_m	frekvenční vážení bez určení směru
k	sledované body
$ODSH_{kR}(if)$	frekvenční přenosová funkce pro vyhodnocení pracovních tvarů kmitání
(if)	imaginární složka
$r_k(if)$	magnituda frekvenční funkce kmitání konstrukce
φ_k	fázový úhel
R	referenční bod
$H_{kR}(if)$	frekvenční přenosová funkce
$T_{kR}(if)$	funkce Transmissibility
i	imaginární jednotka
$\ddot{w}_k(if)$	odezva konstrukce v měřítku zrychlení v bodě k
$\ddot{w}_R(if)$	odezva konstrukce v měřítku zrychlení v referenčním bodě R

ODS FRF	Operating Deflection Shapes Frequency Response Function
AC	athletic club
SK	sportovní klub
FC (FK)	fotbalový klub
HC	hokejový klub
$f(j)$	vlastní frekvence
x, y, z	soustava souřadnic
RMS	Root mean square (efektivní hodnota zrychlení)
FFT	rychlá Fourierova transformace
$F(t)$	budicí síla
f_0	frekvence budicí síly
t	čas
δ	dynamický součinitel
A_i	Amplituda budicí síly
f_i	frekvence budicí síly