

---

**Slovenská technická univerzita v Bratislave**  
**Strojnícka fakulta, Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava**

---



## **VIBROAKUSTICKÁ ANALÝZA SND V SÚVISLOSTI S PLÁNOVANÝM VYBUDOVANÍM KOĽAJOVEJ TRATE NAD PODZEMNÝMI GARÁŽAMI PRED BUDOVOU SND**

<b>Predmet merania:</b>	Prejazd električiek vyvýšenou stavebnou konštrukciou (estakádou, viaduktom) pri Jantárovej ceste; pri historickej budove SND; pri budove Slovenskej filharmónie a modálna analýza vybraných stavebných konštrukcií budovy SND
<b>Objednávateľ:</b>	Ministerstvo kultúry Slovenskej republiky
<b>Kontaktná osoba:</b>	Ing. Mgr. Andrej Svorenčík, M.S., PhD.
<b>Zodpovedný riešiteľ:</b>	prof. Ing. Stanislav Žiaran, CSc.
<b>Dátum a miesto merania:</b>	19.8., 22.8. a 19.9.2022, Petržalka, v historickej budove SND, v budove Slovenskej filharmónie a v budove SND
<b>Meranie a analýza:</b>	prof. Ing. Stanislav Žiaran, CSc., Ing. Ondrej Chlebo, PhD.
<b>Správu vypracovali:</b>	prof. Ing. Stanislav Žiaran, CSc., Ing. Ondrej Chlebo, PhD.

---

**Bratislava 2022**

# 1 Úvod

V súvislosti s navrhovaným vybudovaním koľajovej trate pre električky cez pešiu zónu pred novou budovou SND sme boli oslovení Ministerstvom kultúry SR a pánom Popovičom, vykonať vibro-akustickú analýzu a vyhodnotiť možné vplyvy kmitania a hluku na prevádzku SND. Oslovenie podľa zadávateľa vychádzalo aj z toho, že riešitelia pracujú v tejto oblasti desiatky rokov s pozitívnymi ohlasmi od zahraničných kolegov (pozri najmä databázy WoS a SCOPUS) a v ostatných rokoch aj vo výskume koľajových vozidiel z hľadiska ich dynamického zaťaženia (kmitania a hluku) v rámci EP „Nová generácia nákladných železničných vozidiel“ (Kód projektu ITMS2014+: 313010P922), kde sa výsledky vedeckovýskumnej práce spracovali formou správ a článkov a publikujú sa aj v zahraničných vedeckých časopisoch a zborníkoch [1-6].

Poznámka: Pokiaľ nie je uvedené inak, tak pod budovou SND sa myslí nová budova na Pribinovej ulici a nie historická budova na Hviezdoslavovom námestí.

Veľmi dobré skúsenosti v oblasti prenosu nízkofrekvenčného kmitania a hluku a najmä z oblasti technickej seizmicity riešitelia získali aj pri realizácii EP „Zvyšovanie bezpečnosti jadrovoenergetických zariadení pri seizmickej udalosti“ (ITMS kód Projektu: 26220220171), kde sa výsledky vedecko-výskumnej práce spracovali formou správ a článkov a publikujú sa aj v zahraničných vedeckých časopisoch a zborníkoch [7-17, 26-30, 33-35] s pozitívnymi ohlasmi. A sú to práve koľajové vozidlá, ktoré generujú nízkofrekvenčné kmitanie aj v oblasti technickej seizmicity a teda aj nízkofrekvenčný zvuk tzv. dunivý hluk, ktorý sa môže výraznejšie prejavovať vo veľkoplošných uzavretých priestoroch, ako je sála SND opery a baletu, sála činohry, štúdio a modrý salónik [21].

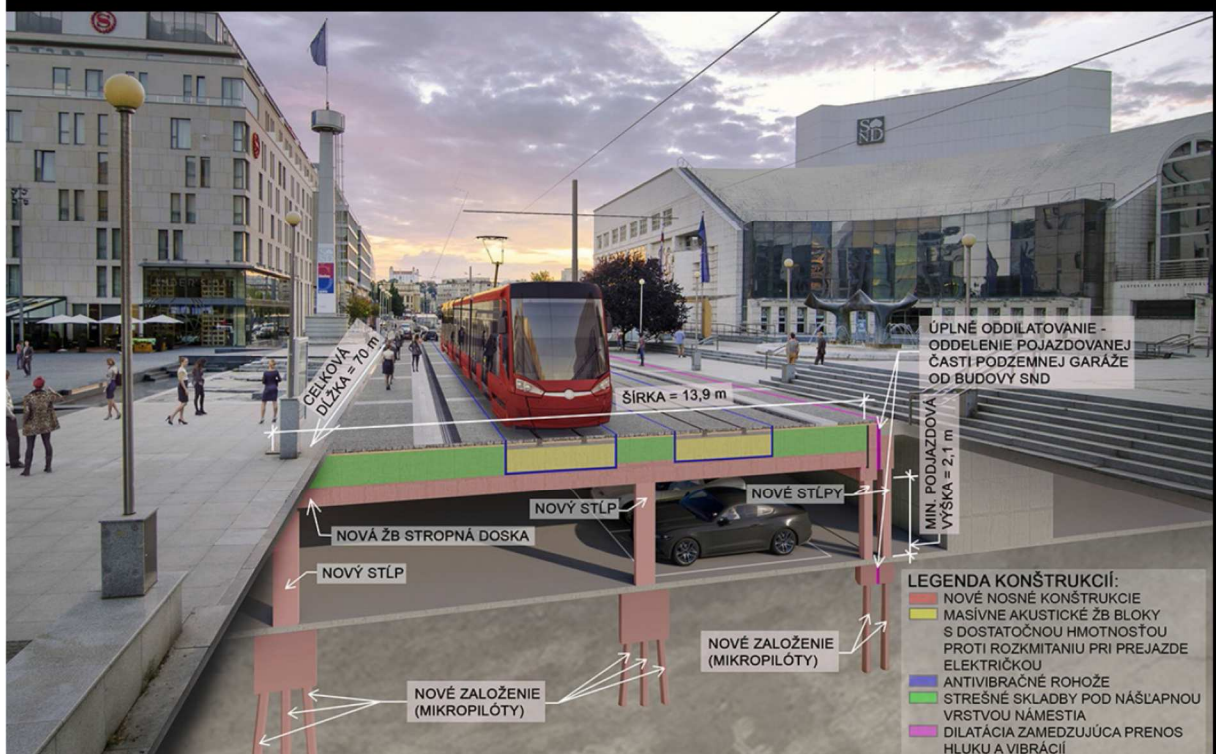
Na základe doterajších skúseností v špecifikovanej oblasti sa vypracovala metodika vibro-akustickej analýzy SND v súvislosti s plánovanou výstavbou koľajovej trate pred hlavným vchodom do budovy SND. **Prvoradá úloha bola vyhľadať podobnú vyvýšenú stavebnú konštrukciu koľajovej trate k navrhovanej konštrukcii (viadukt či estakáda nadväzujúca na prírodné zemné podložie) a pri prechode koľajového vozidla vykonať meranie mechanického kmitania (vibrácií) s cieľom vyhodnotiť rozdiel generovania vibroakustickej energie koľajovej trate uloženej na vyvýšenej stropnej doske stavebnej konštrukcie (estakáde, viadukte) a na prírodnom zemnom podloží, čo je prípad plánovanej koľajovej trate ponad podzemné garáže pred budovou SND (Obr. 1.1 dole).**

Typické prírastky hluku, a teda aj kmitania, koľajových vozidiel prevádzkovaných na vyvýšených konštrukciách závisia od typu konštrukcie **a môžu byť až do 10 dB vyššie** v porovnaní s normalizovanými (štandardnými) podmienkami uloženia koľajovej dráhy na zemnom podloží. Teda miera/stupeň útlmu koľajovej dráhy (trate) na vyvýšených konštrukciách je preto nižšia, ako na bežnej koľajovej dráhe uloženej na zemi [24]. A preto k analýze vplyvov dynamického budenia od električiek na prevádzku SND je žiaduce vyhľadať podobné uloženie električkovej trate ako sa plánuje pred budovou SND a zodpovedajúca konštrukčná podobnosť sa našla v Petržalke pri Jantárovej ceste (Obr. 1.1).

Experimentálnym skúškam (meraniam) parametrov kmitania pri prejazde električiek po koľajovej dráhe uloženej na zemnom podloží a následne na estakáde (viadukte) v Petržalke a po koľajovej dráhe v blízkosti historickej budovy SND a budovy Slovenskej filharmónie predchádzalo podrobnejšie oboznámenie sa s uložením koľajovej dráhy, jej nehomogenitou (spoje, výhybky, zmena smeru, vertikálne prevýšenie, vibroizolácia) ako aj podperných stĺpov vyvýšenej stavebnej konštrukcie.



## PREDPOKLADANÉ IDEOVÉ RIEŠENIE REZU "A"



Obrázok 1.1 – Koľajová trať uložená na zemnom podloží a na viadukte (hore a v strede) a predpokladané riešenie koľajovej dráhy pred bodovou SND (dole) [32].

V budove SND sa vykonala modálna analýza vytypovaných stavebných konštrukcií, ako aj na stavebných konštrukciách, kde sa zrealizovalo vibro-akustické meranie. **Cieľ modálnej analýzy bol zistiť vlastné frekvencie vlastných tvarov vytypovaných stavebných konštrukcií, aby sa posúdila možná zhoda vlastných frekvencií s budiacimi frekvenciami generovanými prejazdom rôznych typov električiek.** Modálna analýza sa vykonala na vybraných zvislých stenách najmä kolmých na smer šírenia sa pozdĺžneho a priečneho seizmického vlnenia od potenciálneho zdroja budenia, ktorým by mal byť prejazd električky v blízkosti hlavného vstupu do priestorov SND. Modálna analýza sa vykonala aj na podlahách v jednotlivých sálach SND a v podzemnom parkovisku na podlahe, stene a aj na stropnej doske.

Cieľ meraní zrýchlenia mechanického kmitania (vibrácií), integráciou aj mohutnosť (rýchlosť) kmitania, bol analyzovať potenciálne dynamické namáhanie stavebných konštrukcií budovy SND, teda vykonať meranie zrýchlenia kmitania na konštrukčne podobnom úseku koľajovej trate električky (uloženie na prírodnom podloží resp. zemi a na vyvýšenej konštrukcii) ako sa plánuje pred budovou SND, keďže uloženie koľajovej trate na estakáde (viadukte) generuje výrazne vyššiu vibro-akustickú energiu ako uloženie koľajovej trate na prírodnom zemnom podloží [24].

Hodnotenie vplyvov kmitania na budovy je nasmerované najmä na ozvu konštrukcie. Vplyv intenzity budenia stavebných konštrukcií od pohybujúcich sa koľajových vozidiel bude závisieť predovšetkým od hmotnosti a rýchlosti električky a kvality jazdného profilu kolesa a koľajnice [3, 4, 25]. **Treba však zdôrazniť, že na vybudenie vlastných frekvencií vlastných tvarov stavebných konštrukcií nie je závislé od rýchlosti koľajového vozidla.**

Ozvu konštrukcie budov závisí od budenia; z tohto hľadiska sa budú zisťovať metódy meraní ovplyvňované zdrojom čiže frekvenciou, časom trvania a amplitúdou alebo vyvolané ľubovoľným zdrojom ako je doprava, teda ide o náhodné kmitanie.

Okrem iného sa parameter zrýchlenia kmitania transformuje na rýchlosť kmitania v mm/s, čo reprezentuje mohutnosť kmitania, podľa ktorej sa hodnotí dynamické zaťaženie stavebných konštrukcií [23]. Meranie sa vykonalo pri rôznych rýchlostiach električiek a pri rôznych diskontinuitách koľajovej trate. Predmet merania boli vyvýšené stavebné konštrukcie (komponenty estakády) [8, 10-15, 29].

Stavebné konštrukcia sú v prevažnej miere zo železobetónových komponentov, ktoré sú veľmi dobrý vodič vibroakustickej energie od primárneho zdroja, ktorým je kontakt kolesa s koľajnicou až po veľkoplošné činoherné a operné priestory SND. V analyzovanom prípade sú všetky základové a nosné stavebné konštrukcie zo železobetónu.

Maximálne hodnoty dynamického zaťaženia prostredia SND sa dosiahnu pri zhode vlastných frekvencií vlastných tvarov stavebných konštrukcií s budiacimi frekvenciami. Teda pre jednotlivé stavebné komponenty jednotlivých sál SND, sú charakteristické vlastné frekvencie, ktoré pri zhode s budiacou frekvenciou spôsobujú rezonanciu komponentu, a tým aj možnosť vzniku stojatého alebo čiastočne stojatého vlnenie v priestoroch vibro-akusticky analyzovaných sál. **V takomto prípade sa generuje nízkofrekvenčný dunivý hluk, ktorý môže nežiaduco ovplyvniť akustiku daného priestoru** [19, 21]. Analýza výsledkov meraní zrýchlenia kmitania na viadukte ukáže možnosť zhody budiacej frekvencie s vlastnými frekvenciami stavebných konštrukcií ako aj dunivosť generovaného zvuku pod estakádou (viaduktom). Treba však zdôrazniť, že v tomto prípade ide o otvorený priestor a v prípade uzatvoreného priestoru, čo je plánovaný prípad vedenia koľajovej dráhy ponad podzemné garáže SND, sa dunivosť hluku niekoľkonásobne zvýši (pozri Obr. 1.1 dole) [21].

Redukcia energie kmitania generovaná valením kolesa po koľajnici, prenášaná do podporných stavebných konštrukcií (stĺpov) vyvýšenej konštrukcie, závisí od prenosového útlmu od zdroja cez vibro-izoláciu do železobetónovej dosky viaduktu (estakády). Prenos energie kmitania cez konštrukčné bloky viaduktu teda závisí od ich konštrukcie, použitého materiálu a spôsobu aplikácie (úprava kontaktných plôch, uloženie, pripevnenie) [18]. Porovnaním amplitúd frekvenčných charakteristík zrýchlenia na výstupe so vstupom, v decibeloch, pre jednotlivé konštrukčné bloky sa zaznamenali výrazné rozdiely zrýchlenia kmitania reprezentujúce útlm prenosu energie kmitania v závislosti od frekvencie. Treba poznamenať, že dynamické zaťaženie stavebných konštrukcií ovplyvňujú predovšetkým nerovnosti koľaje a jazdného profilu kolesa, uloženie koľaje, najmä jej vibroizolácia, tiež drsnosť koľaje, a to so zvyšovaním drsnosti sa zvyšuje aj ich dynamické zaťaženie [3, 4, 25].

Prostredníctvom meraného zrýchlenia kmitania sa analyzoval aj prenosový útlm z auto-spektier na vstupe (referenčný merací bod) a výstupe cez podperné konštrukcie viaduktu, a to na úrovni podlažia. Treba zdôrazniť, že prenosový útlm so znižovaním frekvencií klesá a teda, ak sa hovorí o technickej seizmicite [31] prenosový útlm bude zanedbateľný.

Pre posúdenie dynamického zaťaženia v zmysle platných noriem a na základe odborných skúseností riešiteľov, sa zrýchlenie mechanického kmitania transformovalo na rýchlosť kmitania a stanovila sa aj efektívna rýchlosť reprezentujúca mohutnosť kmitania [19, 20, 23]. Zo zrýchlenia kmitania možno vypočítať maximálnu dynamickú silu generovanú prejazdom električky zo vzťahu  $F = ma_{\max}$ , kde  $m$  je hmotnosť električky vrátane hmotnosti zodpovedajúcej časti viaduktu a  $a_{\max}$  je namerané maximálne zrýchlenie kmitania.

V súvislosti s realizáciou tohto projektu bolo potrebné vykonať:

- z hľadiska prenosu vibroakustickej energie analyzovať dodanú dokumentáciu návrhu uloženia koľajovej trate pred budovou SND;
- oboznámiť sa s nosnou konštrukciou budovy SND a polohou jednotlivých priestorov, kde sa realizujú kultúrne podujatia;
- z hľadiska prenosu kmitania analyzovať podlažie a plánované stavebné úpravy (konštrukcie) medzi potenciálnym zdrojom kmitania (prejazdom električky) a základnými konštrukciami budovy SND;
- vykonať príkladové vibro-akustické merania v priestoroch historickej budovy SND pri prechode električky a bez nej;
- vykonať príkladové vibroakustické merania v priestoroch budovy Slovenskej filharmónie pri prechode električky a bez nej;
- vykonať vibroakustické merania – modálnu analýzu v priestoroch budovy SND, kde sa uskutočňujú kultúrne podujatia;
- vyhľadať podobnú vyvýšenú stavebnú konštrukciu koľajovej trate k navrhovanej konštrukcii (estakáda či viadukt nadväzujúci na prírodné zemné podlažie) a pri prechode koľajového vozidla vykonať meranie kmitania (vibrácií) s cieľom vyhodnotiť rozdiel generovania vibroakustickej energie pre koľajovú trať uloženú na vyvýšenej (stropnej doske, či viadukte) stavebnej konštrukcii (čo je prípad plánovanej koľajovej trate ponad podzemné garáže SND) a na prírodnom zemnom podlaží;

- vykonať frekvenčnú analýzu signálu generovaného kmitania pri definovaných podmienkach, a to pri prechode električky a bez nej pre merania v historickej budove SND a budove Slovenskej filharmónie;
- vykonať frekvenčnú vibro-akustickú analýzu signálu pozadia v miestnostiach SND, kde sa realizujú kultúrne podujatia;
- vykonať frekvenčnú analýzu vibro-akustického signálu generovaného prechodom koľajového vozidla na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte) a na prírodnom zemnom podloží;
- modálnou analýzou zistiť vlastné frekvencie vybraných stavebných konštrukcií, u ktorých sa môžu vybudíť vlastné frekvencie kmitania prejazdom električky;
- sumárne analyzovať výsledky vibro-akustických meraní (dynamického namáhania) a vypracovať záverečnú odbornú správu.

**Požiadavky k realizácii vibro-akustických meraní:**

- poskytnúť vyžadované technické podklady budovy SND, historickej budovy SND a budovy Slovenskej filharmónie a zabezpečiť prístup do priestorov, ktoré budú predmetom merania;
- poskytnúť dokumentáciu z doteraz vykonaných štúdií (analýz) a protokoly o skúške z meraní v oblasti vibro-akustiky;
- poskytnúť informácie o technickom vybavení budovy SND.

## 2 Prostredie, predmet, cieľ, opis a metodika merania kmitania

### 2.1 Prostredie a podmienky merania

Keďže ide o plánovanie koľajovej trate ponad podzemné garáže pred budovou SND bolo žiaduce nájsť ekvivalentné reálne meracie prostredie a podmienky merania zodpovedajúce plánovanej koľajovej trati. Po podrobnej prehliadke podzemných garáží SND a dodanej dokumentácie plánovanej koľajovej trate [32] sme našli podobné prostredie a podmienky merania (zodpovedajúco situovanú konštrukciu koľajovej trati), a to v blízkosti Jantárovej cesty v Petržalke. Z ostatnej petržalskej zástavky smerujú električky miernym stúpaním k vyvýšenej stavebnej konštrukcii (SND: k pešej zóne) ponad cestu na Černyševského ulici (SND: ponad podzemné garáže) na Starý most (SND: na sídlisko) (Obr. 2.1). Treba zdôrazniť, že veľmi dôležitý je aj skutočný zdroj budenia, ktorý v danom prípade nemožno nahradiť zdrojom rázového budenia [31].

Poznámka: V protokole A\_177\_2020 [31] sa používa budenie seizmickým zdrojom GISCO ESS 100 na stropnej doske garáže SND (budiaca energia 360 J, rýchlosť úderu 4 m/s, hmotnosť kladiva 45 kg) sa konštatuje, že „Vibrácie vybudené seizmickým zdrojom GISCO ESS 100 simulovali vibrácie vznikajúce pri prejazde električiek s prevádzkovou opciou prejazdov električiek pred budovou SND a **preukázali prenos vibrácií medzi stropom garáže a základom budovy**. Z analýzy frekvenčných spektier nameraných hodnôt na meracích stanoviskách vyplýva, že nízke nebezpečnejšie frekvencie do 10 Hz pre stavebné objekty neboli generované. Frekvenčné spektra z nameraných hodnôt na meracích stanoviskách poukazuje na generovanie vysokých frekvencií, ktoré sú bezpečnejšie pre stavebné objekty“. **Prejazd električky však generuje seizmické vlnenie!**



Obrázok 2.1 – Ekvivalentné reálne meracie prostredie na uložení koľajovej dráhy na zemnom podloží a na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte).

Poznámka k protokolu [31]: Treba zdôrazniť, že zdroj rázového budenia nemôže nahradiť reálny zdroj, ktorým je električka generujúca omnoho väčšiu dynamickú silu [3, 4]. Teda, ak hovoríme o nebezpečnom frekvenčnom rozložení budiacich síl vzhľadom na budovy, tak horná hranica je podstatne vyššia ako sa uvádza v protokole [31]. Prírodná a technická seizmicita sa berie do úvahy až do 35 Hz [11].

K priblíženiu sa reálnej situácii prostredia merania, sa toto prostredie berie do úvahy pred a za dilatačným komponentom (prvkom), ktorý oddeľuje koľajovú dráhu uloženú na zemnom podloží a na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (Obr. 2.1 vľavo dole). Vibro-akustické merania sa vykonali v blízkosti koľajovej dráhy.

Prostredie merania pod vyvýšenou konštrukciou (viaduktom) zobrazuje obrázok 2.2, kde na ľavej strane sú dve protismerné koľajové dráhy a na pravej strane je cestná komunikácia. Vibro-akustické merania sa vykonali v referenčnom bode pri koľajovej dráhe a v mieste povrchu uloženia podperných konštrukcií (stĺpov).



**Obrázok 2.2 – Ekvivalentné reálne meracie prostredie pod viaduktom.**

Meranie vibroakustických parametrov (zrýchlenia kmitania a akustického tlaku) za pohybu električiek na ekvivalentnom reálnom meracom prostredí s približne rovnakou prevádzkovou rýchlosťou od 33,8 km/h do 46,8 km/h sa vykonalo dňa 19.08.2022 medzi 8:20 hodinou a 12:30 hodinou. Celkovo sa zmeral prejazd trinástich električiek, čo prekračuje významnú štatistickú vzorku. Meteorologické podmienky pre tento druh merania boli vyhovujúce, teda bez dažďa, vetra s priemernou teplotou 27 °C. **Treba však zdôrazniť, že vlastná frekvencia vlastných tvarov stavebných konštrukcií nie je závislá od rýchlosti prejazdu električky.**

Vzhľadom na pripravenosť metodiky experimentu a na základe skúseností riešiteľov z predchádzajúcich podobných meraní na koľajovej trati, počas uvedeného časového rozpätia sa vykonalo podstatne viacej meraní dynamického zaťaženia viaduktu so značným časovým záznamom údajov zrýchlenia mechanického kmitania za pohybu električiek, ako sa vyžadovalo. Takto sa získalo dostačujúce množstvo parametrov mechanického kmitania (vibrácií) pre korektné posúdenie dynamického zaťaženia vyvýšenej stavebnej konštrukcie (viaduktu, estakády) a jeho okolia pre prípadnú ďalšiu dynamickú analýzu. Súbežne sa pri prejazde električky zaznamenával aj akustický tlak. Zdrojom dynamického namáhania viaduktu boli len nové električky s prejazdom v oboch smeroch.



Vplyv prejazdu električky na dynamické zaťaženie vytypovaných nosných stavebných konštrukcií sa vykonal aj v priestoroch historickej budovy SND (Obr. 2.3) a budovy Slovenskej filharmónie (SF) (Obr. 2.4).

Meranie vibroakustických parametrov (zrýchlenia kmitania a akustického tlaku) za pohybu niekoľkých typov električiek v priestoroch historickej budovy SND s približne rovnakou prevádzkovou rýchlosťou 15 km/h sa vykonal dňa 22.08.2022 medzi 8:00 hodinou a 12:00 hodinou. Meteorologické podmienky pre tento druh merania boli vyhovujúce, teda bez dažďa, vetra s priemernou teplotou 25 °C. Celkový počet prejazdov električiek v jednom smere bol 13 so striedaním typu električiek, a to nová, dve spojené staré električky a stará kĺbová električka.



**Obrázok 2.3 – Prostredie a podmienky historickej budovy SND.**

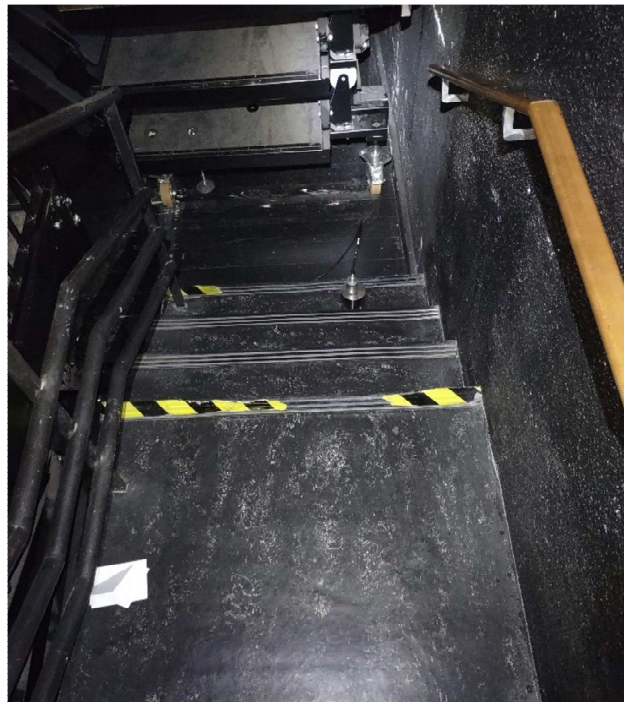
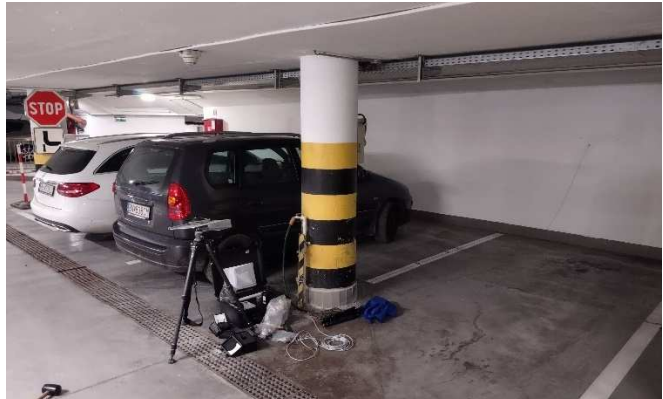


**Obrázok 2.4 – Prostredie a podmienky budovy Slovenskej filharmónie.**

Meranie vibroakustických parametrov (zrýchlenia kmitania a akustického tlaku) za pohybu niekoľkých typov električiek v priestoroch Slovenskej filharmónie s približne rovnakou prevádzkovou rýchlosťou 10 km/h až 15 km/h sa vykonal dňa 22.08.2022 medzi 12:45 hodinou a 16:00 hodinou. Prevádzková rýchlosť električiek odbočujúcich vľavo sa znižovala v dôsledku výhybky a križovania koľajovej dráhy. Meteorologické podmienky pre tento druh merania boli vyhovujúce, teda bez dažďa, vetra s priemernou teplotou 25 °C.

Modálna analýza, s pomocou ktorej sa získali vlastné frekvencie vlastných tvarov vybraných nosných stavebných konštrukcií ako sú steny, podlahy a stropné dosky, sa vykonala v dvoch činoherných sálach, opernej sále a v podzemnej garáži (Obr. 2.5).

Merania sa vykonali 19.09.2022 od 9:00 hod. do 15:00 hod. bez prevádzky uvedených sál. V prevádzke boli len asynchrónne motory (1 500 r/min) zabezpečujúce technický chod budovy divadla a samozrejme transformátory. V meracích miestach sa teda objavovali výraznejšie amplitúdy s frekvenciami pri 25 Hz a 50 Hz. Meteorologické podmienky neboli podstatné.

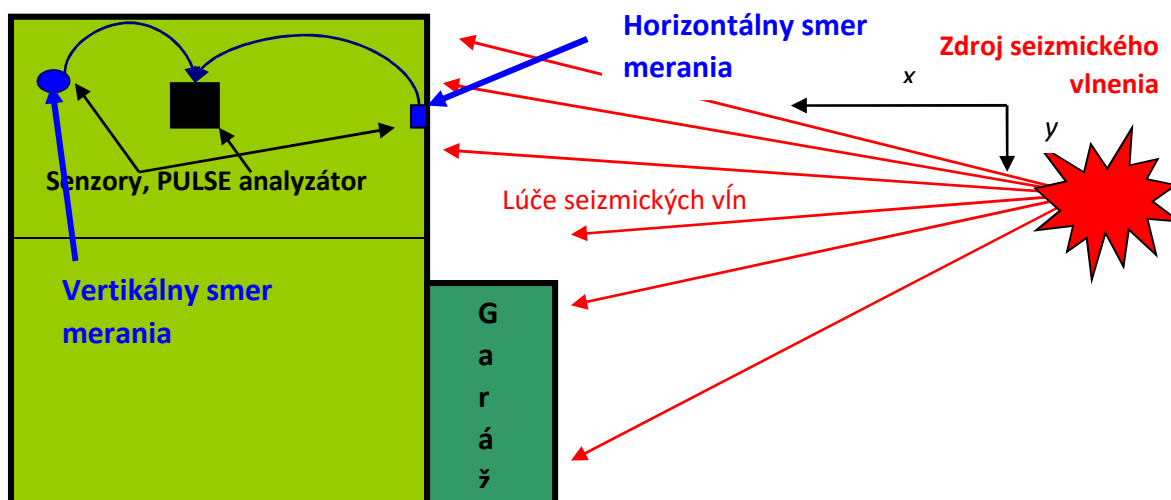
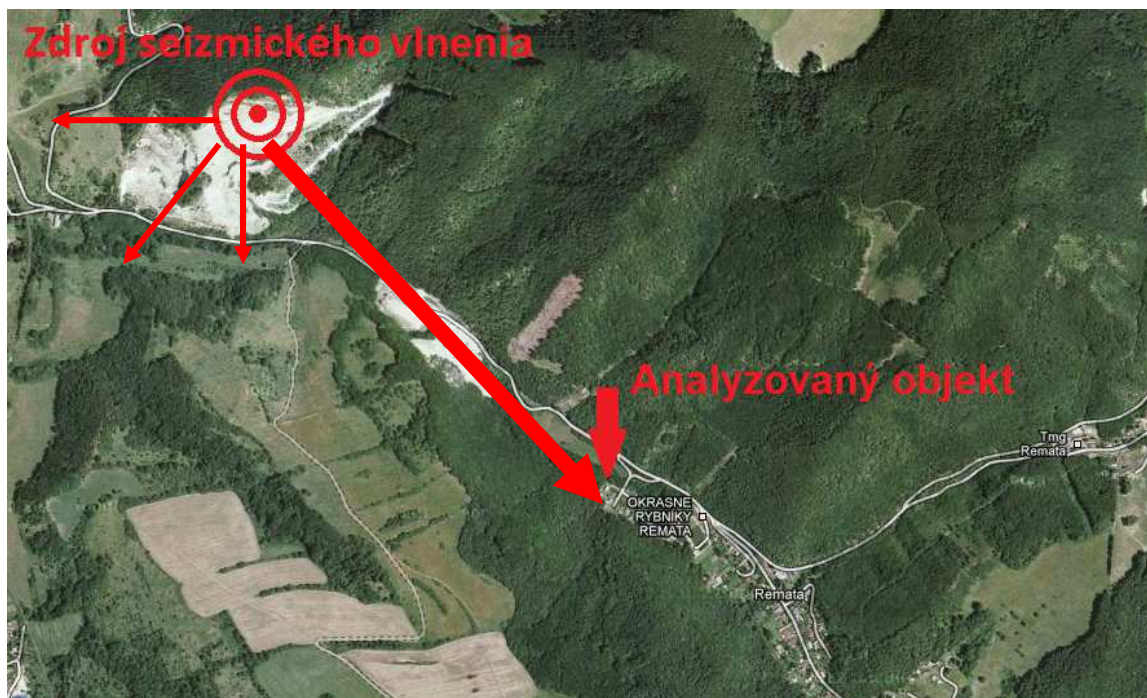


Obrázok 2.5 – Prostredie priestorov budovy SND vykonávania modálnej analýzy.

## 2.2 Predmet a postup merania

Predmet merania vychádza z predpokladu vybudenia nízko-frekvenčného vlnenia (technickej seizmicity) prejazdom električky po vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte) a jej seizmickej ozvy na okolité konštrukcie. Ak hovoríme o technickej seizmicite je potrebné bližšie vysvetliť jej základné princípy súvisiace s predmetom a postupom merania [21]. Meranie seizmickej ozvy na budovu sa vykonávajú v troch na seba kolmých smeroch, a ak je miesto seizmického budenia známe sú postačujúce dva smery, a to meranie v smere lúča seizmického vlnenia a vo vertikálnom smere (Obr. 2.6) [21,

23]. Energia nízkofrekvenčného vlnenia vybudí vlastné frekvencie vlastných tvarov jednotlivých stavebných konštrukčných prvkov budovy a samozrejme aj rezonanciu samotnej budovy.



**Obrázok 2.6 – Situovanie zdroja seizmického vlnenia vzhľadom na analyzovaný objekt (hore) a situovanie meracích miest v budove vzhľadom na tento zdroj (dole) [21, 29].**

Podmienky a základné princípy pri analýze seizmickej ozvy sa môžu okrem zemetrasenia aplikovať aj na rôzne zdroje seizmického vlnenia mechanických sústav, stavebných a technologických konštrukcií ako sú otrasy vyvolané trhacími prácami, zaťaženie vetrom, **náhodné budenie od dopravných prostriedkov**, periodické budenie od veľkých rotačných strojov a strojov s vratným pohybom, budenie technologickým procesom ako je kovanie, rázové vystrihovanie a lisovanie, chemickými reakciami,

stavebnými a zemnými prácami a inými energeticky silnými deterministickými a náhodnými zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka (technická seizmicita) [21], ktoré negatívne vplyvajú na integritu stavebných a technologických konštrukcií a ovplyvňujú aj kvalitu relaxačného prostredia, ako sú divadelné a operné podujatia, vrátane negatívneho pôsobenia na zdravie a pohodlie človeka [19]. Analýza vplyvov takýchto seizmických otrasov (kmitania) na stavebné a technologické konštrukcie je nasmerované najmä na ozvu tejto konštrukcie a na možné negatívne vplyvy tejto ozvy. Na detekciu seizmických otrasov sa vo frekvenčnej oblasti používa FFT (Fast Fourier Transform) analýza a meraný signál sa zaznamenáva a vyhodnocuje aj v časovej oblasti. Teda veľmi často sa stretávame so seizmickým budením vyvolané aktivitami človeka. Z tohto hľadiska sú seizmické merania ovplyvňované zdrojom seizmického zaťaženia čiže jeho frekvenciou, časom trvania a amplitúdou, pričom treba rešpektovať či nízkofrekvenčné kmitania je deterministické, náhodné, explozívne [20, 21], vyvolané aerodynamickým treskom, trhacími prácami, strojovým zariadením inštalovaným v budove a/alebo v jej blízkosti, technologickým procesom, chemickými procesmi, dopravou, stavebnými aktivitami a inými zdrojmi nežiaduceho seizmického budenia, ktorými môže byť aj vietor a samozrejme zemetrasenie [18, 22, 29].

Prenos seizmickej energie (nízkofrekvenčného vlnenia) bude ovplyvnený aj stavom a povahou okolitého podlažia (geologická štruktúra, stav vlhkosti podlažia, hladina spodnej vody). **Piesočné podlažie s vysokou hladinou spodnej vody má pozitívne vplyvy na prenos seizmického vlnenia** [33, 34, 35]. Na prenos kmitania technologickou a stavebnou konštrukciou bude vplyvať aj hĺbka základov okolitých budov, ich konštrukčné prevedenie, použitý stavebný materiál a veľkosť týchto stavebných konštrukcií [21, 23].

Príkladom seizmického nízkofrekvenčného mechanického kmitania je seizmické vlnenie generované trhacími prácami v kameňolome. Skúma sa predovšetkým ozva na danú technologickú a/alebo stavebnú konštrukciu, ktorú charakterizujú vlastné tvary (rezonančné frekvencie) týchto konštrukcií, keďže pri skúmaní seizmického pôsobenia na stavebné a technologické konštrukcie je dôležité poznať rezonančné (vlastné) frekvencie, a to najmä z hľadiska návrhu ich modálneho tlmenia. Pre takýto druh generovaného dynamického zaťaženia okolitého prostredia, vrátane človeka, je vhodné analyzovať aj balík seizmického vlnenia, a to primárne pozdĺžne vlnenie (P-vlny) a sekundárne priečne vlnenie (S-vlny) a uviesť aj niektoré kvalitatívne a kvantitatívne hodnoty kinematických veličín kmitania mechanickej sústavy či stavebnej a technologickej konštrukcie ako ozvy na seizmické vlnenie a využiť ich pri zhodnotení prostredia aj z hľadiska vplyvu na komfort, zdravie a aktivity človeka.

V ostatnom čase stúpa záujem verejnosti o posudzovanie kmitania a otrasov generovaných **dopravnými prostriedkami** a ich vplyv najmä na stavebné konštrukcie a ozvu človeka v blízkosti koľajových dráh a cestných komunikácií. Je to prirodzené, keďže nárast koľajovej a cestnej prepravy tovarov a ľudí a zhoršovanie koľajových a cestných komunikácií vedie k zvyšovaniu dynamického zaťaženia okolitého prostredia najmä náhodným nízkofrekvenčným budením od nerovností kontaktných jazdných profilov kolies, povrchov koľajníc a vozoviek.

Vplyvy seizmického pôsobenia na sústavy a konštrukcie sa môžu analyzovať aj analyticky. Pri takejto analýze treba vziať do úvahy rezonančné frekvencie základnej kon-

štrukcie a konštrukčných častí, napríklad pri stavebnej konštrukcii je to rezonancia stien, podláh či okien. Dôležité sú aj tlmiace charakteristiky základnej konštrukcie a jej konštrukčných častí, typ konštrukcie, jej stav a materiálové vlastnosti vrátane nelinearit v amplitúdovej ozve sledovanej konštrukcie a nakoniec spektrálne vlastnosti konštrukcie či sústavy ako sú jej vlastné tvary, ale aj spektrálne charakteristiky ozvy na seizmické vlnenie. Pri tomto vyhodnocovaní treba mať na pamäti aj postupnosť činnosti, zdroj seizmického vlnenia, prenosovú cestu a prenosovú funkciu, exponovanú konštrukciu a jej ozvu [21, 23, 34, 35].

Ako príklad technického seizmického vlnenia možno uviesť odstrel horniny v kameňolome generujúci rázovú silu, kde objekt merania je ozva tohto vlnenia na trojpodlažnú stavebnú konštrukciu [21, 29]. Poloha stavebnej konštrukcie vzhľadom na polohu zdroja seizmického vlnenia je na Obr. 2.6. V dolnej časti obrázka je zobrazený pôdorys meranej stavebnej konštrukcie, umiestnenie meracích miest pre vertikálny a horizontálny smer merania seizmického signálu a situovanie miesta zdroja seizmického vlnenia vzdialeného približne 1 250 metrov. Schéma pôdorysu stavebnej konštrukcie zobrazuje aj smer lúčov postupujúceho seizmického vlnenia od miesta odstrelu horniny vzhľadom na stavebnú konštrukciu [29]. Zo smerovania lúčov seizmického vlnenia možno posúdiť energetické namáhanie jednotlivých obvodových stien stavebnej konštrukcie a vybrať optimálne meracie miesta. V prípade koľajových vozidiel je to rázová dynamická sila, ktorá môže dosiahnuť vysokých hodnôt a negatívne ovplyvňovať životnosť budovy SND ako aj akustické prostredie v jeho sálach.

Signál seizmického vlnenia je vhodné vyhodnotiť z hľadiska jeho frekvenčného rozloženia, čo umožní zistiť vlastné tvary konštrukcie a aj jeho energetické pôsobenie na konštrukciu [21] a súčasne vykonať aj časový záznam, ktorý zaznamená aj maximálnu amplitúdu napríklad zrýchlenia či rýchlosti kmitania a využije sa aj k ďalšej laboratórnej analýze nasnímaného signálu.

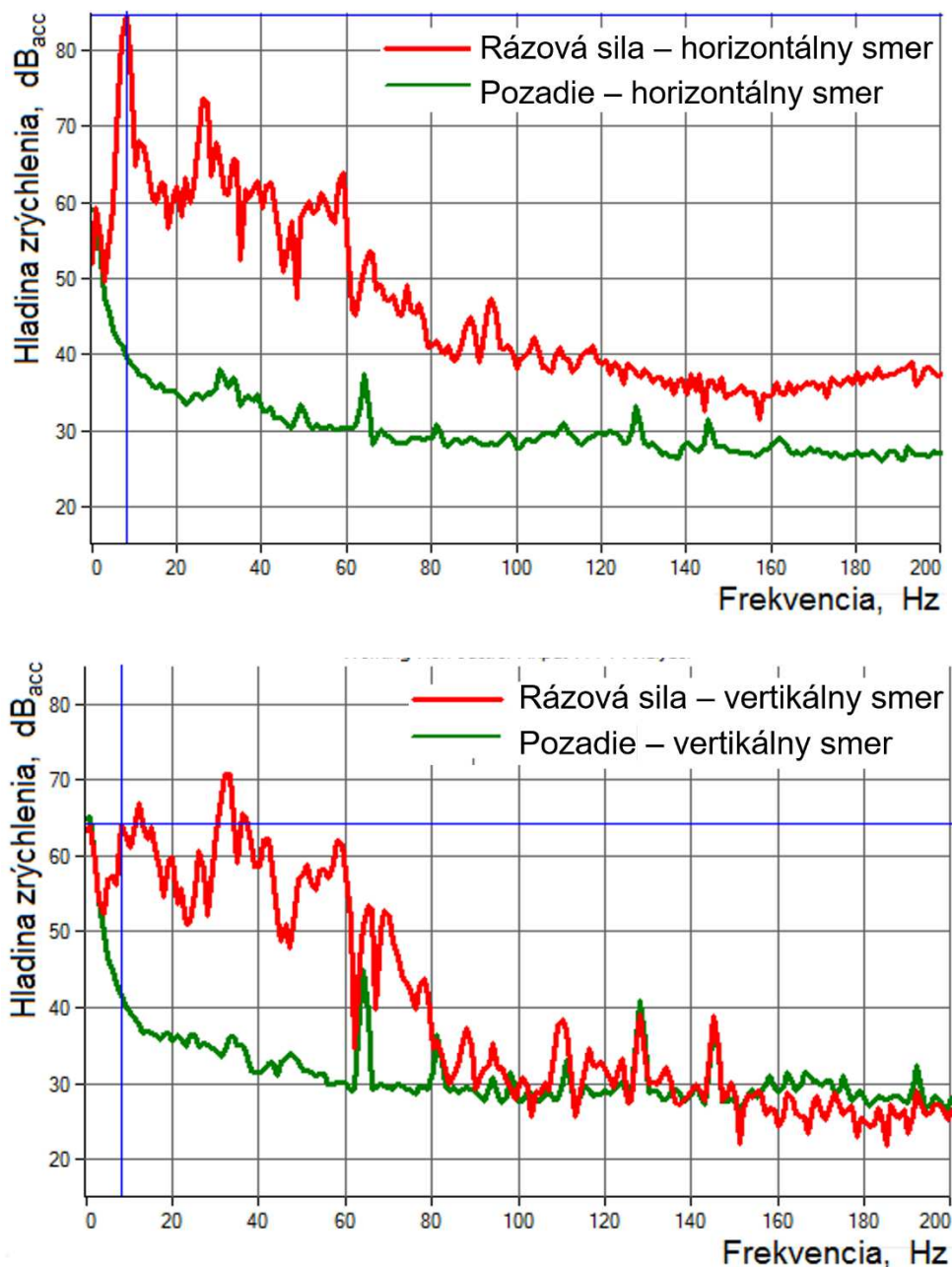
Pred a po seizmických meraniach je treba analyzovať okolité prostredie meraného objektu a vylúčiť akékoľvek zdroje generujúce prídavné dynamické zaťaženie, ako sú napríklad od vnútorných zdrojov zabezpečujúcich technický chod divadla. Vedľajšie kmitanie, ktoré by mohlo mať vplyv na seizmickú analýzu sledovanej konštrukcie, sa zaznamená a analyzuje. **Z tohto dôvodu sa v budove SND pred modálnou analýzou zmeralo vibro-akustické pozadie.**

Frekvenčná analýza vedľajšieho kmitania (pozadia) zo všetkých meracích miest jednoznačne potvrdzuje, že vo vonkajšom aj vnútornom prostredí sa nevyskytujú žiadne výrazné zdroje dynamického zaťaženia okrem frekvencií reprezentujúcich elektrické zdroje. Výraznejšie amplitúdy kmitania pri vyšších frekvenciách môžu byť ovplyvnené aj aktivitou ľudí nachádzajúcich sa vo vnútri dynamicky analyzovanej konštrukcie. Spravidla takéto kmitanie nemá vplyv na korektnosť analýzy ozvy konštrukcie na seizmické vlnenie pokiaľ sa negeneruje nízkofrekvenčné kmitanie mohutnejšou strojovou sústavou ako sa napríklad uvádza vyššie v tomto článku. Z frekvenčnej analýzy pozadia a seizmického vlnenia možno konštatovať, že stavebná a/alebo technologická konštrukcia je spravidla citlivá na budenie vnútornými zdrojmi vo vertikálnom smere, zatiaľ čo od seizmického vlnenia je to v horizontálnom smere [21]. Rozhodujúci vplyv na túto skutočnosť má smer pôsobiacej sily či smer lúčov postupujúceho nízkofrekvenčného vlnenia a samozrejme druh seizmického vlnenia.

Transformáciou nameraného časového signálu do frekvenčnej oblasti pomocou FFT (Fast Fourier Transform) analýzy možno vyjadriť hladiny zrýchlenia seizmického

vlnenia. Vzhľadom na krátke trvanie rázového budenia koľajového vozidla generujúceho seizmické vlnenie (pozri Obr. 4.2 až 4.8) a aby sa amplitúdy kmitania pri sledovaných frekvenciách čo najviac priblížili ku konvenčne pravej hodnote, je vhodné používať vrcholové spriemerovanie signálu analyzátorom kmitania [20].

Porovnanie frekvenčných spektier seizmického vlnenia a vedľajšieho kmitania (pozadia) pôsobiacich na stavebnú konštrukciu je na Obr. 2.7. Z porovnania vidno nárast hladiny dynamického zaťaženia počas seizmickej udalosti, a to najmä pri nízkych frekvenciách.

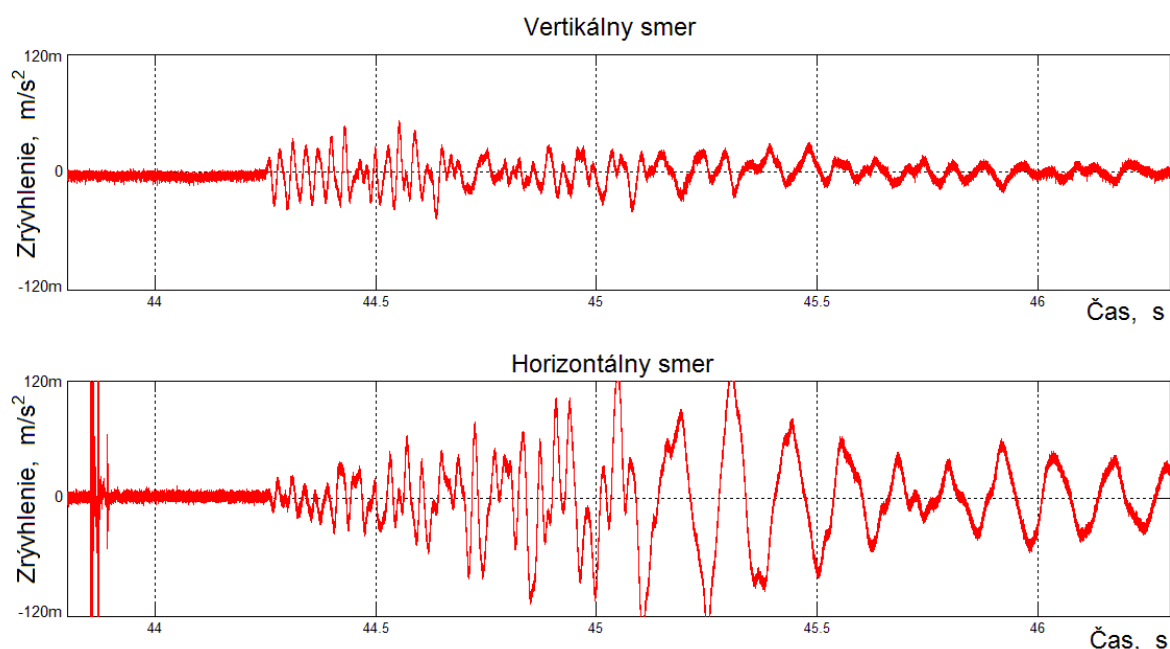


**Obrázok 2.7 – Porovnanie frekvenčných spektier seizmickej vlny a pozadia v horizontálnom smere (hore) a seizmickej vlny a pozadia vo vertikálnom smere (dolu) [29]**

Súbežne s frekvenčnou analýzou sa zaznamenáva aj časový priebeh vedľajšieho dynamického zaťaženia sledovanej stavebnej konštrukcie ako aj časový priebeh

seizmického vlnenia vyvolaného rázovou silou. Zaznamenaný časový priebeh sa využíva pri analýze dynamického zaťaženia stavebnej konštrukcie. Časové priebehy seizmického vlnenia pre obidva smery merania sú na Obr. 2.8. Tento časový záznam charakterizuje seizmické vlnenie ako vlnový balík [14], z ktorého sa najskôr vyčlenilo pozdĺžne vlnenie (*primárne – P-vlny*) o trvaní 3 ms. Tieto vlny sa na stavebnej konštrukcii prejavili len v horizontálnom smere. S oneskorením 0,4 sekundy sa vyčlenilo priečne vlnenie (*sekundárne – S-vlny*), ktorých trvanie s podstatne výraznejšou amplitúdou bolo približne 3 sekundy. A práve toto sekundárne vlnenie má pri zemetraseniach ničivé účinky a pri technickej seizmicite poškodzovanie budov.

Z Obr. 2.8 hore možno konštatovať, že amplitúdy kmitania vo vertikálnom smere nie sú tak výrazné ako sú amplitúdy v horizontálnom smere merania. Maximálna amplitúda zrýchlenia, a teda aj rýchlosti, segmentu stavebnej konštrukcie v horizontálnom smere je teda väčšia ako vo vertikálnom smere. Z Obr. 2.8 možno stanoviť aj algebraický rozdiel amplitúd kmitania [23], ktorého hodnota má vplyv na veľkosť šmykových napätí predovšetkým v oblasti kontaktu terénu s nosnými konštrukčnými prvkami stavebnej a/alebo technologickej konštrukcie.



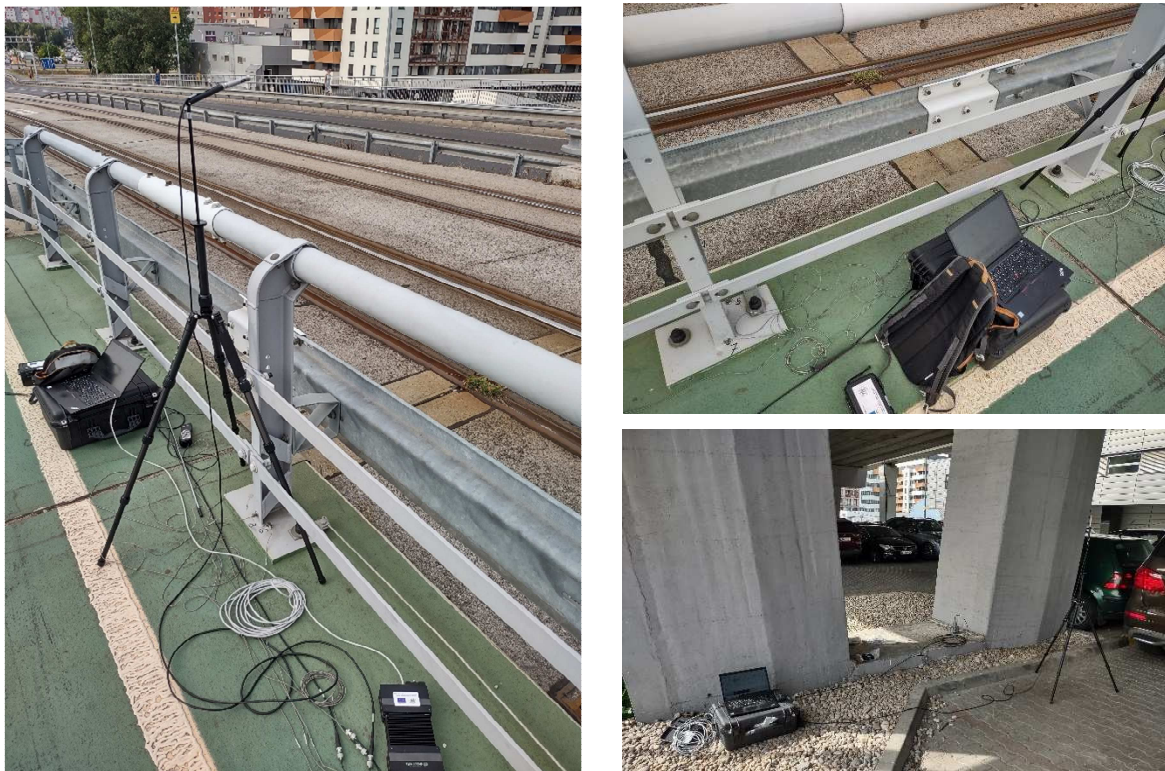
**Obrázok 2.8 – Časový priebeh balíka seizmického vlnenia (P-vlny a S-vlny) a pozadia v horizontálnom smere (dole) a seizmickej vlny a pozadia vo vertikálnom smere (hore) [29]**

Mnohonásobná cyklická zmena napätia vyvoláva zvýšené riziko únavového poškodenia stavebných konštrukcií (budov). **O únavovom poškodení možno hovoriť zvlášť pri vysokej hladine ozvy a dlhom expozičnom čase ako napríklad pri dlhodobom budení stavebných a technologickej konštrukcií aj od budenia koľajovými vozidlami.**

Pri meraní ozvy na seizmický otras (kmitanie) a pri hodnotení vplyvu seizmického zaťaženia na stavebné a/alebo technologickej konštrukcie je veľmi dôležité, správne umiestnenie a pripevnenie akcelerometrov. Každé iné pripevnenie vedie k výraznej odchýlke od konvenčne pravej hodnoty sledovaných kinematických parametrov vybudného kmitania. Voľba meracích miest je závislá aj od výšky konštrukcie, keďže kmitanie sa s výškou budovy spravidla zosilňuje. Pre sledované konštrukcie bolo podľa

[23] okrem vertikálneho smeru v niektorých prípadoch postačujúce jedno meracie miesto pre horizontálny smer merania kmitania, a to pri hlavnej nosnej a dlhšej stene tesne pod úrovňou vrchu základu stavebnej konštrukcie, čo korešpondovalo približne s úrovňou povrchu okolitého terénu. Nosná stena meracieho miesta bola približne kolmo na smer lúčov šíriaceho sa energeticky silného seizmického vlnenia, orientovaná k zdroju seizmického zaťaženia a senzor (senzory) je treba pripevniť tak, aby ich hlavná os citlivosti sa čo najviac zhodovala so smerom lúčov. Senzor je vždy potrebné pripevňovať na nosných prvkoch stavebnej konštrukcie alebo v ich tesnej blízkosti. Meranie vertikálnej zložky kmitania sa vykonáva v blízkosti nosnej steny, pretože toto miesto sa viacej týka konštrukčnej integrity budovy, ako je meracie miesto v strede podlahy.

Predmet vibroakustických meraní na koľajovej dráhe v Petržalke bol prenos vibroakustickej energie od zdroja generovaného kontaktom kolesa a koľajnice do referenčných meracích miest zvolených v blízkosti koľajovej dráhy uloženej na zemnom podlaží a na vyvýšenej koľajovej dráhe (viadukte), ako aj prenos vibroakustickej energie z príslušného referenčného meracieho miesta do meracích miest podpernej konštrukcie v blízkosti zeme (Obr. 2.9, pozri aj Obr. 2.1). V prípade historickej budovy SND a budovy SF predmet merania bol prenos vibroakustickej energie od električkou vybudenej koľajovej dráhy pozdĺž budovy do nosných stavebných konštrukcií (stien) a podlahy. Súčasne s týmito meraniami sa meracím mikrofónom snímal aj akustický tlak. Merania sa vykonali pri bežných prevádzkových podmienkach električiek rôznych typov alebo kombinácii električiek. Pri meraniach v Petržalke boli zdrojom generovania vibroakustickej energie len nové električky typu ŠKODA 29T/30T s hmotnosťou 72 t.



**Obrázok 2.9 – Sprevádzkovaná meracia technika nad vyvýšenou stavebnou konštrukciou (viaduktom) a pod ňou.**



Predmetom merania v historickej budove SND a v budove Slovenskej filharmónie boli vybraté nosné steny a podlahy, a to podľa vyššie uvedeného riešeného problému a zodpovedajúcej normy [23], s cieľom stanoviť ich seizmickú ozvu na prejazdy troch typov električiek (nové, staré kĺbové a dve staré vzájomne spojené).

Predmetom merania v budove SND boli vytipované nosné steny a podlahy, u ktorých sa zisťovali vlastné frekvencie vlastných tvarov.

Prenos signálu z akcelerometrov sa pomocou špeciálnych káblikov prenášal cez merací systém PULSE a pomocou špeciálneho kábla do prenosného počítača, kde sa signál zaznamenával a priebežne vyhodnocoval.

## 2.3 Cieľ a meracia technika

### 2.3.1 Cieľ merania potenciálneho dynamického zaťaženia prevádzky SND

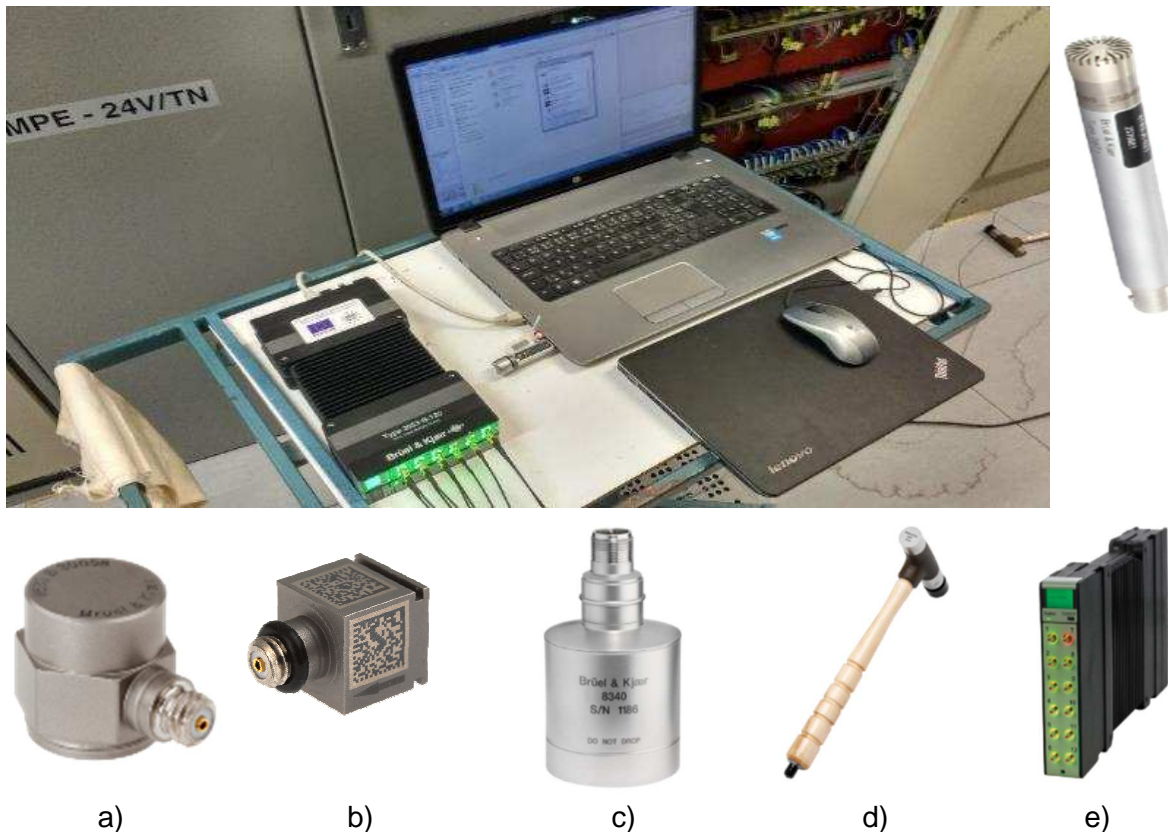
Hlavný cieľ merania mechanického kmitania, integráciou aj mohutnosť (rýchlosť) kmitania, ako sa uvádza v úvode, bol analyzovať potenciálne dynamické namáhanie stavebných konštrukcií budovy SND, ktoré môže spôsobiť poškodenie budovy [23], teda vykonať meranie zrýchlenia kmitania na konštrukčne podobnom úseku koľajovej trate električky (uloženie na prírodnom podloží resp. zemi a estakáde) ako sa plánuje pred budovou SND, keďže uloženie koľajovej trate na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte) generuje výrazne vyššiu vibro-akustickú energiu ako uloženie koľajovej trate na prírodnom zemnom podloží [24]. Na overenie a podporu tohto cieľa sa vykonali aj merania v historickej budove SND a budove Slovenskej filharmónie. **Výsledky týchto meraní sa využijú pri celkovom posúdení vplyvov dlhodobého dynamického zaťaženia od koľajovej dopravy na budovu SND.**

### 2.3.2 Meracia technika dynamického zaťaženie (kmitania)

Riešitelia Strojníckej fakulty STU v Bratislave využívajú v experimentálnom výskume pri meraní mechanického kmitania najmodernejšiu meraciu techniku od renomovanej firmy Bruel & Kjaer (B & K) (Obr. 2.10), a to:

- **PULSE analyzátor:** 12 kanálová meracia karta B&K PULSE 3053-B-120 analyzátor s využiteľným frekvenčným rozsahom do 25 600 Hz pre záznam meraných signálov; tento analyzátor reprezentuje otvorený systém, ktorý poskytuje nové možnosti a viac informácií a spoľahlivosti v procese merania, analýzy, vyhodnotenia a expertízy;
- **senzory zrýchlenia:** akcelerometre B&K 4534-B-001 a B&K 4533-B-001 s využiteľnými frekvenčnými rozsahmi od 0,2 Hz do 12 800 Hz o hmotnosti 8,6 g a citlivosti 10 mV/g, akcelerometer B&K 8340 s využiteľným frekvenčným rozsahom od 0,1 Hz do 150 Hz o hmotnosti 775 g a citlivosti 10 000 mV/g (seizmický senzor); vyznačujú sa týmito vlastnosťami: široký frekvenčný a dynamický rozsah, vysoká spoľahlivosť, dlhodobá stabilita a definovaná linearita v pracovnom rozsahu; piezoelektrické senzory patria k aktívnym meničom, generujúcim elektrický signál a teda nepotrebujú vonkajší napájací zdroj; senzory sa pripevňovali na konštrukciu potrubnej sústavy pomocou špeciálneho magnetu a na podlahu cez ocelový valec s hrotmi;
- **rázové kladivko:** B&K 8207 s citlivosťou 0,225 mV/N a hmotnosti 454 g s maximálnou rázovou silou 35 584 N;

- **softvérový balík PULSE:** pre spracovanie a analýzu meraných údajov;
- **merací mikrofón:** mikrofón 4189 s predzosilňovačom 26714189-A-021 0PP; vyznačuje sa širokým frekvenčným a dynamickým rozsahom, vysokou spoľahlivosťou, dlhodobou stabilitou a definovanou linearitou v pracovnom rozsahu;
- špeciálne pomôcky súvisiace s meraním nízkofrekvenčného dynamického zaťaženia: počítač, oceľový valec s tromi hrotmi, gumové kladivo.



**Obrázok 2.10 – Meracia sústava, merací mikrofón (hore); meracie vybavenie: a) akcelerometer B&K 4534-B-001; b) akcelerometer B&K 4508-B-002; c) akcelerometer B&K 8340; d) rázové kladivko B&K 8207; e) 12-kanálový merací modul B&K 3053-B-120.**

Na meranie sa použil 12 kanálový frekvenčný analyzátor od firmy B & K PULSE 3053-B-120 (Obr. 2.10e) s prenosným počítačom, v ktorom je nainštalovaný softvérový balík PULSE 19. Na generovanie rázov sa použilo modálne kladivko (rázové kladivko) B & K 8207 (Obr. 2.10d) a gumene kladivo. Na snímanie signálu kmitania sa použili akcelerometre B & K 4534-B-001 (Obr. 2.10a), B & K 4508-B-002 (Obr. 2.10b) a seizmický akcelerometer (Obr. 2.10c). Merané údaje sa spracovali v programe PULSE Reflex.

Poznámka. – Toto prístrojové a softvérové vybavenie bolo zakúpené z prostriedkov výskumného projektu „Zvyšovanie bezpečnosti jadroveenergetických zariadení pri seizmickej udalosti“ (ITMS kód Projektu: 26220220171), na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

### 2.3.3 Určenie meracích miest a podmienky merania

Výber meracích miest sa stanovil na základe analýzy zdroja budenia v definovaných smeroch [23] a vstupných a výstupných miestach meraných stavebných komponentov. Hlavnou zásadou bolo vytipovať meracie miesta v blízkosti koľajovej dráhy

v mieste jej uloženia na prírodnom zemnom podloží a v mieste uloženia na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte) ako aj v mieste jej ukotvenia na zemi.

Senzory (snímače zrýchlenia), v prípade pevne zabudovanej kovovej doštičky do betónového základu, sa pomocou magnetu pripevnili na tieto očistené a suché kovové doštičky (pozri Obr. 3.2). Pripevnením senzorov pomocou magnetu sa znížil využiteľný frekvenčný rozsah na približne 4 kHz, čo pri realizovaných meraniach je frekvenčný rozsah dostačujúci. Všetky meracie miesta sa zbavili mastnoty, vlhkosti a nečistôt. Na stavebné konštrukcie sa nalepili výrobcom senzorov dodané montážne podložky, do ktorých sa zasunuli senzory (pozri Obr. 3.6). Seizmický senzor, použitý na horizontálne stavebné konštrukcie, sa magneticky pripevnil na kovový valec s tromi hrotmi (pozri Obr. 3.2).

Použité senzory zrýchlenia môžu pracovať až do teploty 250 °C. Teplota v mieste meraní nepresiahla 30 °C, čo nemalo žiaden vplyv na ich citlivosť, ale ani na ostatné použité meracie prístroje umiestnené v mieste merania.

### **2.3.4 Merané parametre, postup a analýza prenosu**

Meracie prístroje a ich technické parametre reprezentujúce danú oblasť mechanického kmitania (vibrácií) sa pred meraním kalibrovali a počas overovacích postupov nastavili. Podľa druhu signálu je veľmi dôležité, okrem frekvenčného rozsahu, správne nastaviť časové okná, druh spriemerovania a počet spriemerovaní za časovú jednotku [20]. Meraný parameter mechanického kmitania je zrýchlenie s rozmerom  $\text{m/s}^2$  a tiež s rádovo menšou jednotkou  $\text{mm/s}^2$ . Jednotkou zrýchlenosti je  $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})/\text{N}$ . Pre zvolený frekvenčný rozsah sa snímaný signál zrýchlenia spracoval FFT analýzou a integráciou na rýchlosť kmitania (mohutnosť kmitania). Okrem merania zrýchlenia kmitania na primárnom zdroji sa meraním zisťujú aj jeho prenosové cesty a ozva na vytipovaných stavebných komponentoch [18, 20, 21].

Dynamické zaťaženie komponentov sa hodnotí aj prostredníctvom mohutnosti kmitania s rozmerom  $\text{mm/s}$  [18, 23]. Nasnímaný signál zrýchlenia kmitania sa s využitím softvéru PULSE integroval na rýchlosť kmitania, čím sa získali hodnoty mohutnosti kmitania reprezentujúce energetické zaťaženie analyzovaných stavebných konštrukcií.

Namerané hodnoty zrýchlenia kmitania sa často transformujú do decibelovej mierky. Hladina zrýchlenia kmitania sa definuje ako desaťnásobok logaritmu podielu kvadrátov nameranej hodnoty zrýchlenia k referenčnej hodnote zrýchlenia. Vzhľadom na niekoľko rádový rozdiel meraných hodnôt zrýchlenia kmitania je využitie decibelovej mierky vo väčšine prípadoch výhodnejšie ako lineárnej mierky. Aj prenosový útlm sa definuje ako desaťnásobok dekadického logaritmu podielu kvadrátu vstupnej a výstupnej hodnoty zrýchlenia kmitania a udáva sa v decibeloch [21].

Zvuk sa meral v pascaloch a vyjadroval v hladinách akustického tlaku.

### 3 Modálna analýza nosných stavebných konštrukcií sál budovy SND

Modálna analýza sa využíva na zisťovanie vlastných frekvencií vlastných tvarov komponentov aj stavebných a technologických konštrukcií s cieľom ich porovnania s budiacimi frekvenciami, aby sa identifikovali rezonančné oblasti stavebných alebo technologických konštrukcií. Na opis modálnych parametrov a správania sa stavebných alebo technologických konštrukcií sa využívajú možnosti rozkladu kmitavého pohybu na kontinuálne kmitanie jednotlivých častí najčastejšie dvojrozmerných telies (modálne, tvarové, vlastné) pohyby, z ktorých je každý charakterizovaný vlastnou frekvenciou a jej zodpovedajúcim vlastným tvarom kmitov.

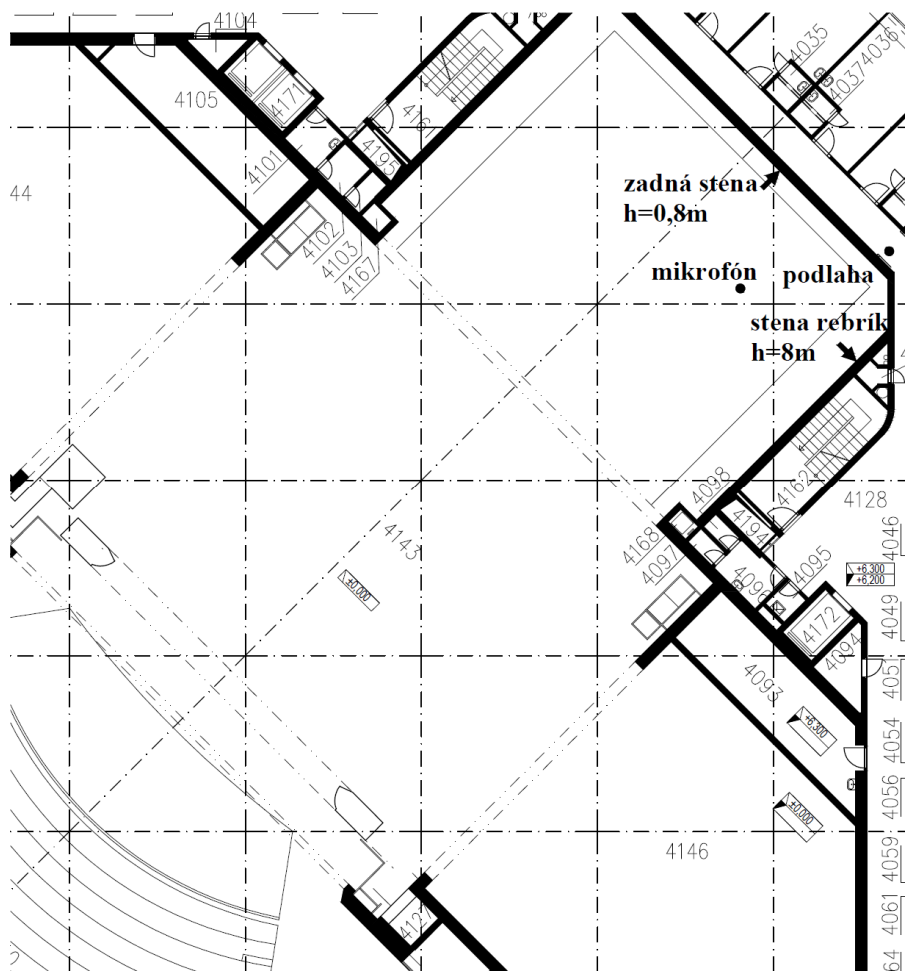
Problémy štruktúrneho kmitania generovaného vonkajšími zdrojmi predstavujú významné riziká a obmedzenia pri návrhu širokého rozsahu stavebných a technologických konštrukcií. Môžu byť príčinou poškodenia integrity týchto konštrukcií. Nadmerné kmitanie spôsobuje aj nadmernú hlučnosť a negatívne vplyva na okolité prostredie. K zvýšenému dynamickému zaťaženiu prispievajú aj modálne vlastnosti samotnej konštrukcie. Tieto vlastnosti sa určujú a potom vyhodnocujú modálnou analýzou, ktorej výsledky umožňujú predpokladať správanie sa stavebnej alebo technologickej konštrukcie počas jej prevádzky. Pri modálnej analýze sa zisťujú vlastné frekvencie sústavy, vlastné tvary kmitov a modálne tlmenie sústavy. **Najviac poškodení budovy zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka sa vyskytuje vo frekvenčnom rozsahu od 1 Hz do 150 Hz [23].**

Pomocou získaných vlastných frekvencií možno určiť nebezpečné prevádzkové stavy, ktorým sa dobre navrhnutá stavebná alebo technologická konštrukcia musí vyhnúť. V prípade zhody vlastných frekvencií s frekvenciami budiacich síl nastane rezonancia konštrukcie alebo jej časti, čo zvyšuje nebezpečenstvo ich poškodenie a súčasne aj vytvorenie nežiaduceho akustického poľa s možným stojatým vlnením v uzavretom priestore a u **veľkoplošných priestorov, čo je prípad sál SND, sa to môže prejavovať ako dunivý hluk.**

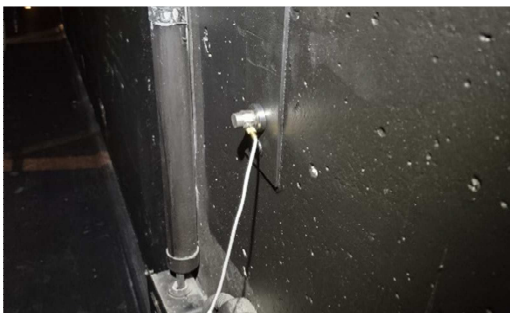
Cieľ týchto meraní bol získať hodnoty zrýchlenia kmitania v mieste budenia rázovým kladivkom a vo zvolených meracích miestach na zvislých stenách a podlahe v čínoherných sálach a opernej sále SND. Celkový počet rôznych meracích zoskupení merania zrýchlenia kmitania bol štyri. Meranie sa vykonalo na definovaných miestach povrchu stavebných konštrukcií, a to nosných zvislých stien, podlahy a stropnej dosky v podzemnej garáži. Výsledky merania sa využili pri stanovení vlastných frekvencií konštrukčných prvkov budovy SND. Z hľadiska dynamického zaťaženia analyzovaných stavebných konštrukcií je potrebné mať informácie o vlastných frekvenciách pri budení externým zdrojom, čiže prejazdom električky, či koľajového vozidla.

#### 3.1 Modálna analýza vytipovaných konštrukcií v sále opery a baletu

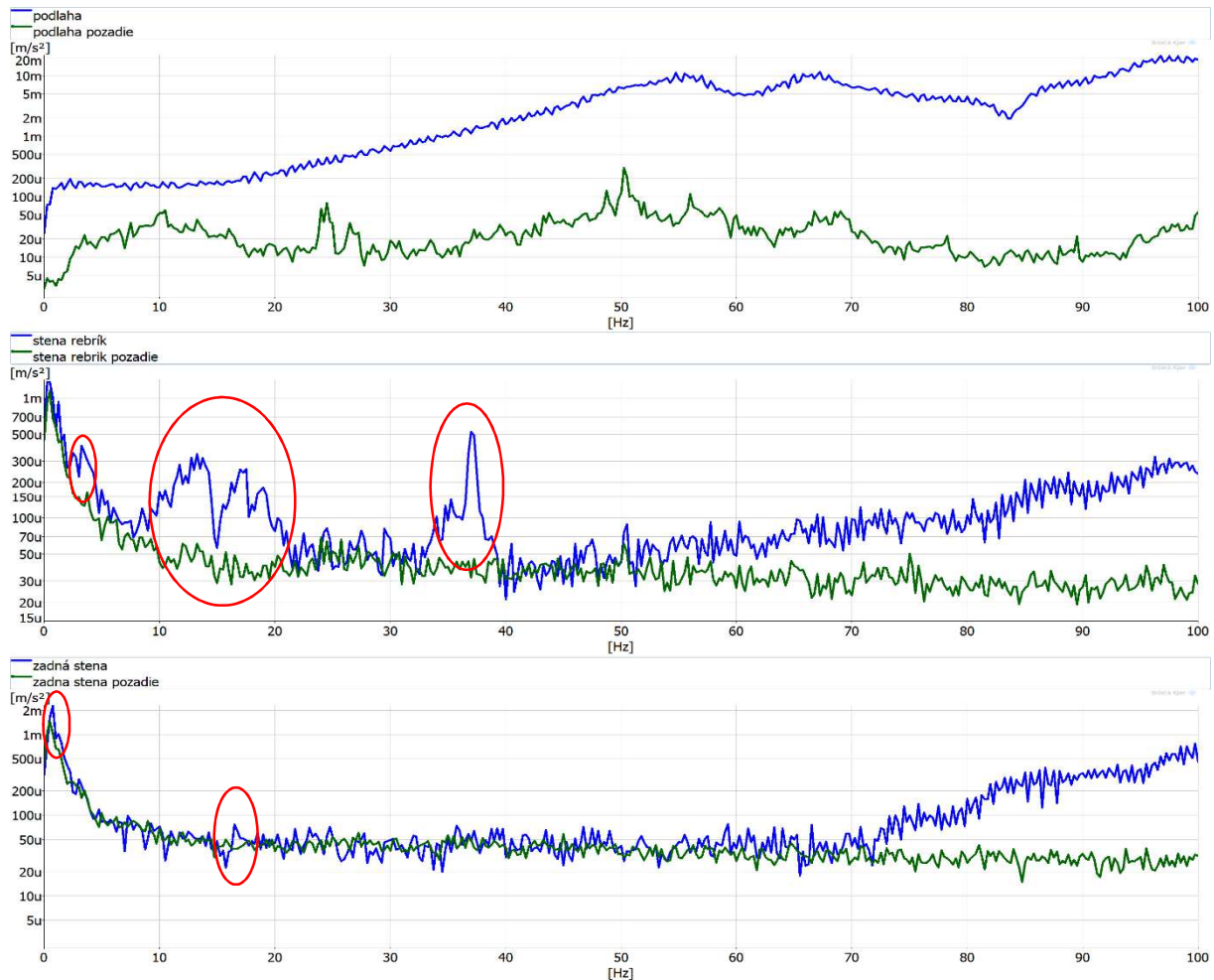
Pre modálnu analýzu sa vybrali nosné steny, ktoré neboli povrchovo upravené dekoratívnymi materiálmi, teda merali sa holé betónové steny a podlaha v mieste kontaktu s betónovou časťou podlahy. Meracie miesta pre modálnu analýzu sú zobrazené v pôdoryse sály opery a baletu na obrázku 3.1 a detaily pripevnenia a uloženia akcelerometrov na obrázku 3.2.



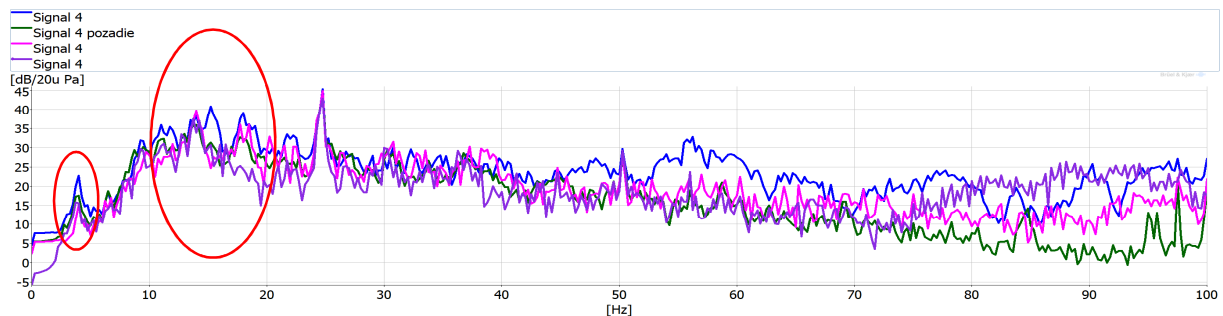
**Obrázok 3.1 – Situovanie meracích miest v sále opery a baletu.**



**Obrázok 3.2 – Pripevnenie akcelerometrov ku kolmým nosným stenám a na podlahu.**



**Obrázok 3.3 – Modálna analýza v sále opery a baletu SND.**

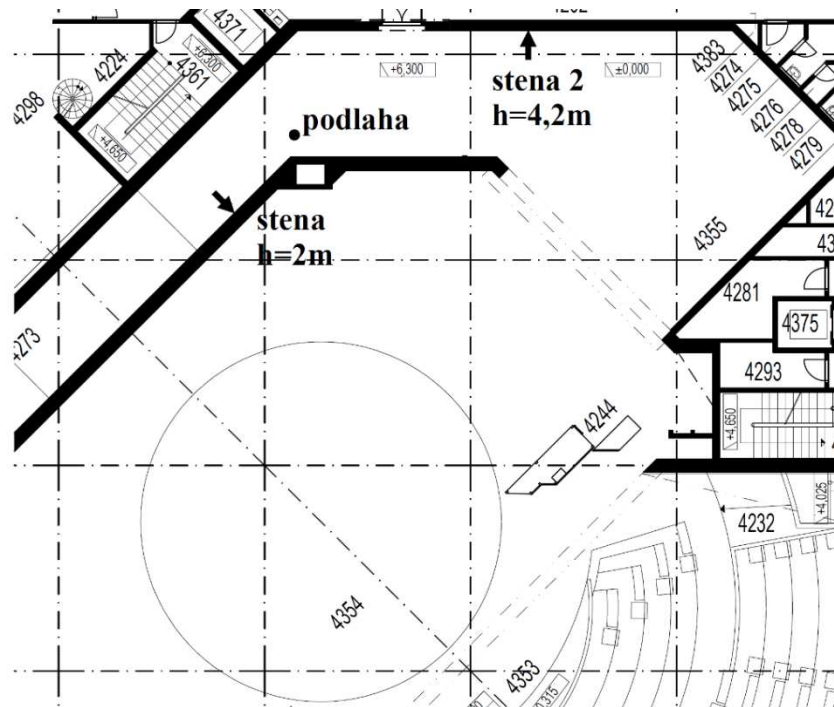


**Obrázok 3.4 – Frekvenčná analýza zvuku počas modálnej analýzy v sále opery a baletu.**

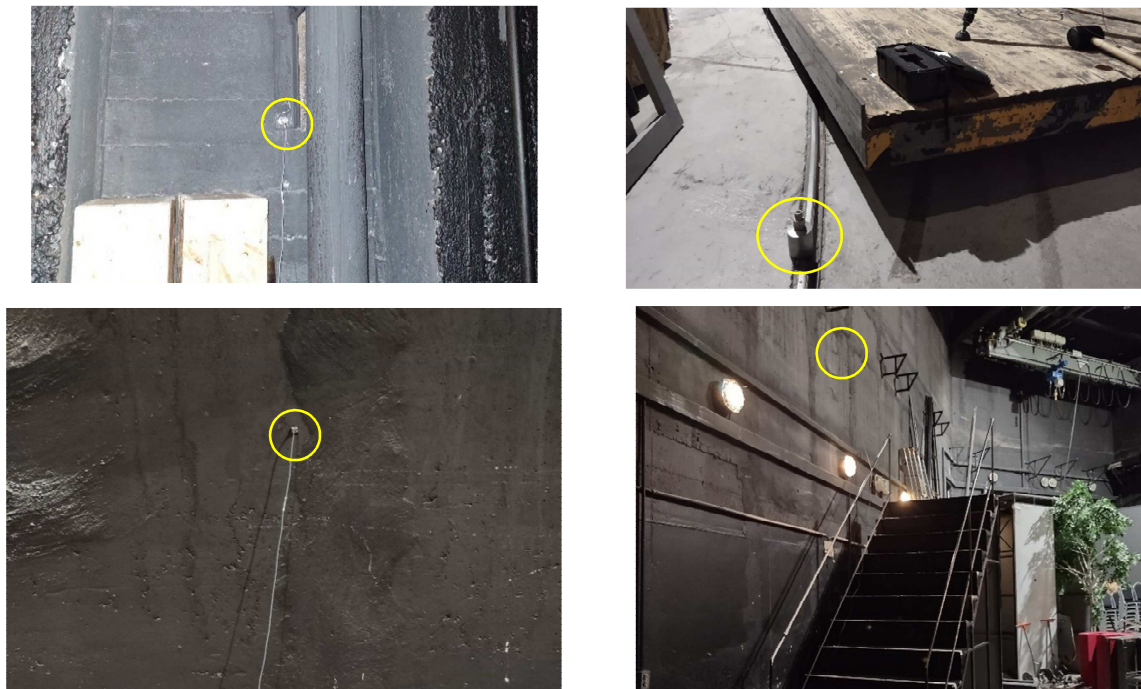
Z modálnej analýzy je vidieť, že frekvenčné spektrá obsahujú výrazné amplitúdy v oblasti nízkych frekvencií (technickej seizmicity), a to od 1 Hz do 35 Hz (Obr. 3.3), ktoré sa zhodujú aj z frekvenčným spektrom stenou generovaného zvuku (Obr. 3.4). Najviac poškodení budovy zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka sa vyskytuje vo frekvenčnom rozsahu od 1 Hz do 150 Hz [23]. Táto frekvenčná oblasť, v rozsahu do 100 Hz, sa v ďalšej časti správy porovnáva s amplitúdami frekvenčných spektrier generovaných na podobnom uložení koľajovej trate ako sa plánuje pred budovou SND, teda s frekvenčnými spektrami získanými z meraní na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte) v Petržalke. Nebezpečenstvo poškodzovania stavebných konštrukcií sa zvyšuje so znižovaním frekvencie, keďže nižšie frekvencie sú energeticky silnejšie.

### 3.2 Modálna analýza vybraných konštrukcií v sále činohry

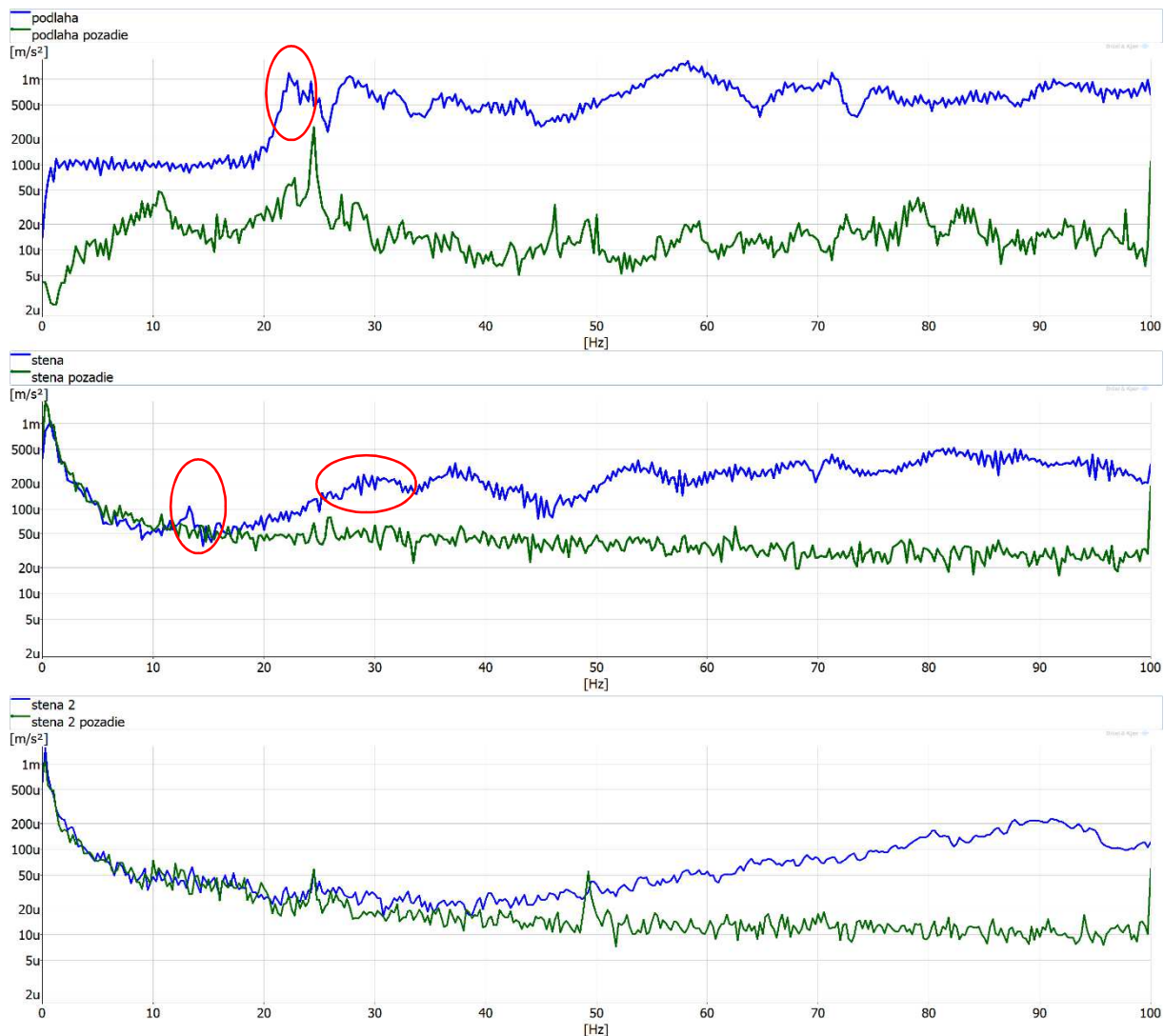
Pre modálnu analýzu sa aj v sále činohry vybrali nosné steny, ktoré neboli povrchovo upravené dekoračným materiálom, teda merali sa holé betónové steny a podlaha v mieste kontaktu s betónovou časťou podlahy. Meracie miesta pre modálnu analýzu sú zobrazené v pôdoryse sály činohry na obrázku 3.5 a detaily pripevnenia a uloženia akcelerometrov na obrázku 3.6.



Obrázok 3.5 – Situovanie meracích miest v sále činohry.



Obrázok 3.6 – Pripevnenie akcelerometrov ku kolným nosným stenám a na podlahu.



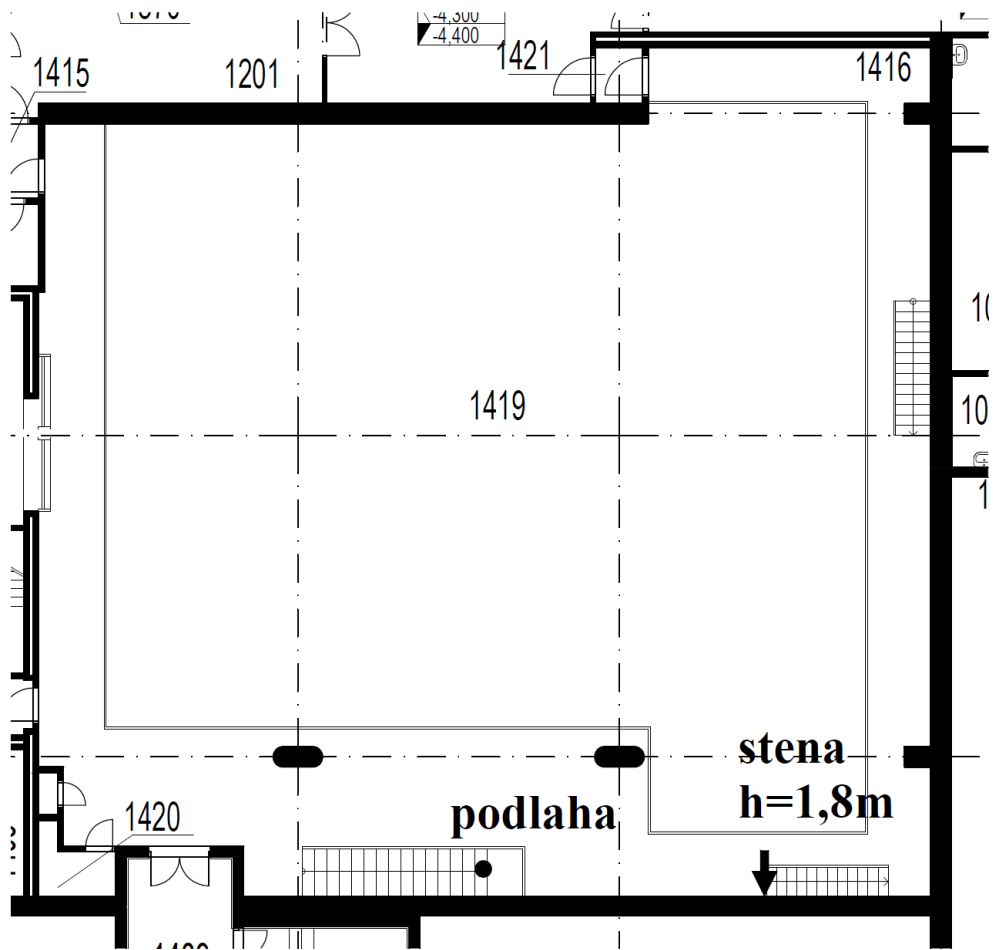
**Obrázok 3.7 – Modálna analýza v sále čínohry SND.**

Z modálnej analýzy je vidieť, že frekvenčné spektrá obsahujú výraznejšie amplitúdy v oblasti nízkych frekvencií (technickej seizmicity), a to od 1 Hz do 35 Hz (Obr. 3.7). Najviac poškodení budovy zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka sa vyskytuje vo frekvenčnom rozsahu od 1 Hz do 150 Hz [23]. Táto frekvenčná oblasť, v rozsahu do 100 Hz, sa v ďalšej časti správy porovnáva s amplitúdami frekvenčných spektrier generovanými na podobnom uložení koľajovej trate ako sa plánuje pred budovou SND, teda s frekvenčnými spektrami získanými z meraní na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte) v Petržalke. Nebezpečenstvo poškodzovania stavebných konštrukcií sa zvyšuje so znižovaním frekvencie.

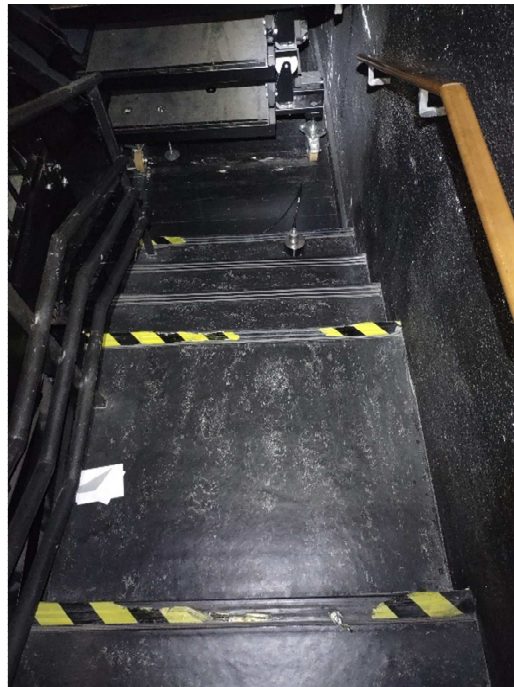
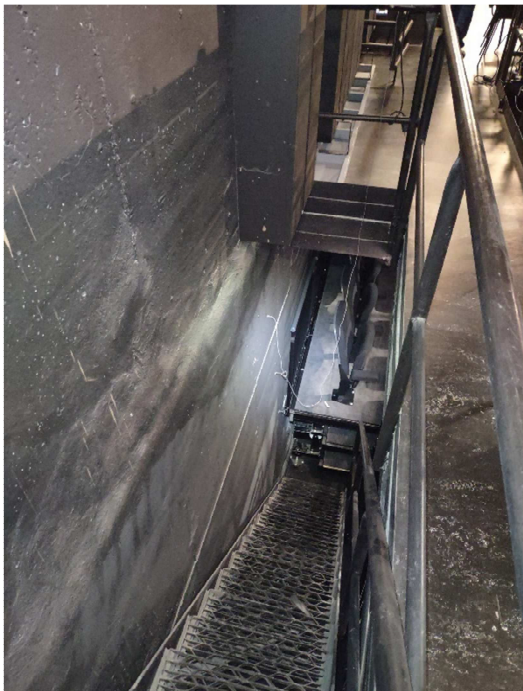
### 3.3 Modálna analýza vybraných konštrukcií v sále štúdia

Pre modálnu analýzu sa vybrala nosná stena, ktorá nebola povrchovo upravená dekoračným materiálom, teda merala sa holá betónová stena a podlaha v mieste kontaktu s betónovou časťou podlahy. Meraná nosná stena je najbližšie k potenciálnemu zdroju budenia (prejazdu električky) a lúče seizmického a vibro-akustického vlnenia by pôsobili kolmo na túto stenu (pozri Obr. 2.6). Meracie miesta pre modálnu analýzu sú zobrazené v pôdoryse sály štúdia na obrázku 3.8 a detaily pripevnenia a uloženia akcelerometrov na obrázku 3.9.

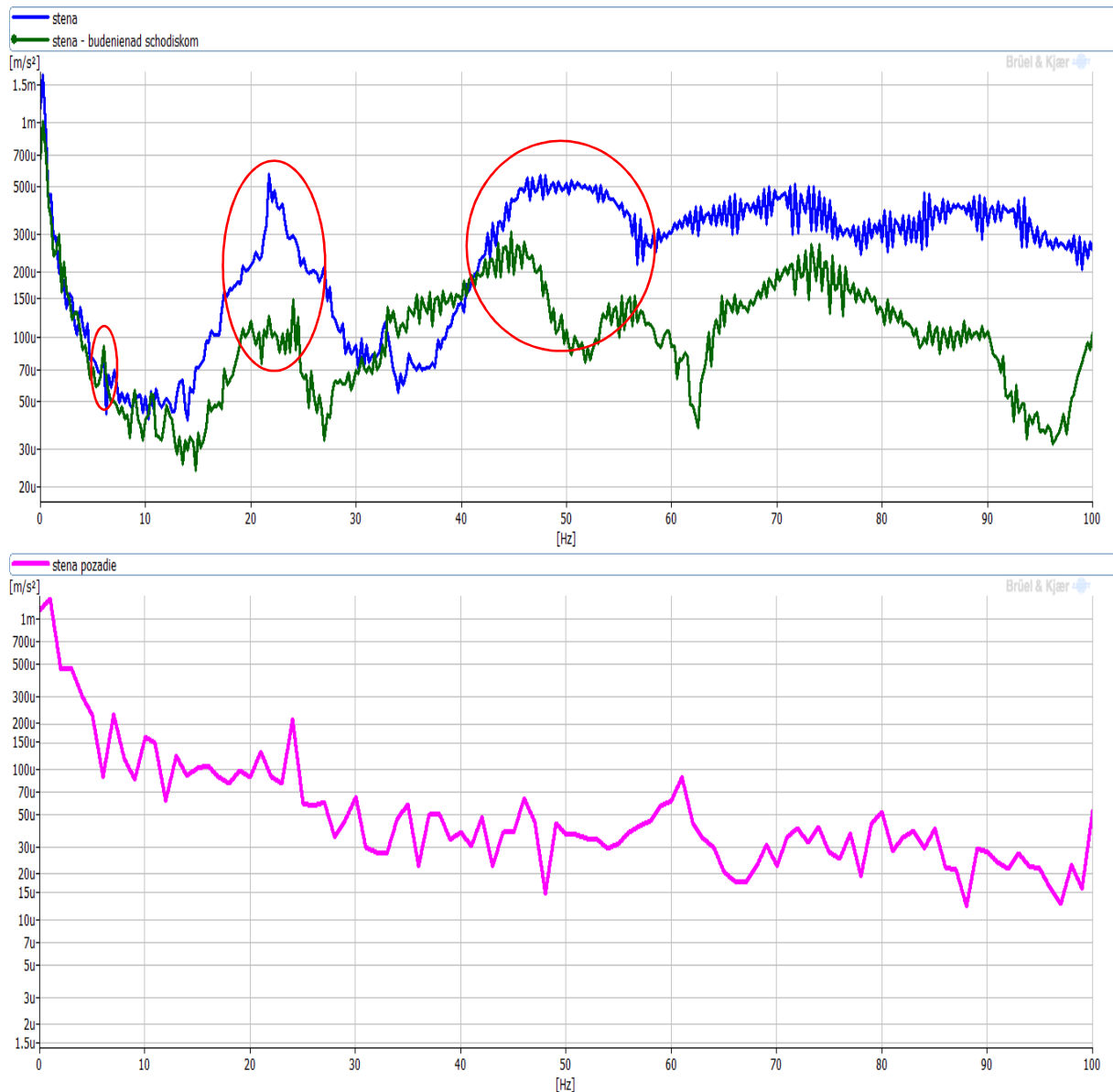




Obrázok 3.8 – Situovanie meracích miest v sále štúdia.



Obrázok 3.9 – Pripevnenie akcelerometrov ku kolmej nosnej stene a na podlahu.

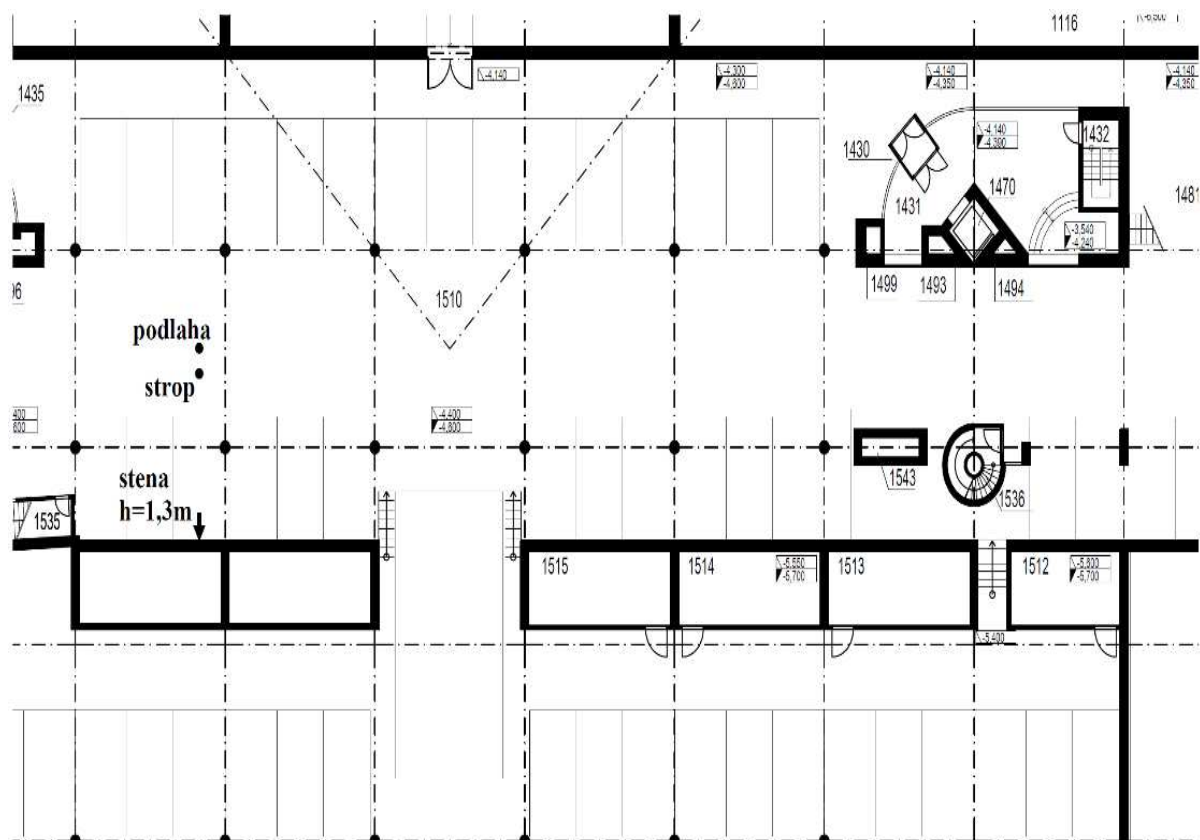


**Obrázok 3.10 – Modálna analýza v sále štúdia SND.**

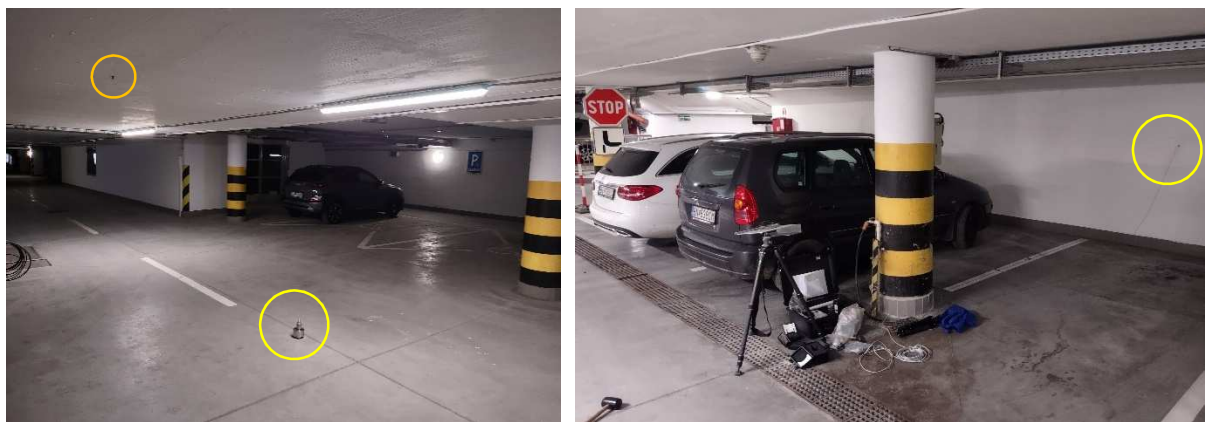
Z modálnej analýzy je vidieť, že frekvenčné spektrá obsahujú výrazné amplitúdy v oblasti nízkych frekvencií (technickej seizmicity), a to od 1 Hz do 35 Hz (Obr. 3.10). Najviac poškodení budovy zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka sa vyskytuje vo frekvenčnom rozsahu od 1 Hz do 150 Hz [23]. Táto frekvenčná oblasť, v rozsahu do 100 Hz, sa v ďalšej časti správy porovnáva s amplitúdami frekvenčných spektier generovanými na podobnom uložení koľajovej trate ako sa plánuje pred budovou SND, teda s frekvenčnými spektrami získanými z meraní na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte) v Petržalke. Nebezpečenstvo poškodzovania stavebných konštrukcií sa zvyšuje so znižovaním frekvencie, keďže nižšie frekvencie sú energeticky silnejšie.

### 3.4 Modálna analýza v podzemnej garáži SND

Pre modálnu analýzu sa vybrali nosné holé betónové steny a podlaha v mieste čo najbližšie k diagnostikovým sálam SND. Meracie miesta pre modálnu analýzu sú zobrazené v pôdoryse garáže na obrázku 3.11 a detaily pripevnenia a uloženia akcelerometrov na obrázku 3.12.

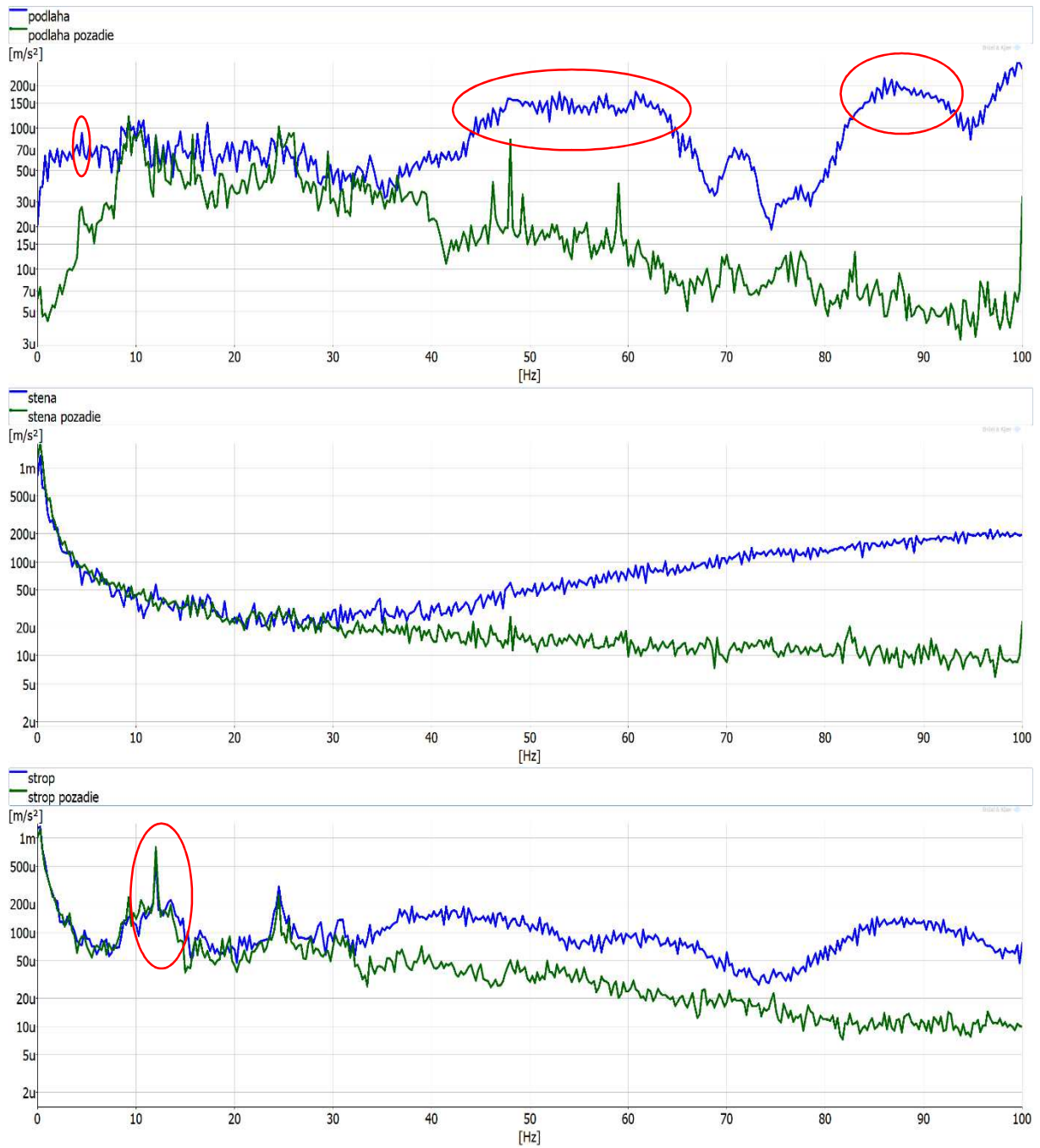


**Obrázok 3.11 – Situovanie meracích miest v podzemnej garáži SND.**



**Obrázok 3.12 – Pripevnenie akcelerometrov na podlahu, na strop a ku kolmej nosnej stene.**

Z modálnej analýzy je vidieť, že frekvenčné spektrá obsahujú výrazné amplitúdy v oblasti nízkych frekvencií (technickej seizmicity), a to od 1 Hz do 35 Hz (Obr. 3.13). Najviac poškodení budovy zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka sa vyskytuje vo frekvenčnom rozsahu od 1 Hz do 150 Hz [23]. Táto frekvenčná oblasť, v rozsahu do 100 Hz, sa v ďalšej časti správy porovnáva s amplitúdami frekvenčných spektrier generovanými na podobnom uložení koľajovej trate ako sa plánuje pred budovou SND, teda s frekvenčnými spektrami získanými z meraní na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte) v Petržalke. Nebezpečenstvo poškodzovania stavebných konštrukcií sa zvyšuje so znižovaním frekvencie, keďže nižšie frekvencie sú energeticky silnejšie.



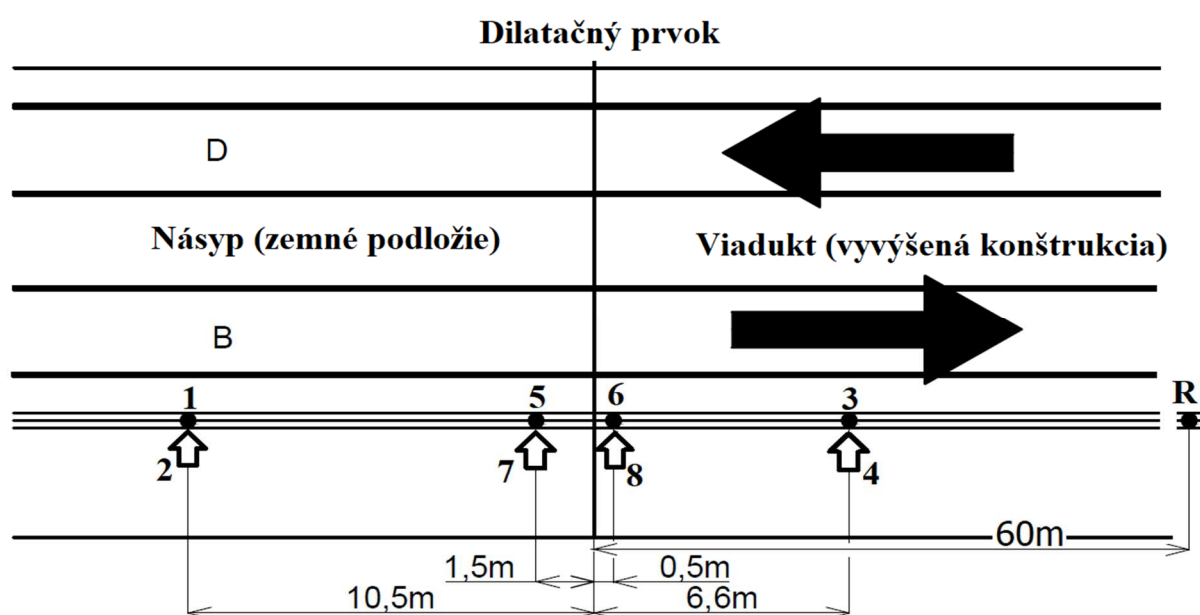
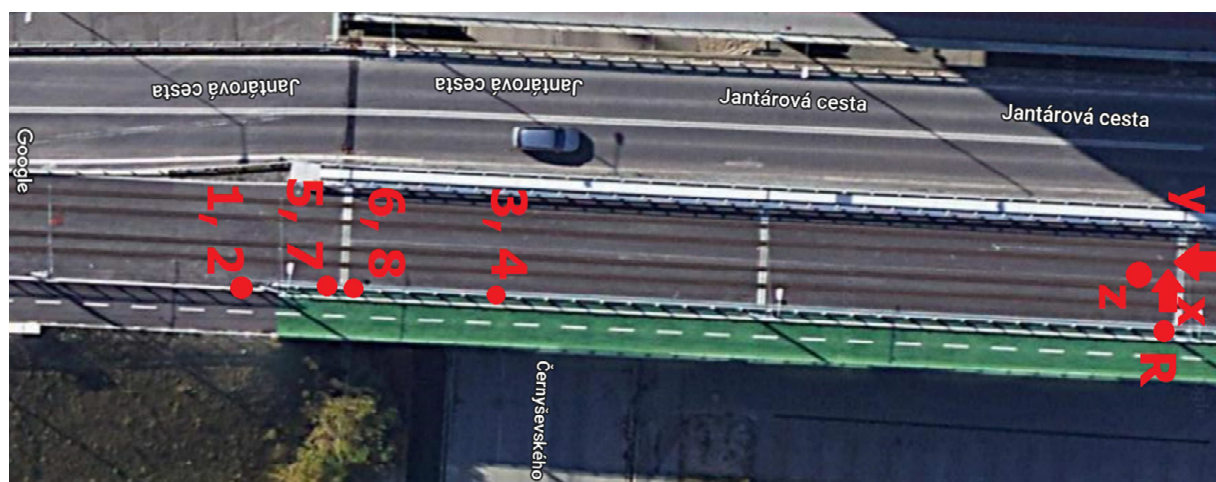
**Obrázok 3.13 – Modálna analýza v podzemných garážach SND.**

## 4 Analýza časového záznamu prejazdu električiek

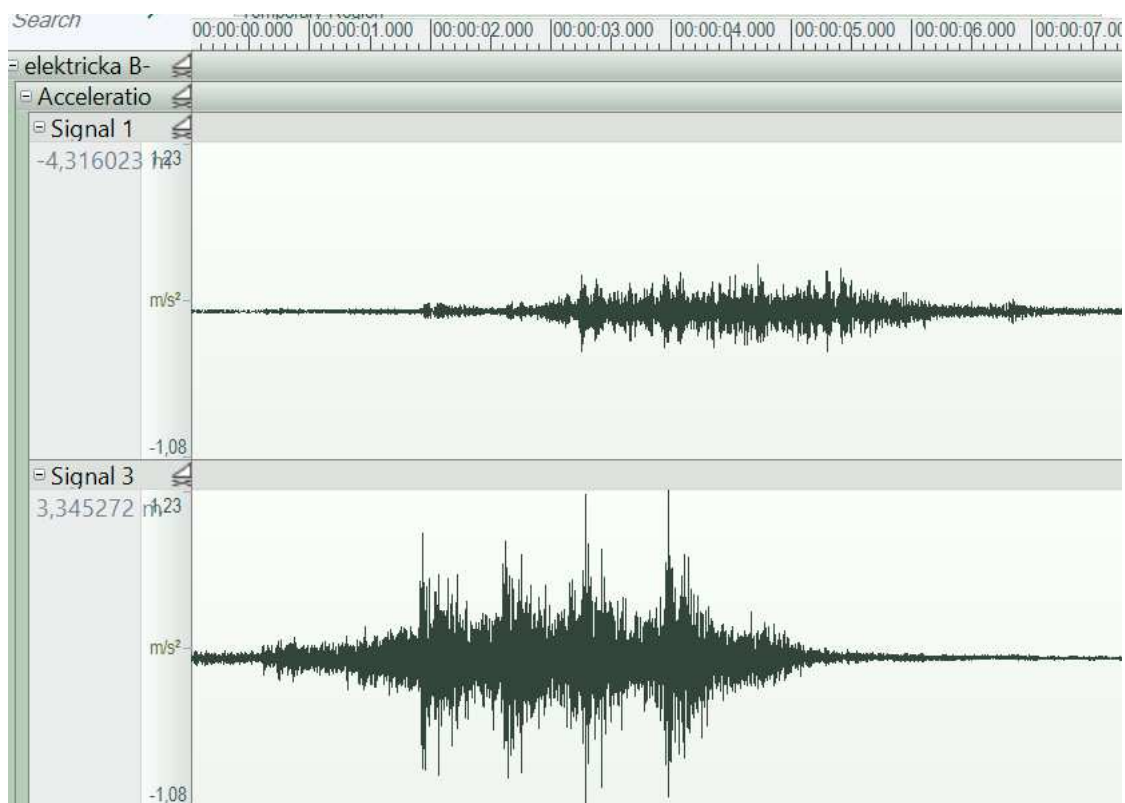
Časové záznamy zobrazujú priebeh kinematického budenia generovaného nerovnosťami jazdného profilu kolesa koľajového vozidla a nerovnosťami koľajnice. Amplitúdy rázového budenia sú okrem hmotnosti a rýchlosti vozidla, výrazne závislé aj od dokonalosti kontaktného povrchu kolesa s koľajnicou [25]. Z nameraného zrýchlenia kmitania možno vypočítať dynamickú silu generovanú nameraným zrýchlením a hmotnosťou nosnej dosky vyvýšenej stavebnej konštrukcie (estakády, viaduktu) medzi podpernými stĺpmi a koľajového vozidla.

### 4.1 Grafické zobrazenie časového záznamu

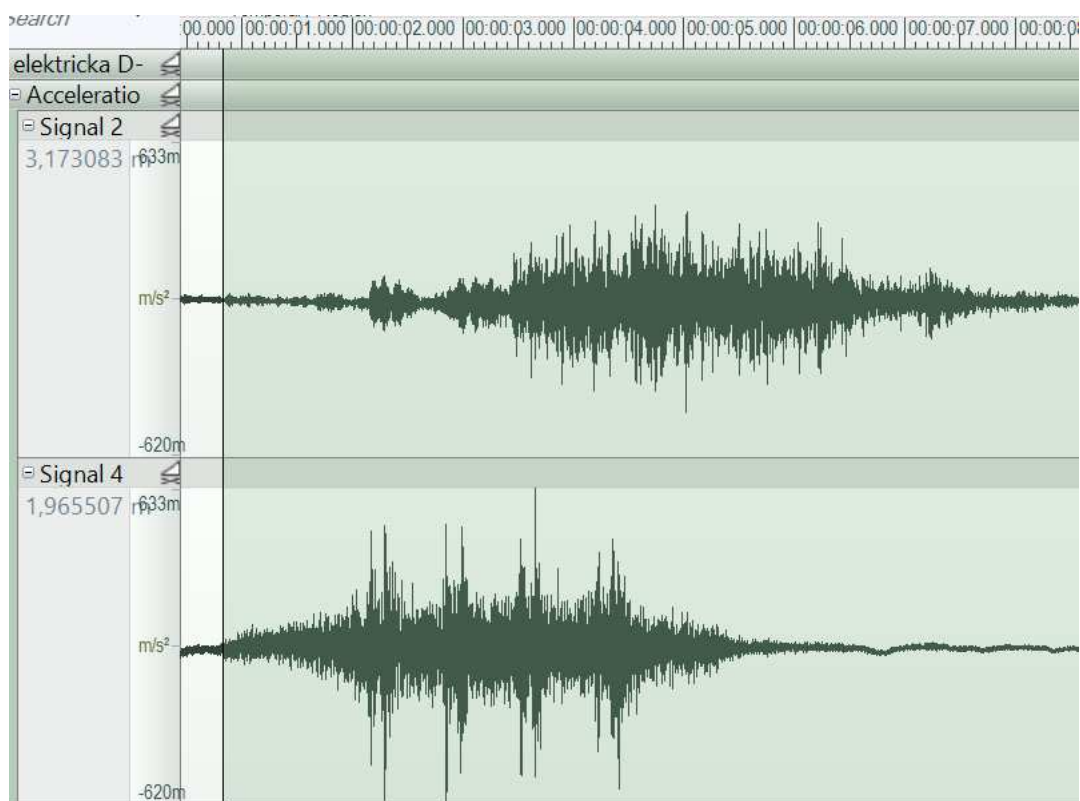
Obrázok 4.1 zobrazuje meracie miesta v smere horizontálnom, kolmo na koľajovú trať a v smere vertikálnom. Na obrázkoch 4.2 až 4.5 sú spracované časové priebehy nameraných zrýchlení od dynamického zaťaženia generovaného prejazdom električky cez meraný úsek koľajovej trate uloženej na prírodnom zemnom podloží a na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte, estakády) v Petržalke pre definované meracie miesta. Na obrázku 4.6 sú časové priebehy prenosu vibroakustickej energie z referenčného meracieho miesta na viadukte do miesta ukotvenia podperných stĺpov.



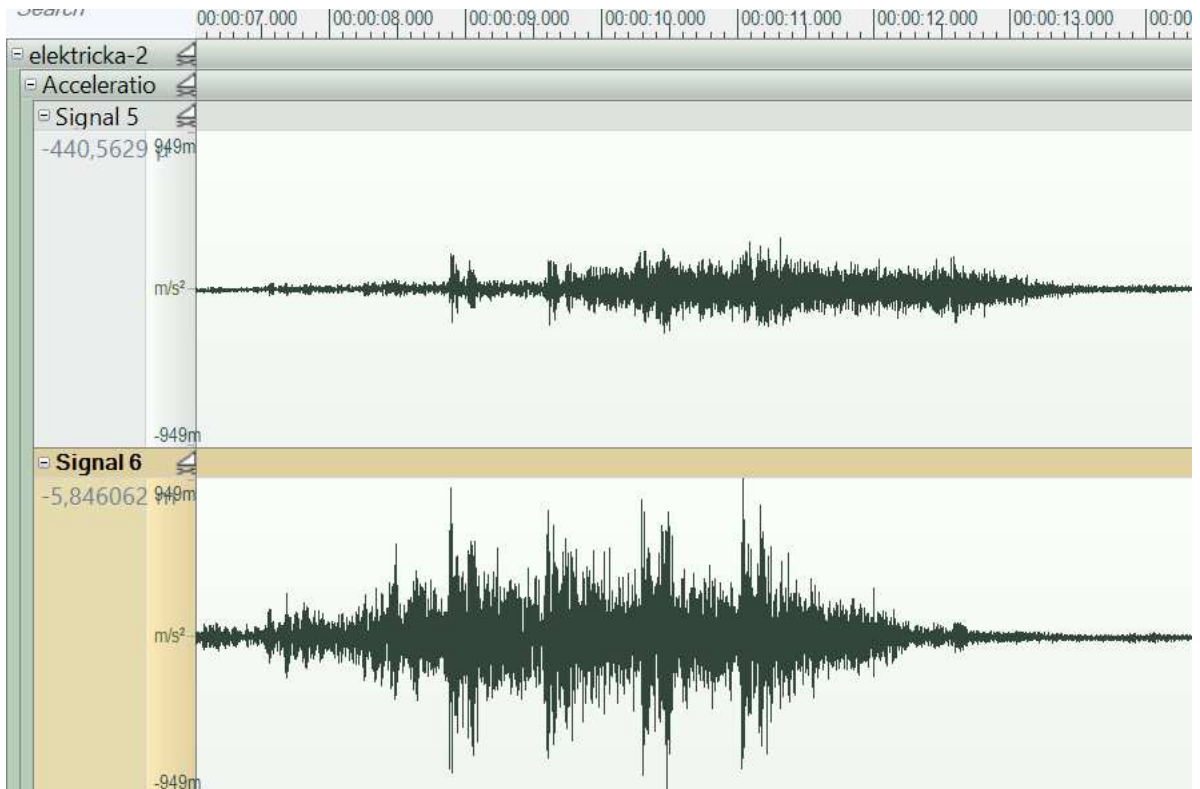
Obrázok 4.1 – Meracie miesta v blízkosti uloženia koľajovej dráhy.



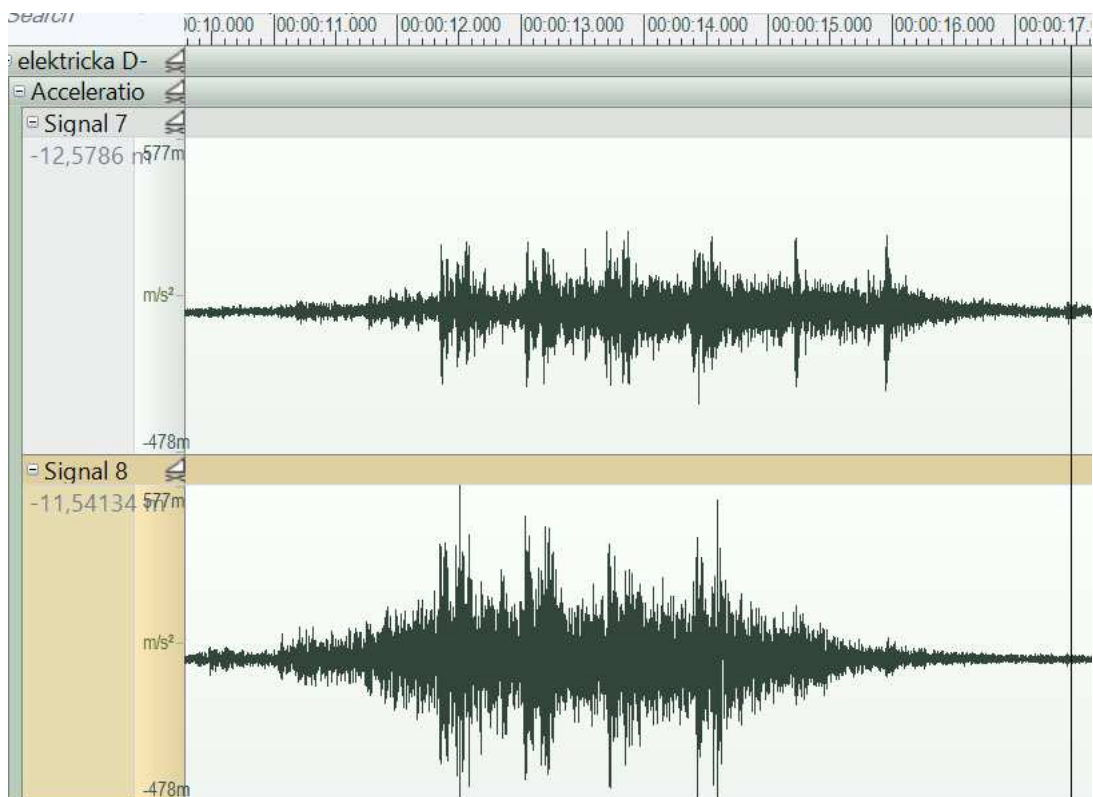
**Obrázok 4.2 – Časový záznam prejazdu električky v meracích bodoch 1 (koľajová trať na zemnom podloží – hore) a 3 (koľajová trať na viadukte – dole) vo vertikálnom smere.**



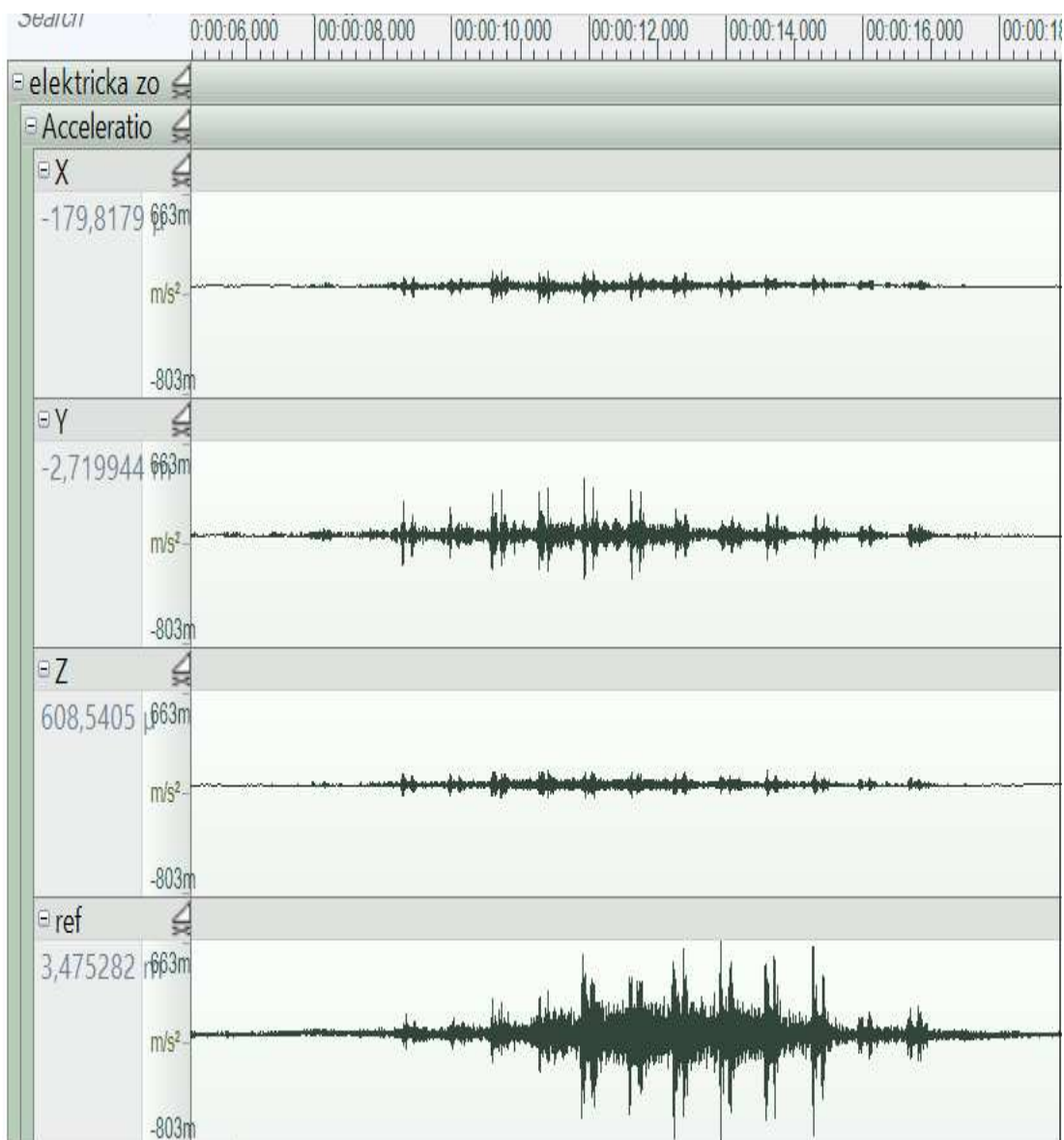
**Obrázok 4.3 – Časový záznam prejazdu električky v meracích bodoch 2 (koľajová trať na zemnom podloží – hore) a 4 (koľajová trať na viadukte – dole) v horizontálnom smere.**



**Obrázok 4.4 – Časový záznam prejazdu električky v meracích bodoch v blízkosti dilatačného prvku 5 (koľajová trať na zemnom podloží – hore) a 6 (koľajová trať na viadukte – dole) vo vertikálnom smere.**



**Obrázok 4.5 – Časový záznam prejazdu električky v meracích bodoch v blízkosti dilatačného prvku 7 (koľajová trať na zemnom podloží – hore) a 8 (koľajová trať na viadukte – dole) vo vertikálnom smere.**



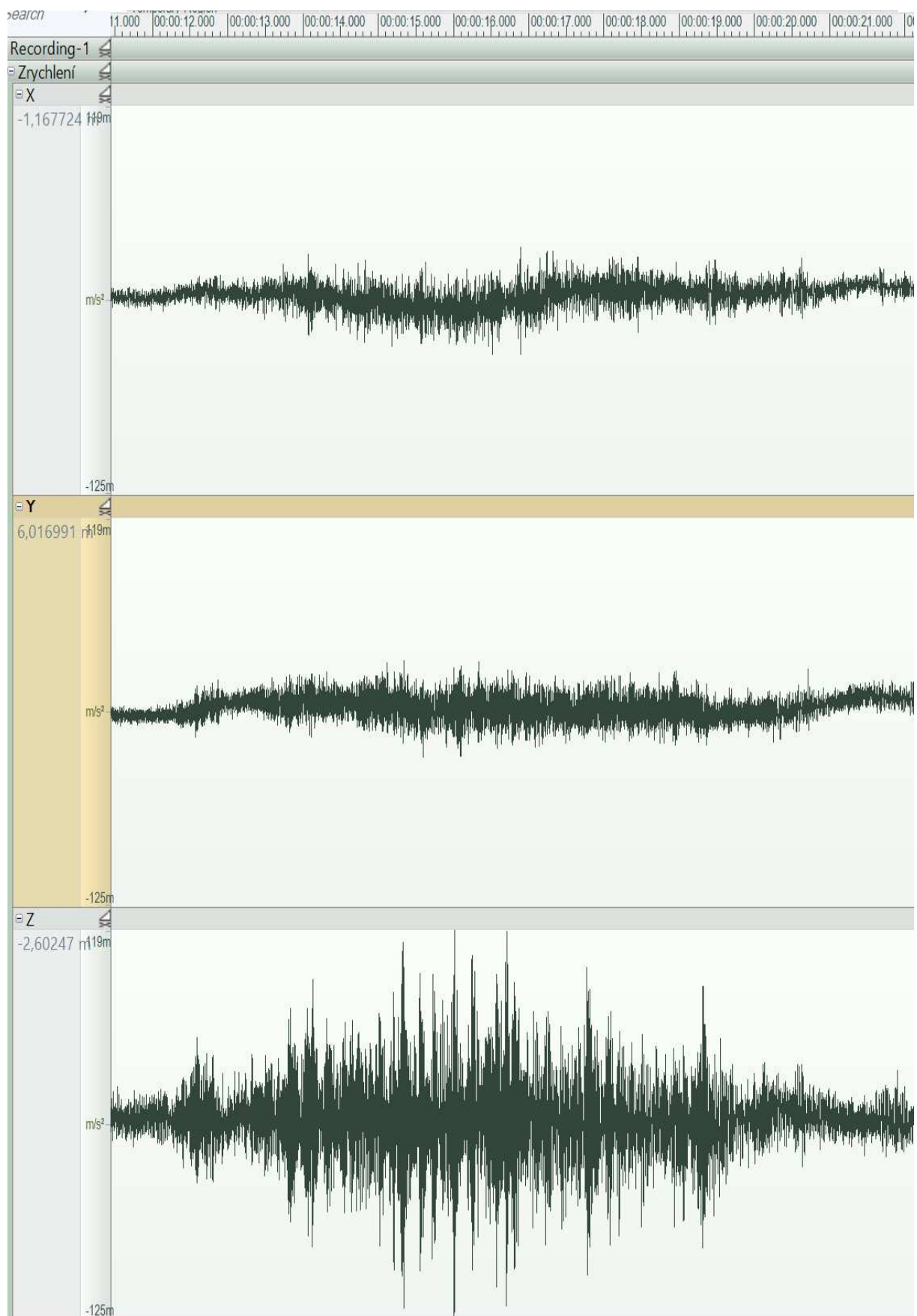
**Obrázok 4.6 – Časový záznam prejazdu električky v meracích bodoch v ukotvení podperných stĺpov viaduktu v smeroch  $x, y, z$  a v referenčnom bode.**

Aj z časových záznamov získaných na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (viadukte, estakáde) v Petržalke je vidieť **výrazný rozdiel medzi prejazdom električky na prírodnom zemnom podloží a na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte)**. Časové záznamy reprezentujú zrýchlenie vybudenej mechanického kmitania (vibrácií), ktoré keď vynásobíme hmotnosťou vyvýšenej stavebnej konštrukcie vrátane hmotnosti električky dostaneme rázovú budiacu silu pôsobiacu na jej uloženie a podperné konštrukcie. A táto rázová budiaca sila môže odhadom dosahovať až stovky kN.

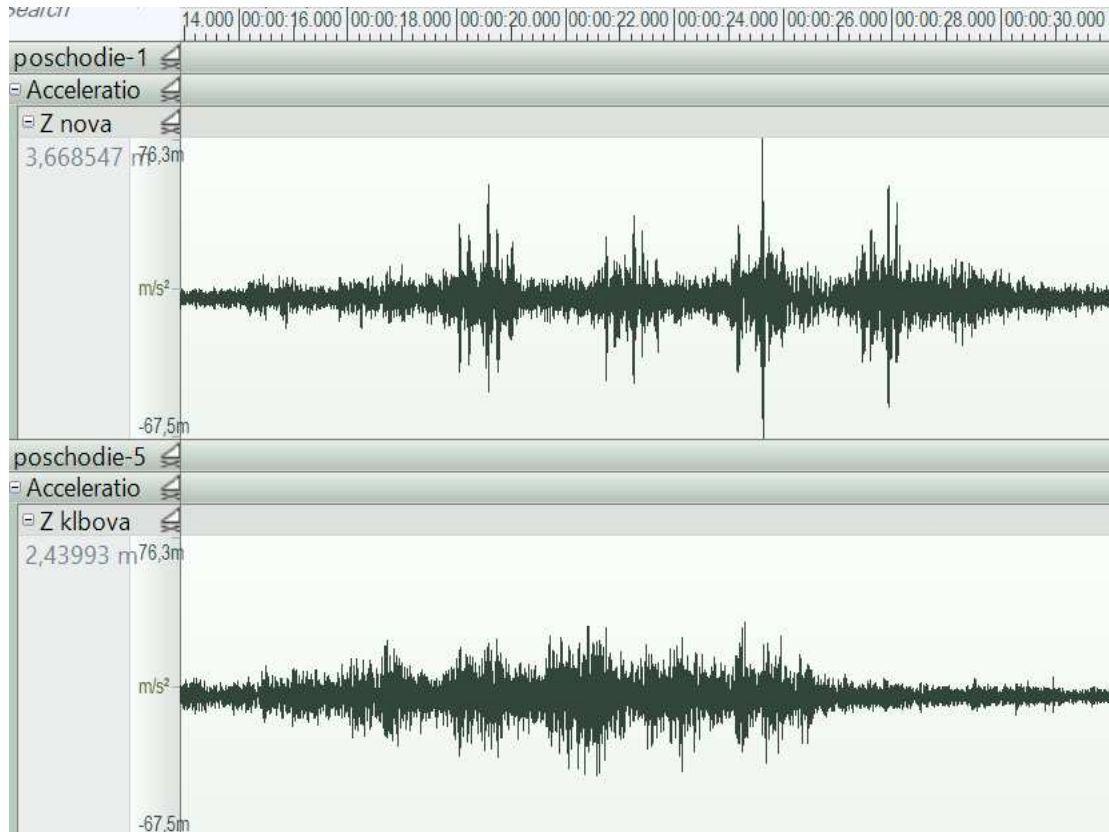
Časové priebehy kinematického budenia vo vnútri historickej budovy SND (pozri Obr. 6.1) v smeroch  $x, y, z$  pri prejazde električky sú zobrazené na Obr. 4.7 a pri prejazde popri budove Slovenskej filharmónie na Obr. 4.8 (pozri Obr. 7.1).

Z časových záznamov je zrejmé, že dynamické zaťaženie blízkeho okolia závisí aj od typu električky (Obr. 4.8 a 4.9). Nové električky dynamicky výraznejšie ovplyvňujú okolité prostredie a teda aj poškodenie budov nachádzajúcich sa v blízkosti koľajovej dráhy, a majú výraznejší vplyv na generovanie nízkofrekvenčného hluku.

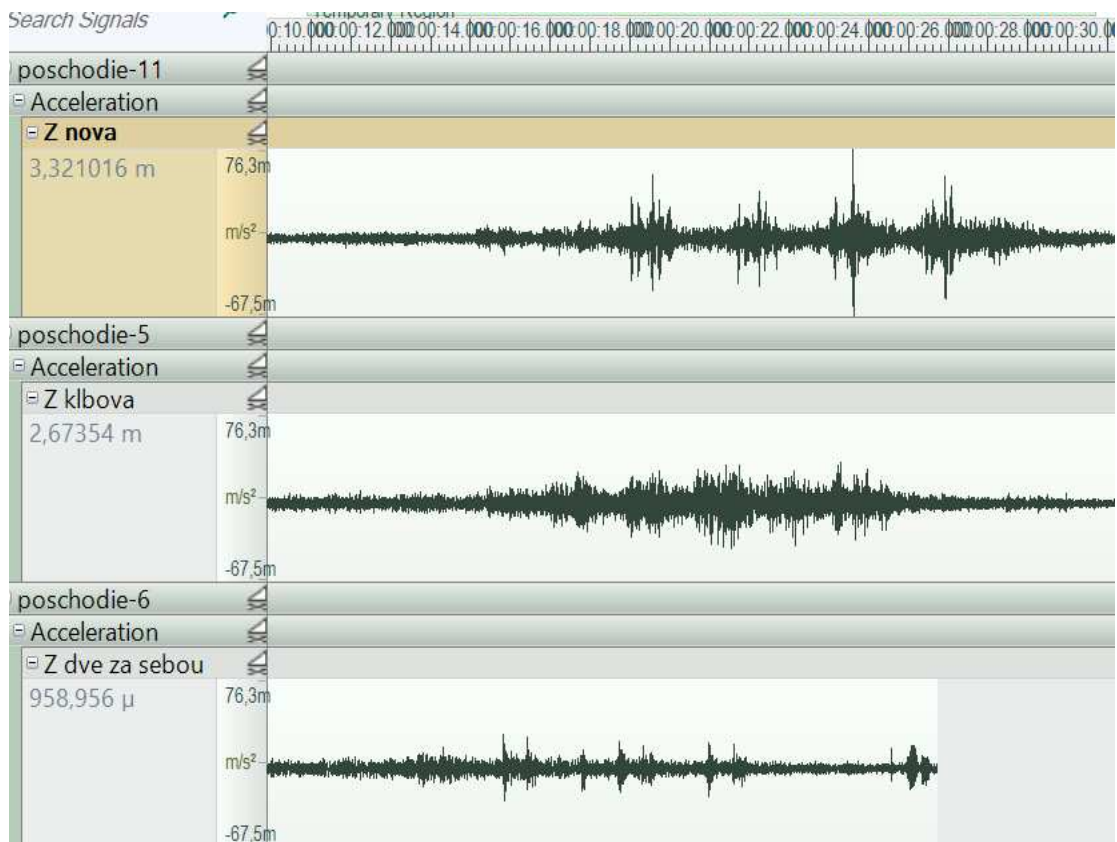




**Obrázok 4.7 – Časový záznam prejazdu električky v meracích bodoch vo vnútornom rohu historickej budovy SND v smeroch  $x, y, z$ .**



Obrázok 4.8 – Časový záznam prejazdu novej a kĺbovej električky popri budove filharmónie na poschodí v smere vertikálnom.



Obrázok 4.9 – Časový záznam prejazdu električky v meracích bodoch filharmónie na poschodí (balkón).

## 4.2 Tabuľkové vyjadrenie nameraných kinematických parametrov

V nasledujúcich tabuľkách sú hodnoty kinematických parametrov nameraného kmitania (vibrácií) na meracích miestach 1 až 8 pri koľajovej dráhe na zemnom podloží a na estakáde (viadukte) pre maximálnu hodnotu amplitúdy zrýchlenia a efektívnu hodnotu zrýchlenia. Súčasne sú vyjadrené pomerné hodnoty namerané na viadukte a na zemnom podloží pri prejazdoch električiek z Petržalky (B) a do Petržalky (D). Maximálny pomer zrýchlenia kmitania z časového záznamu medzi viaduktom a zemným podložíom bol **viac ako 3,6-násobný**, čo znamená, že hodnota budiacej sily na vyvýšenej konštrukcii (viadukte) plánovanej pri budove SND je viac ako 3,6-násobne vyššia. **Pomer efektívnych hodnôt zrýchlenia je však viac ako 5,2-násobne vyšší na viadukte ako na zemnom podloží čo výrazne zvyšuje nepriaznivé únavové pôsobenie na budovu SND.**

**Tabuľka 4.1 – Maximálne a efektívne hodnoty zrýchlenia kmitania do 3,2 kHz.**

elektrická	rýchlosť, km/h	Max, m/s <sup>2</sup>								pomer viadukt/zem 3/1
		1	2	3	4	5	6	7	8	
B1	33,861	0,352	0,294	0,91	0,468	0,421	1,11	0,476	0,467	2,585
B2	47,500	0,78	0,613	0,984	0,601	0,981	1,48	0,58	0,487	1,262
B3	46,425	0,715	0,64	0,954	0,509	0,711	1,44	0,605	0,472	1,334
B4	46,814	0,764	0,586	0,86	0,5	0,616	1,18	0,593	0,489	1,126
B5	46,743	0,698	0,581	1,04	0,455	0,686	1,28	0,592	0,525	1,490
B6	38,118	0,463	0,423	1,01	0,468	0,477	1,16	0,492	0,389	2,181
B7	45,231	0,681	0,717	1	0,598	0,614	1,2	0,538	0,672	1,468
B8	43,444	0,52	0,581	0,843	0,508	0,457	1,18	0,517	0,399	1,621
D1	46,390	0,318	0,37	0,941	0,581	0,275	0,83	0,267	0,557	2,959
D2	44,480	0,36	0,38	1,02	0,633	0,279	0,873	0,312	0,522	2,833
D3	43,815	0,376	0,404	1,1	0,547	0,277	0,974	0,377	0,554	2,926
D4	46,778	0,34	0,413	1,23	0,595	0,317	0,86	0,343	0,562	<b>3,618</b>
D5	43,909	0,354	0,44	1,07	0,589	0,305	0,949	0,373	0,529	3,023

priemerná hodnota 2,187

elektrická	rýchlosť, km/h	RMS, m/s <sup>2</sup> (do 3,2 kHz)								pomer viadukt/zem 3/1
		1	2	3	4	5	6	7	8	
B1	33,861	0,045	0,061	0,102	0,062	0,022	0,055	0,022	0,032	2,247
B2	47,500	0,045	0,053	0,144	0,078	0,034	0,072	0,036	0,040	3,193
B3	46,425	0,101	0,115	0,072	0,039	0,037	0,082	0,039	0,045	0,709
B4	46,814	0,039	0,040	0,122	0,063	0,031	0,060	0,033	0,030	3,136
B5	46,743	0,039	0,044	0,138	0,071	0,032	0,066	0,033	0,035	<b>3,529</b>
B6	38,118	0,032	0,039	0,103	0,061	0,030	0,066	0,030	0,036	3,270
B7	45,231	0,089	0,105	0,062	0,035	0,031	0,067	0,031	0,037	0,698
B8	43,444	0,066	0,091	0,076	0,043	0,035	0,144	0,034	0,080	1,153
D1	46,390	0,030	0,042	0,157	0,084	0,022	0,135	0,027	0,085	<b>5,233</b>
D2	44,480	0,059	0,086	0,165	0,090	0,032	0,095	0,037	0,063	2,821
D3	43,815	0,057	0,083	0,094	0,050	0,047	0,097	0,058	0,063	1,658
D4	46,778	0,043	0,058	0,116	0,065	0,037	0,107	0,046	0,078	2,717
D5	43,909	0,035	0,051	0,091	0,047	0,030	0,092	0,033	0,063	2,631

priemerná hodnota 2,538

V tabuľke 4.2 sú kinematické parametre nameraného kmitania pre meracie miesta 1 až 8 pri koľajovej dráhe na zemnom podloží a na viadukte pre efektívne hodnoty zrýchlenia a rýchlosti kmitania a frekvenčný rozsah od 1 Hz do 80 Hz v zmysle normy ISO 4866 [23]. Súčasne je vyjadrený pomer hodnôt nameraných na viadukte a na zemnom podloží pri prejazdoch električiek z Petržalky (B) a do Petržalky (D). Maximálny pomer zrýchlenia kmitania medzi viaduktom a zemným podložíom bol viac ako 5,6-násobný, čo znamená, že hodnota efektívnej budiacej sily na vyvýšenej konštrukcii (viadukte) pre oblasť nízkych frekvencií (do 80 Hz) je viac ako 5,6-násobne vyššia, ktorá urýchli únavové starnutie budovy SND. Toto dynamické budenie zvýši aj generovanie nežiaduceho dunivého hluku vo veľkoplošných kultúrnych priestoroch SND.

**Tabuľka 4.2 – Efektívne hodnoty zrýchlenia a rýchlosti kmitania do 80 Hz.**

elek-trička	rýchlosť, km/h	1-80Hz, m/s <sup>2</sup>								pomer viadukt/zem
		1	2	3	4	5	6	7	8	3/1
B1	33,861	0,034	0,028	0,041	0,018	0,015	0,028	0,010	0,013	1,206
B2	47,500	0,030	0,028	0,073	0,026	0,021	0,046	0,015	0,019	2,401
B3	46,425	0,067	0,057	0,034	0,012	0,022	0,046	0,016	0,018	0,507
B4	46,814	0,071	0,020	0,031	0,039	0,025	0,028	0,021	0,019	0,442
B5	46,743	0,027	0,025	0,075	0,025	0,020	0,045	0,014	0,018	2,778
B6	38,118	0,025	0,022	0,048	0,021	0,025	0,043	0,019	0,017	1,920
B7	45,231	0,063	0,050	0,025	0,009	0,017	0,038	0,012	0,015	0,397
B8	43,444	0,047	0,042	0,039	0,016	0,029	0,083	0,021	0,035	0,828
D1	46,390	0,016	0,018	0,091	0,035	0,012	0,088	0,018	0,045	<b>5,688</b>
D2	44,480	0,036	0,035	0,088	0,036	0,016	0,058	0,025	0,031	2,468
D3	43,815	0,041	0,035	0,066	0,023	0,030	0,071	0,047	0,038	1,599
D4	46,778	0,024	0,023	0,069	0,025	0,017	0,063	0,029	0,040	2,944
D5	43,909	0,022	0,021	0,062	0,022	0,018	0,062	0,021	0,037	2,787

priemerná hodnota 1,997

elek-trička	rýchlosť, km/h	1-80Hz, mm/s								pomer viadukt/zem
		1	2	3	4	5	6	7	8	3/1
B1	33,861	0,115	0,171	0,272	0,236	0,184	0,152	0,245	0,078	2,365
B2	47,500	0,080	0,167	0,256	0,251	0,230	0,192	0,241	0,098	3,200
B3	46,425	0,171	0,205	0,209	0,458	0,240	0,176	0,224	0,096	1,222
B4	46,814	0,071	0,204	0,314	0,393	0,247	0,210	0,280	0,096	4,423
B5	46,743	0,069	0,232	0,266	0,192	0,298	0,195	0,253	0,102	3,855
B6	38,118	0,087	0,218	0,354	0,399	0,219	0,242	0,210	0,104	4,069
B7	45,231	0,157	0,209	0,266	0,553	0,318	0,236	0,261	0,081	1,694
B8	43,444	0,129	0,148	0,218	0,288	0,211	0,321	0,237	0,149	1,690
D1	46,390	0,044	0,179	0,272	0,219	0,190	0,256	0,188	0,133	<b>6,177</b>
D2	44,480	0,094	0,144	0,279	0,357	0,216	0,217	0,223	0,113	2,968
D3	43,815	0,113	0,164	0,242	0,476	0,170	0,205	0,213	0,135	2,141
D4	46,778	0,092	0,154	0,273	0,337	0,214	0,285	0,216	0,136	2,963
D5	43,909	0,058	0,147	0,239	0,211	0,157	0,183	0,231	0,119	4,128

priemerná hodnota 3,146

V tabuľke 4.3 sú kinematické parametre nameraného kmitania pre meracie miesta 1 až 8 pri koľajovej dráhe na zemnom podloží a na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde) pre efektívne hodnoty zrýchlenia a rýchlosti kmitania a frekvenčný rozsah od 1 Hz do 35 Hz reprezentujúci technickú seizmicitu. Súčasne je vyjadrený pomer hodnôt nameraných na viadukte a na zemnom podloží pri prejazdoch električiek z Petržalky (B) a do Petržalky (D). Veľmi výrazný je pomer efektívnych rýchlostí kmitania v oblasti technickej seizmicity, ktorý je **viac než 10-násobne vyšší na viadukte ako na zemnom podloží. Treba zdôrazniť, že kvadrát rýchlosti kmitania je súčasťou kinetickej energie, ktorá vykonáva nežiaducu prácu na budovách v blízkosti prejazdov koľajových vozidiel a to sa týka aj budovy SND. Toto dynamické buďenie zvýši aj generovanie nežiaduceho dunivého hluku vo veľkoplošných kultúrnych priestoroch SND.**

**Tabuľka 4.3 – Efektívne hodnoty zrýchlenia a rýchlosti kmitania do 35 Hz.**

električka	rýchlosť, km/h	1-35Hz, m/s <sup>2</sup>								pomer viadukt/zem
		1	2	3	4	5	6	7	8	3/1
B1	33,861	0,009	0,004	0,015	0,005	0,002	0,004	0,003	0,004	1,667
B2	47,500	0,004	0,002	0,011	0,004	0,002	0,003	0,003	0,003	3,143
B3	46,425	0,008	0,004	0,005	0,005	0,002	0,003	0,002	0,004	0,619
B4	46,814	0,003	0,002	0,008	0,004	0,002	0,003	0,003	0,002	2,375
B5	46,743	0,003	0,003	0,009	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	3,000
B6	38,118	0,005	0,003	0,007	0,004	0,003	0,004	0,003	0,004	1,400
B7	45,231	0,008	0,004	0,004	0,005	0,003	0,003	0,003	0,002	0,513
B8	43,444	0,008	0,004	0,006	0,003	0,002	0,011	0,003	0,006	0,691
D1	46,390	0,003	0,002	0,010	0,005	0,002	0,005	0,002	0,008	<b>3,678</b>
D2	44,480	0,006	0,003	0,013	0,010	0,002	0,003	0,003	0,005	2,137
D3	43,815	0,005	0,003	0,006	0,005	0,003	0,004	0,004	0,007	1,136
D4	46,778	0,005	0,003	0,007	0,005	0,002	0,004	0,003	0,006	1,455
D5	43,909	0,004	0,002	0,007	0,004	0,002	0,004	0,003	0,007	1,929
priemerná hodnota										1,826

električka	rýchlosť, km/h	1-35Hz, mm/s								pomer viadukt/zem
		1	2	3	4	5	6	7	8	3/1
B1	33,861	0,060	0,156	0,250	0,230	0,179	0,136	0,244	0,071	4,167
B2	47,500	0,027	0,155	0,177	0,242	0,224	0,160	0,238	0,085	6,556
B3	46,425	0,049	0,160	0,192	0,458	0,234	0,141	0,221	0,084	3,918
B4	46,814	0,027	0,197	0,274	0,391	0,243	0,191	0,278	0,083	<b>10,148</b>
B5	46,743	0,021	0,225	0,187	0,180	0,294	0,166	0,250	0,092	8,905
B6	38,118	0,059	0,212	0,333	0,395	0,211	0,221	0,205	0,095	5,644
B7	45,231	0,043	0,178	0,259	0,553	0,316	0,221	0,260	0,073	6,023
B8	43,444	0,047	0,113	0,196	0,285	0,200	0,2598	0,233	0,123	4,170
D1	46,390	0,017	0,174	0,147	0,193	0,186	0,161	0,184	0,075	8,802
D2	44,480	0,037	0,120	0,164	0,340	0,212	0,172	0,215	0,084	4,374
D3	43,815	0,057	0,143	0,182	0,475	0,156	0,131	0,187	0,102	3,216
D4	46,778	0,069	0,144	0,199	0,328	0,210	0,245	0,205	0,102	2,893
D5	43,909	0,023	0,139	0,188	0,201	0,152	0,118	0,226	0,084	8,348
priemerná hodnota										5,936

V tabuľke 4.4 sú kinematické parametre nameraného kmitania pre meracie miesta  $x, y, z$  v mieste kotvenia podperných stĺpov viaduktu a referenčný merací bod pri koľajovej dráhe na viadukte pre maximálne a efektívne hodnoty zrýchlenia a rýchlosti kmitania a uvedené frekvenčné rozsahy. Z uvedených hodnôt možno vidieť pokles hodnôt parametrov kmitania nameraných na ukotvení podperných stĺpov oproti hodnotám nameraných na viadukte pri prejazdoch električiek z Petržalky (B) a do Petržalky (D).

**Tabuľka 4.4 – Hodnoty prenosového útlmu parametrov kmitania.**

	Max, m/s <sup>2</sup>				RMS, m/s <sup>2</sup>			
	$x$	$y$	$z$	R	$x$	$y$	$z$	R
SB1	0,117	0,434	0,183	1,250	0,014	0,041	0,020	0,097
SB2	0,126	0,350	0,193	1,060	0,021	0,061	0,030	0,154
SB3	0,134	0,396	0,208	1,220	0,025	0,067	0,034	0,166
SB4	0,107	0,404	0,114	0,619	0,020	0,048	0,019	0,097
SB5	0,199	0,400	0,204	1,210	0,025	0,065	0,034	0,166
SD1	0,114	0,403	0,111	0,627	0,018	0,045	0,018	0,098
SD2	0,106	0,402	0,102	0,663	0,016	0,040	0,016	0,088
SD3	0,131	0,398	0,106	0,795	0,017	0,041	0,018	0,103

	1-80Hz , m/s <sup>2</sup>				1-80Hz , mm/s			
	$x$	$y$	$z$	R	$x$	$y$	$z$	R
SB1	0,006	0,035	0,013	0,052	0,168	0,189	0,034	0,262
SB2	0,009	0,059	0,021	0,089	0,108	0,174	0,056	0,274
SB3	0,012	0,062	0,024	0,089	0,127	0,214	0,060	0,321
SB4	0,009	0,025	0,011	0,047	0,254	0,098	0,033	0,159
SB5	0,012	0,054	0,023	0,091	0,164	0,211	0,063	0,370
SD1	0,010	0,030	0,012	0,017	0,132	0,190	0,036	0,249
SD2	0,009	0,027	0,012	0,043	0,131	0,104	0,032	0,198
SD3	0,008	0,024	0,011	0,052	0,136	0,178	0,030	0,302

	1-35Hz , m/s <sup>2</sup>				1-35Hz , mm/s			
	$x$	$y$	$z$	R	$x$	$y$	$z$	R
SB1	0,001	0,002	0,001	0,004	0,167	0,172	0,001	0,230
SB2	0,001	0,003	0,002	0,006	0,107	0,114	0,020	0,165
SB3	0,001	0,004	0,002	0,007	0,124	0,162	0,021	0,241
SB4	0,002	0,002	0,002	0,004	0,253	0,077	0,014	0,101
SB5	0,002	0,003	0,002	0,007	0,162	0,170	0,031	0,296
SD1	0,001	0,003	0,002	0,004	0,130	0,176	0,016	0,220
SD2	0,001	0,003	0,002	0,004	0,130	0,081	0,013	0,166
SD3	0,001	0,002	0,002	0,006	0,135	0,168	0,013	0,275

Záverom možno konštatovať, že porovnaním časových priebehov dynamického namáhania od prejazdov električiek vidno výrazné rozdiely vo veľkosti amplitúd a ich časového rozloženia.

**Výrazné časové dynamické namáhanie vyvýšenej stavebnej konštrukcie (estakády, viaduktu) prostredníctvom maximálnej hodnoty zrýchlenia a efektívnej hodnoty zrýchlenia je podľa získaných výsledkov nielen v tomto projekte, ale aj dosiaľ realizovaných projektoch jedným z ukazovateľov rýchlejšieho únavového poškodenia budovy SND potenciálnym zdrojom, a to prejazdom koľajových vozidiel popred budovu SND.**

**Vychádzajúc zo zhody vlastných frekvencií vlastných tvarov nosných stavebných konštrukcií ohraničujúcich prostredie čínoherných sál a opernej sály s vybudenými frekvenciami prejazdom električiek (pozri článok 5.4) vygeneruje akustické nízkofrekvenčné vlnenie, ktoré môže ovplyvniť akustické prostredie v týchto sálach [21].**

## 5 Frekvenčná analýza od budenia prejazdom električiek na vyvýšenej stavebnej konštrukcii

### 5.1 Prenosový útlm

Energia kmitania generovaná kinematickým budením valiaceho sa kolesa po koľajnici sa šíri a prenáša uložením koľajovej dráhy do okolia. Vzďialenosť šírenia sa vibro-akustickej vlny je závislá od vybudenej frekvencie. So znižovaním sa frekvencie budenia sa zvyšuje vzdialenosť šírenia sa vlnenia. Pri šírení energie kmitania reálnymi konštrukciami dochádza na diskontinuitách (miesta zmeny materiálu, jeho homogenity, prierezu, spojov) k znižovaniu jej energetickej (výkonovej) hodnoty, a to v závislosti od frekvencie. So zvyšovaním frekvencie sa zvyšuje aj prenosový útlm, no pri nízkych frekvenciách je zanedbateľný. Keďže zdrojom kmitania je sila  $F$  generovaná kinematickým budením, spektrálnu hustotu výkonového toku možno za určitých podmienok vyjadriť takto

$$P(\omega) = \frac{|F|^2}{2m\omega_0} \frac{\alpha}{\left|1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0} \alpha\right|^2} \quad (5.1)$$

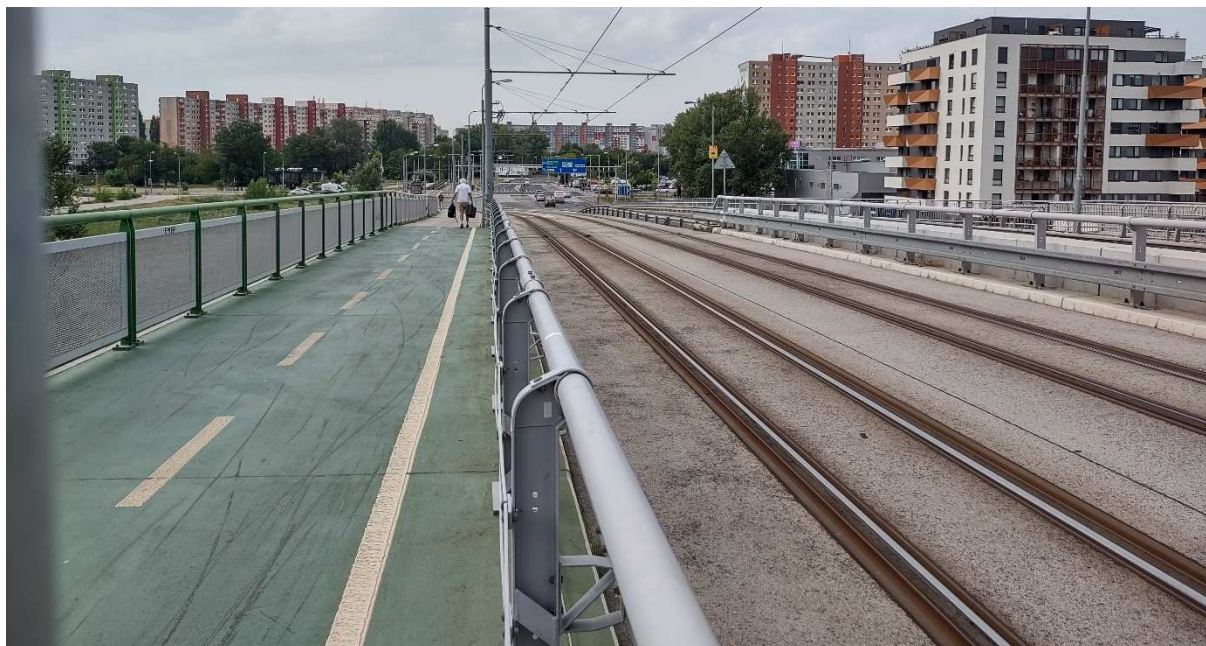
kde  $m$  je hmotnosť zdroja (kg);  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  – vlastná frekvencia sústavy pružne spojenej s konštrukciou (rad/s);  $k$  – tuhosť diskontinuity (napr. pružného elementu) (N/m) a jednotlivých komponentov vozňa;  $j$  – komplexná jednotka;  $\alpha = m\omega_0\beta$ , kde  $|\beta| = A\omega^s$  je modul veľkosti a fázy mobility sústavy,  $A$  je kladná konštanta a exponent  $s$  je reálna konštanta, ktorá sa môže približne určiť zo sklonu spektra mobility znázornenej v logaritmickej mierke alebo sa môže vypočítať [1].

Primárny a budiaci zdroj generovania vibro-akustickej energie podložia koľajovej dráhy je pri interakcii valenia kolesa po koľajnici. Intenzita generovania vibro-akustickej energie je závislá od drsnosti kontaktných plôch a nepravidelnosti tvaru koľajníc a jazdných profilov kolies, čo spôsobuje kinematické budenie podložia koľajovej dráhy, od zaťaženia, resp. kontaktného tlaku (Hertzove tlaky), rýchlosti vozňa, ale aj od polomeru zákruty, či sklonu trate a bočného zaťaženia dolnej časti okolesníka s koľajnicou pri náhodnom priečnom pohybe vozidla, priečnom sklone koľajníc a v zatáčke pri prevažujúcej odstredivej sile nad horizontálnou zložkou tiažovej sily alebo naopak [3, 4].

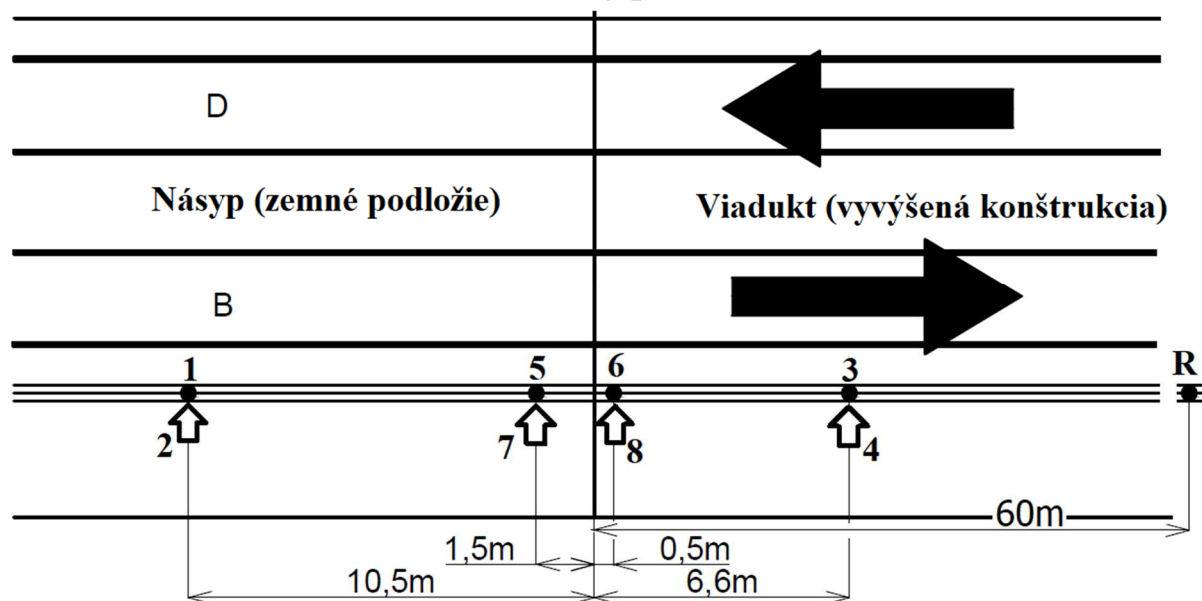
### 5.2 Frekvenčná analýza kmitania pri koľajovej trati uloženej na zemnom podloží a vyvýšenej stavebnej konštrukcii

Analýza frekvenčnej ozvy v blízkosti koľajovej trate sa vykonala v smere vertikálnom a v smere horizontálnom kolmo na koľajnice v meracích bodoch podľa obrázku 5.1. Meracie body 1, 2 a 3, 4 sú vybraté približne symetricky vzhľadom na dilatčný komponent oddelujúci koľajovú dráhu uloženú na zemi a koľajovú dráhu uloženú na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (meracie body 3, 4). Cieľ týchto meraní bol ukázať rozdielnosť dynamického budenia okolitého prostredia pri prejazde koľajového vozidla po klasickom zemnom podloží trate a pri uložení koľajovej trate na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte).



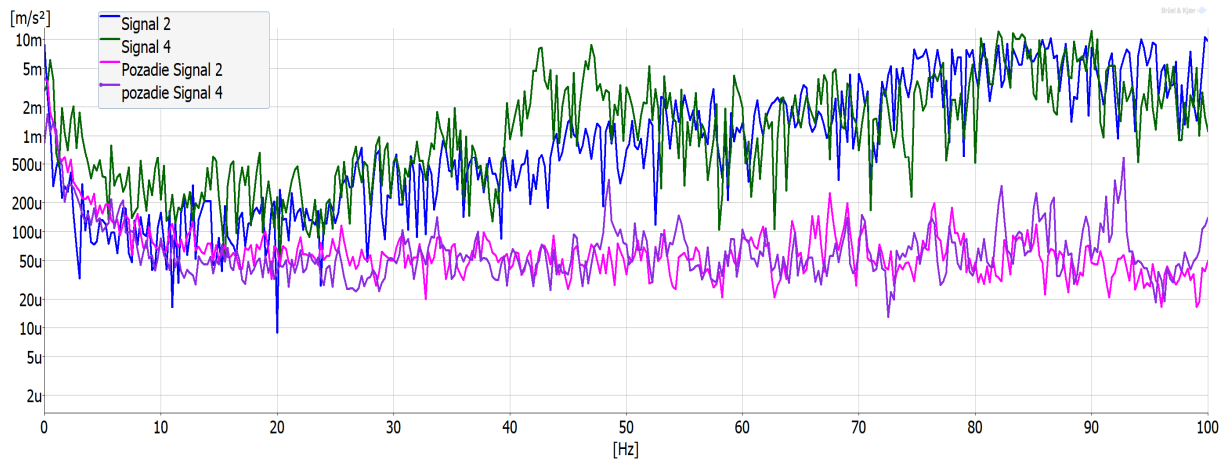
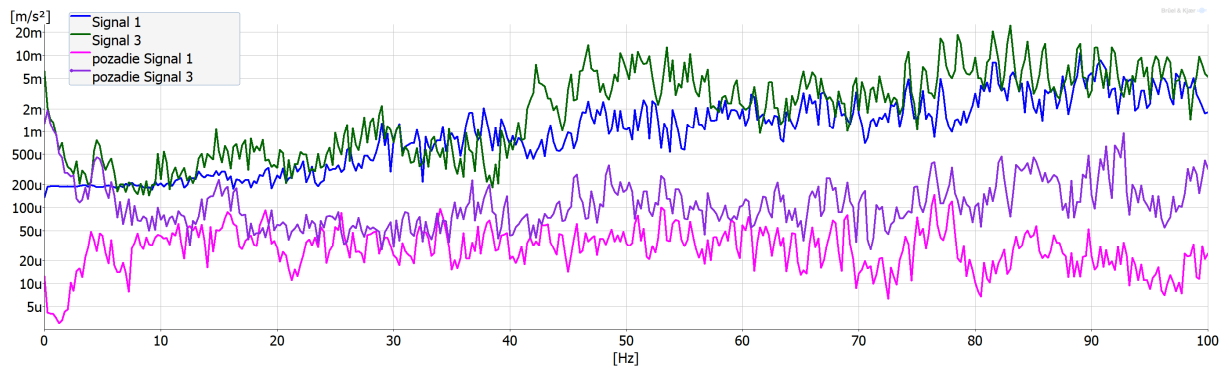


**Dilatačný prvok**

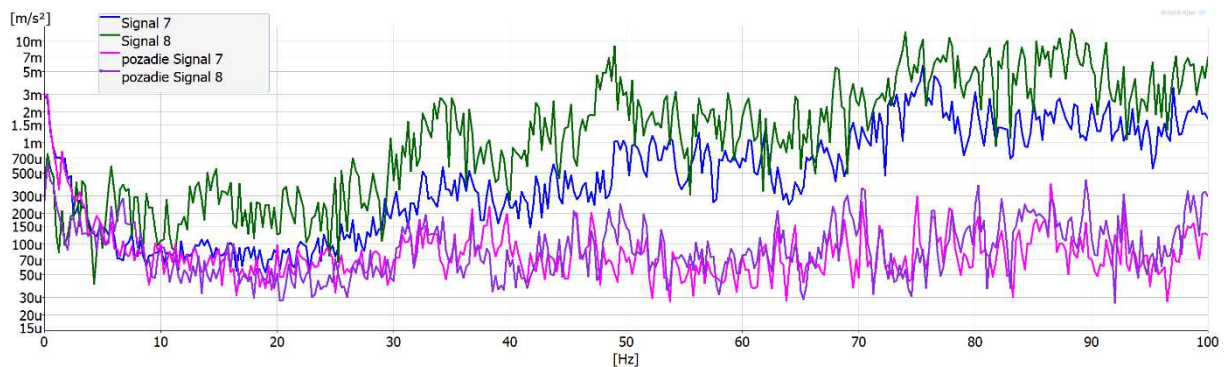
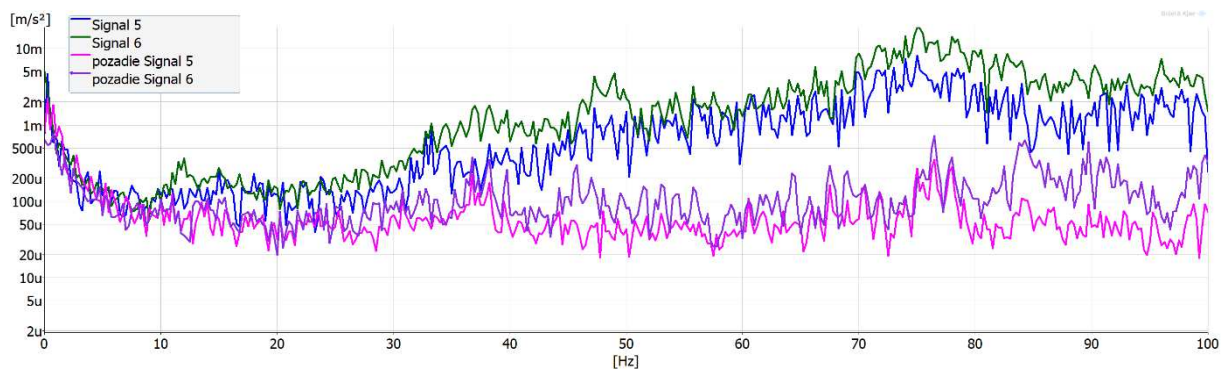


**Obrázok 5.1 – Meracie miesta v blízkosti uloženia koľajovej dráhy.**

Z frekvenčnej analýzy je vidieť, že frekvenčné spektrá obsahujú výrazné amplitúdy v oblasti nízkych frekvencií (technickej seizmicity), a to od 1 Hz do 35 Hz (Obr. 5.2 a 5.3). Najviac poškodení budov zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka sa vyskytuje vo frekvenčnom rozsahu od 1 Hz do 150 Hz [23]. Táto frekvenčná oblasť, v rozsahu do 100 Hz, sa v ďalšej časti správy porovnáva s amplitúdami frekvenčných spektier získaných modálnou analýzou, teda vlastnými frekvenciami nosných konštrukcií ohraničujúcich číhorne sály a opernú sálu.



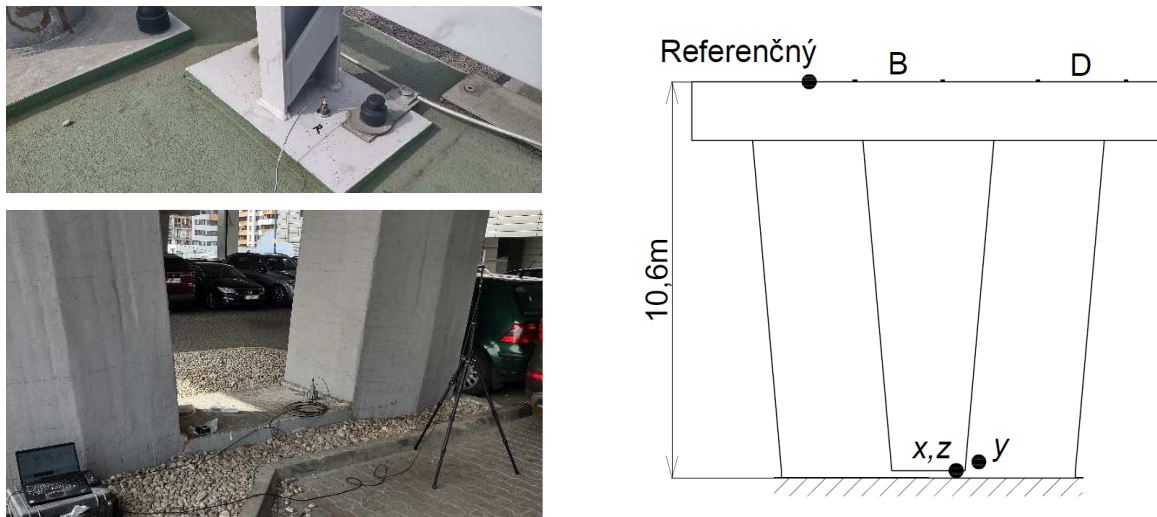
**Obrázok 5.2 – Frekvenčná FFT analýza kmitania koľajovej trate uloženej na zemnom podloží (modrá) a na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (zelená) vo vertikálnom smere (hore) a v horizontálnom smere (dole).**



**Obrázok 5.3 – Frekvenčná analýza kmitania koľajovej trate uloženej na zemnom podloží (modrá) a na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (zelená) vo vertikálnom smere (hore) a v horizontálnom smere (dole) v tesnej blízkosti dilatačného prvku.**

### 5.3 Frekvenčná analýza prenosu kmitania od koľajovej dráhy do uloženie podperných konštrukcií

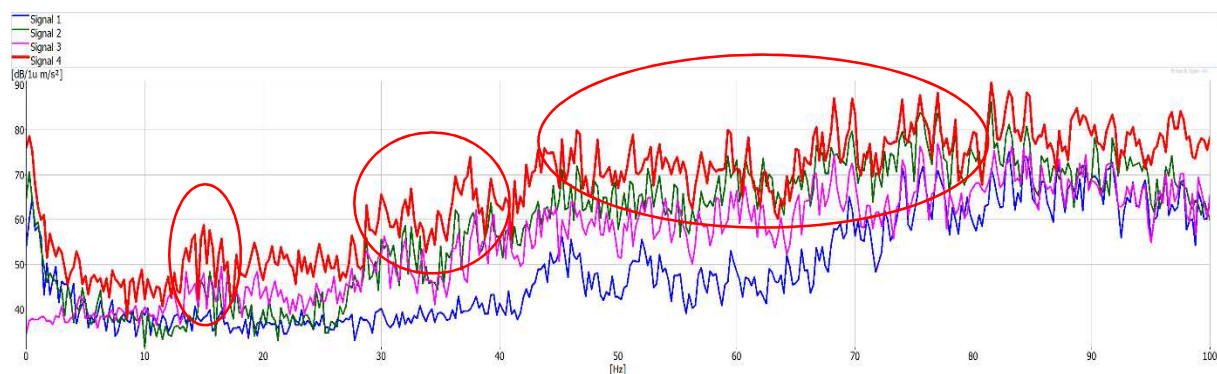
Analýza frekvenčnej ozvy v blízkosti ukotvenia podperných stĺpov vyvýšenej stavebnej konštrukcie (estakády, viaduktu) sa vykonala v smere vertikálnom a v horizontálnej rovine v dvoch na seba kolmých smerov v meracích bodoch podľa obrázku 5.4. Cieľ týchto meraní bol potvrdiť prenos vibroakustickej energie pri prejazde koľajového vozidla do okolitého prostredia stavebnými konštrukciami aj pri uložení koľajovej trate na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte).



**Obrázok 5.4 – Referenčné meracie miesto (hore) a meracie miesta v mieste ukotvenia podperných konštrukcií (dole).**

Frekvenčný prenos vibroakustickej energie z referenčného bodu (meracieho miesta), teda bodu v blízkosti koľajovej trate cez podperné stĺpy do miesta ich ukotvenia je na obrázku 5.5.

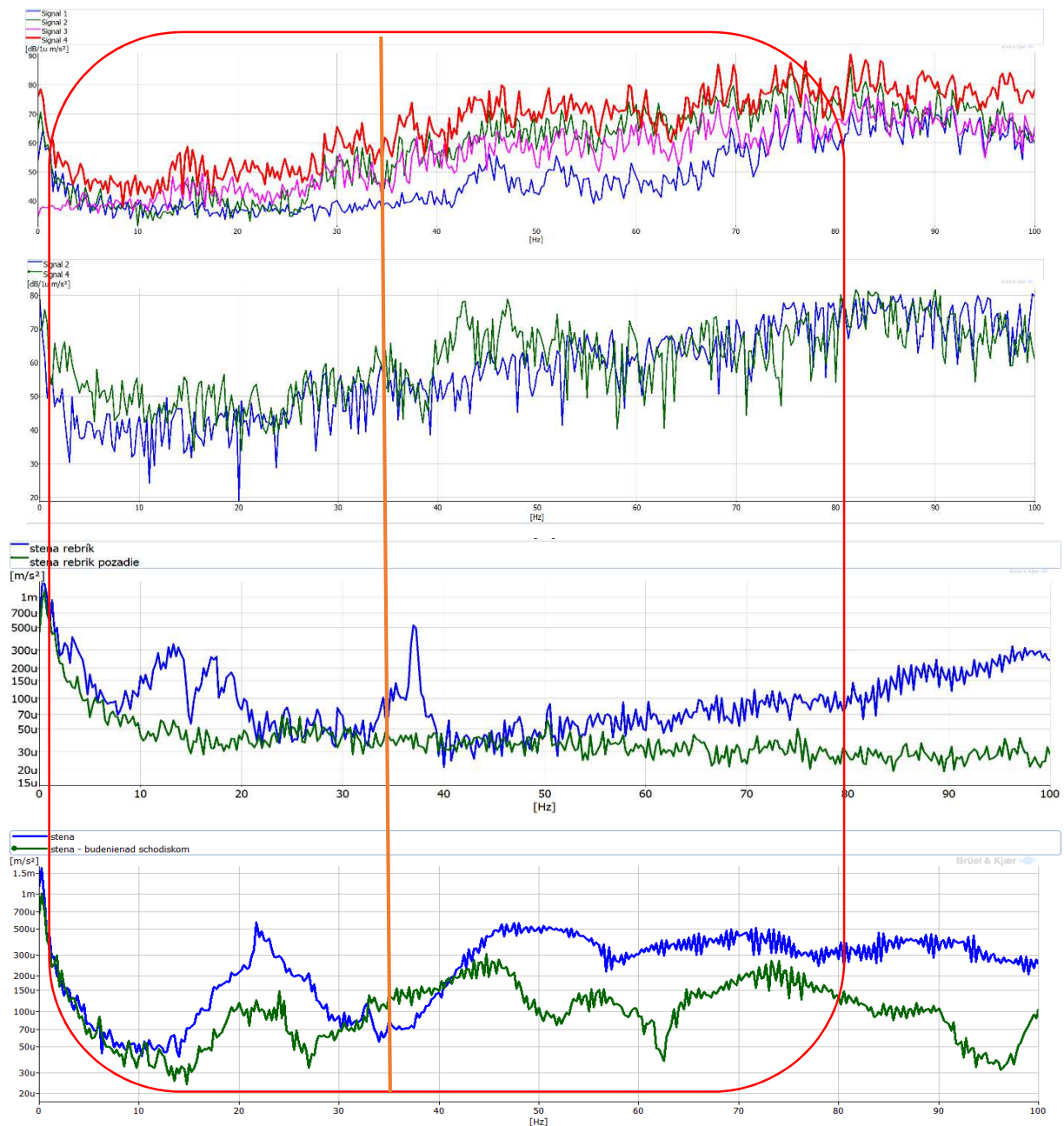
Z frekvenčnej analýzy je vidieť, že frekvenčné spektrá obsahujú výrazné amplitúdy v oblasti nízkych frekvencií (technickej seizmicity), a to od 1 Hz do 35 Hz (Obr. 5.5). Najviac poškodení budovy zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka sa vyskytuje vo frekvenčnom rozsahu od 1 Hz do 150 Hz [23]. Táto frekvenčná oblasť, v rozsahu do 100 Hz, sa v ďalšej časti správy porovnáva s amplitúdami frekvenčných spektier generovanými na podobnom uložení koľajovej trate ako sa plánuje pred budovou SND, teda s frekvenčnými spektrami získanými z meraní na vyvýšenej konštrukcii (viadukte) v Petržalke.



**Obrázok 5.5 – Frekvenčná FFT analýza kmitania viaduktu a jej podpernej konštrukcie.**

## 5.4 Porovnanie frekvenčných spektier kmitania s modálnou analýzou.

Frekvenčná analýza na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte) ukázala generovanie výraznejších amplitúd nízko-frekvenčného kmitania až do 80 Hz (Obr. 5.2, 5.3 a 5.5). Ide predovšetkým o nízko-frekvenčné tónové frekvencie približne od 5 Hz do 80 Hz. Tieto frekvencie pri prenose do budovy SND môžu v tomto priestore vybudíť vlastné frekvencie (rezonanciu) meraných stavebných konštrukcií a prostredníctvom stojateho vlnenia, alebo čiastočne stojateho vlnenia, vybudíť dunivý a obťažujúci hluk [21]. Maximálne hodnoty hladín akustického tlaku sa dosahujú predovšetkým v mieste ohraničenia miestnosti.



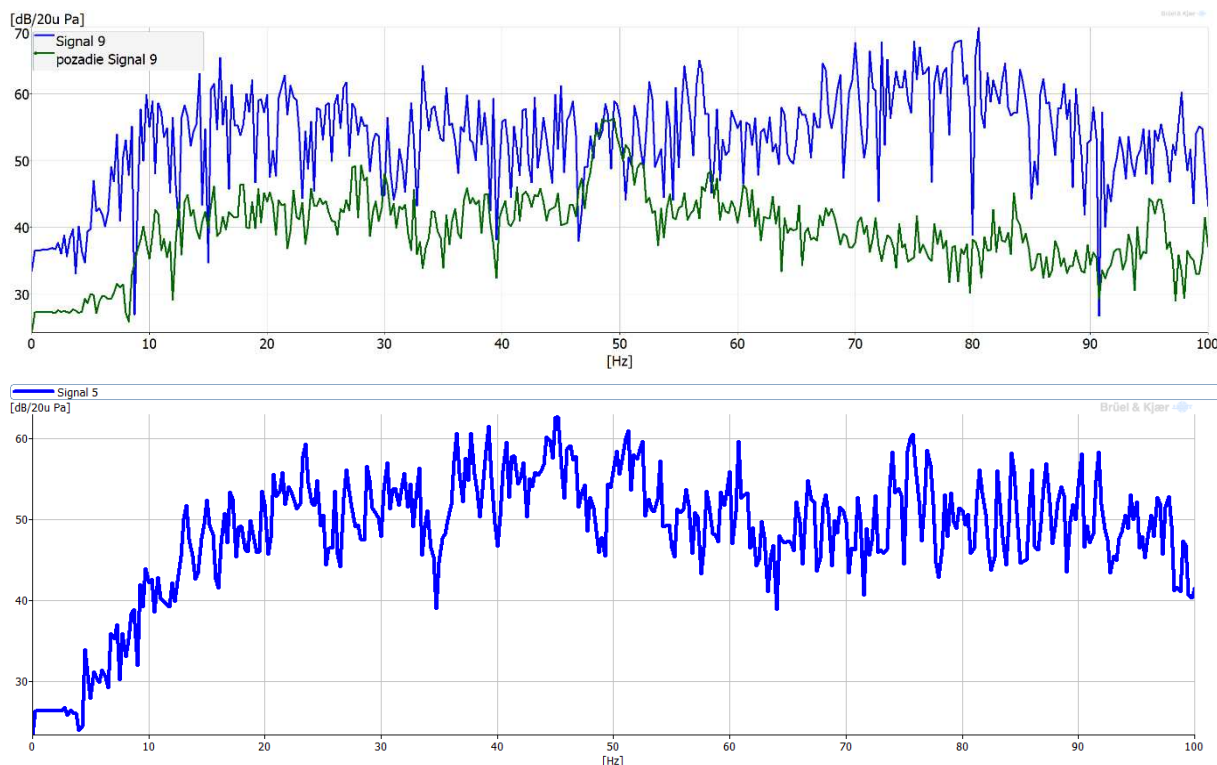
**Obrázok 5.6 – Porovnanie frekvenčnej analýzy kmitania na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (horné dve spektrá) s modálnou analýzou stavebných konštrukcií budovy SND (dolné dve spektrá).**

Ako sa už konštatovalo útlm seizmického vlnenia (do 35 Hz) šíriaceho sa od zdroja prostredím je zanedbateľný. Z Obr. 5.6 je vidieť vybudenie frekvencií seizmického vlnenia prejazdom električky, kde sa nájde zhoda s vlastnými frekvenciami stavebných konštrukcií získaných modálnou analýzou. Je teda pravdepodobné, že prejazd koľajového vozidla vybudí kmitania stavebných konštrukcií budovy SND a tým aj nízko-frekvenčné akustické vlnenie v uzatvorených veľkoprošných miestnostiach.

Modálnou analýzou sa zistili vlastné frekvencie vlastných tvarov kmitania pre vytvorené ohraničujúce stavebné konštrukcie veľkoprošných sál. Vlastné frekvencie vlastných tvarov stavebných konštrukcií pri budení prejazdom koľajového vozidla môžu spôsobiť rezonančný stav kmitania tejto konštrukcie. Rezonancia v danom prípade znamená výrazné zvýšenie amplitúdy kmitania konštrukcie a tým aj zvýšenie vibroakustickej energie, ktorá sa stavebnou konštrukciou prenáša do akusticky chránených priestorov. V takomto prípade ide o generovanie tónovej amplitúdy hluku, ktorá pri zhode rozmerov vlnovej dĺžky (alebo jej polovičnej hodnoty) tejto tónovej amplitúdy s charakteristickým rozmerom akusticky chráneného priestoru vybudí stojaté alebo čiastočné stojaté vlnenie počujúce ako dunivý hluk. Pri tomto vlnení sa hladina akustického tlaku poznaťne zvýši.

## 5.5 Porovnanie frekvenčných spektier zvuku pri koľajovej trati a pod vyvýšenou stavebnou konštrukciou

Pri akustických meraniach sa použil filter Z, teda sa prostredníctvom akustického tlaku merala skutočná akustická energia generovaná prejazdom električky. Z frekvenčných spektier vyplýva, že električka generuje širokopásmový hluk s výraznými amplitúdami v oblasti nízkych frekvencií, čo sa vo väčšej vzdialenosti prejavuje ako dunivý obťažujúci hluk, ktorý v uzavretých priestoroch odrazmi zvyšuje svoju intenzitu [18, 19, 21]. Frekvenčné spektrum hluku odráža frekvenčné rozloženie generovaného kmitania nameraného v priestore vyvýšenej stavebnej konštrukcie (estakády, viaduktu).



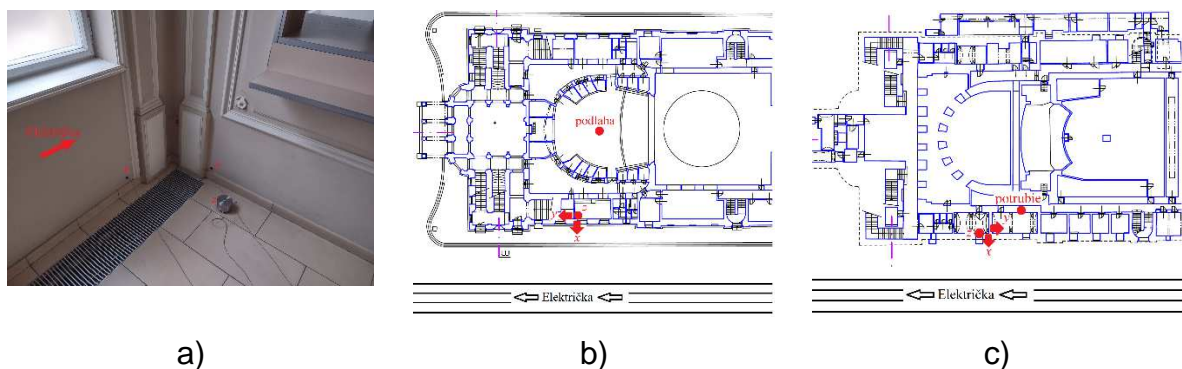
**Obrázok 5.7 – Porovnanie spektier hluku meranom na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (hore) a pod ňou (dole).**

**Z vykonanej dynamickej analýzy vyplýva, že analyzovaná vyvýšená stavebná konštrukcia (estakáda, viadukt) vykazuje nežiaduce dynamické zaťaženie na okolité stavebné konštrukcie a tým aj na blízke akusticky chránené priestory z hľadiska generovania nízkofrekvenčného hluku (dunivého hluku).**

Frekvencie seizmického vlnenia sa namerali aj pri prejazde koľajových vozidiel popri historickej budove SND a budove Slovenskej filharmónii čo je experimentálne dokumentované v nasledujúcich dvoch kapitolách.

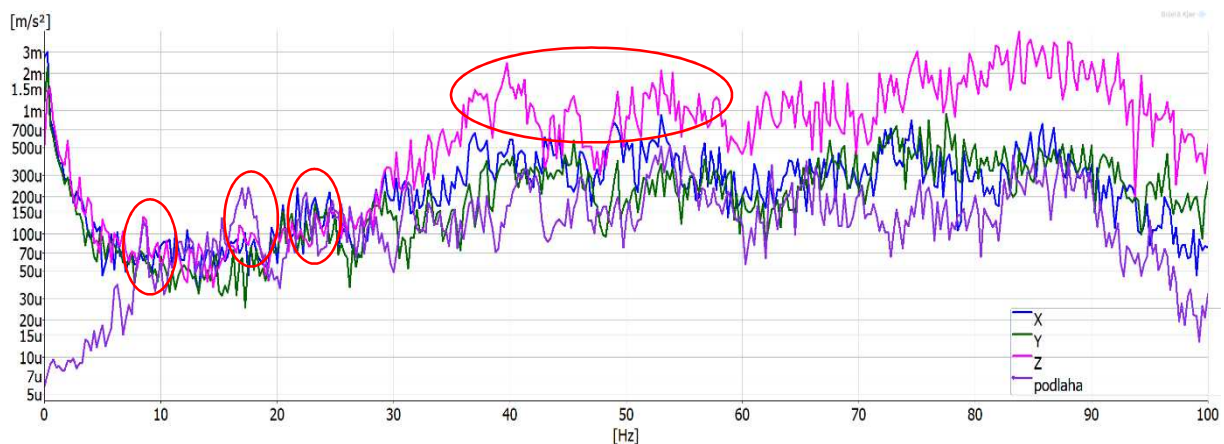
## 6 Frekvenčná analýza v historickej budove SND od budenia prejazdom električiek

Analýza frekvenčnej ozvy v historickej budove SND sa vykonala v blízkosti koľajovej trate v smere vertikálnom a v dvoch smeroch v horizontálnej rovine, a to kolmo na koľajnice a rovnobežne s koľajnicami v meracích bodoch podľa obrázku 6.1. Meracie body  $x, y, z$  sú stanovené v zmysle požiadavky normy ISO 4866 [23]. Cieľ týchto meraní bol zistiť frekvenčné rozloženie dynamického namáhania stavebných konštrukcií historickej budovy SND od budenia pri prejazde koľajového vozidla po klasickom uložení koľajovej dráhy, teda na zemnom podloží. Meracie miesta sa situovali na prízemí v blízkosti koľajovej trate a približne v strede hľadiska (Obr. 6.1a,b) a v suteréne, kde sa snímalo aj dynamické namáhanie (kmitanie) technologickej konštrukcie (potrubia) (Obr. 6.1c).

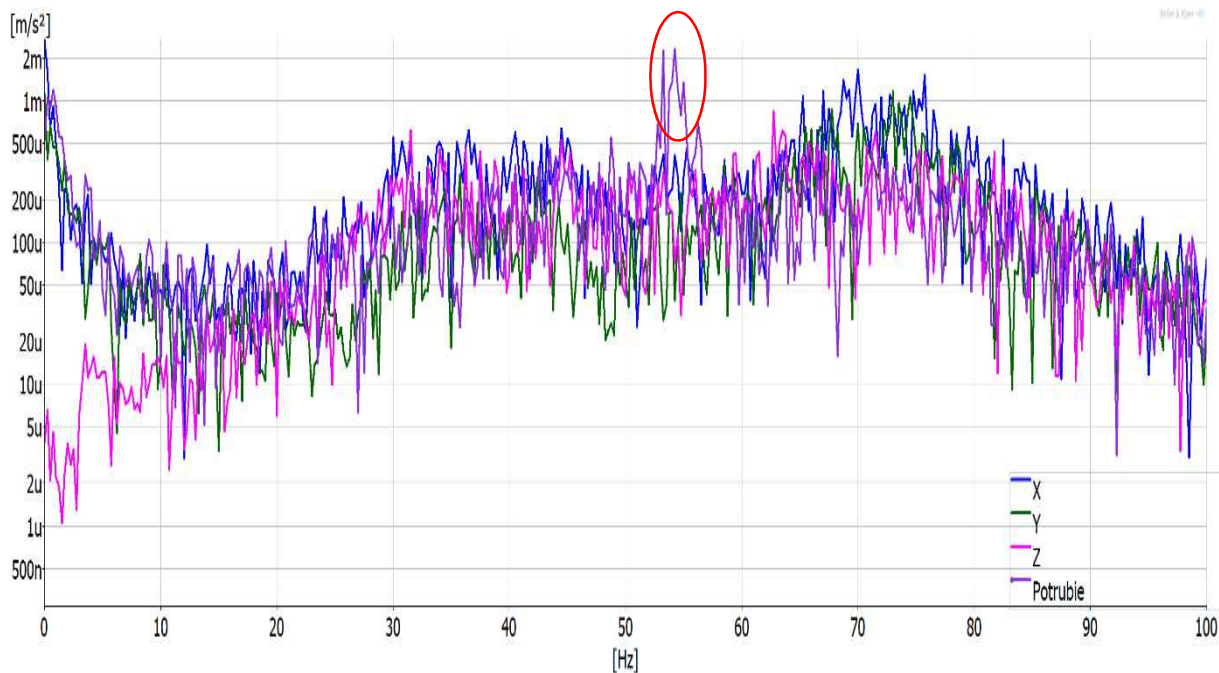


Obrázok 6.1 – Meracie miesta v historickej budove SND.

Z analýzy frekvenčnej ozvy v historickej budove SND je vidieť vybudenie vlastných frekvencií stavebných konštrukcií vo frekvenčnej oblasti technickej seizmicity (Obr. 6.2 a 6.3). Časté vybudenie vlastných frekvencií stavebných a technologických konštrukcií nežiaduco prispieva k znižovaniu ich stability a k skracovaniu ich životnosti. Treba pripomenúť, že najviac poškodení budovy zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka sa vyskytujú vo frekvenčnom rozsahu od 1 Hz do 150 Hz [23]. **Frekvenčné spektrá ozvy nosných stavebných konštrukcií historickej budovy SND vybudené prejazdom električiek naznačujú nežiaduce únavové namáhanie budovy v oblasti uvedeného frekvenčného rozsahu (oblasť nízkych frekvencií), ktoré spôsobujú trvalé únavové poškodenie budovy.**

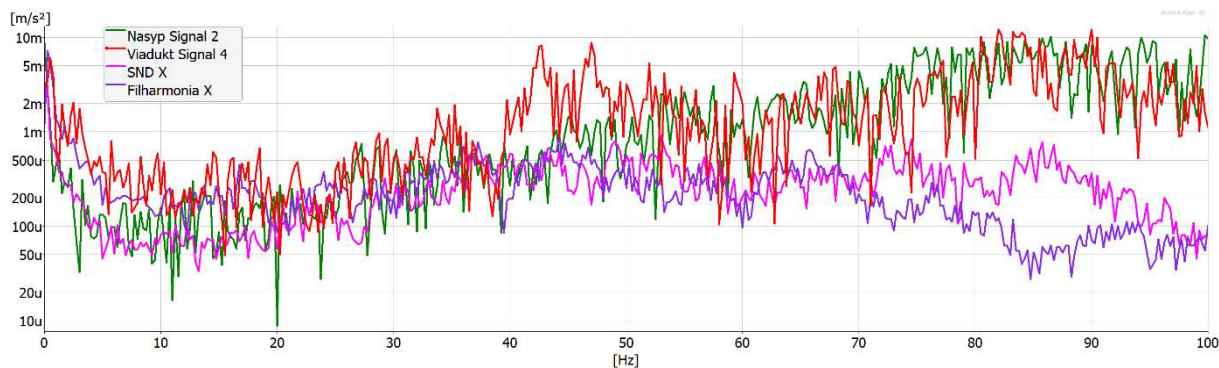
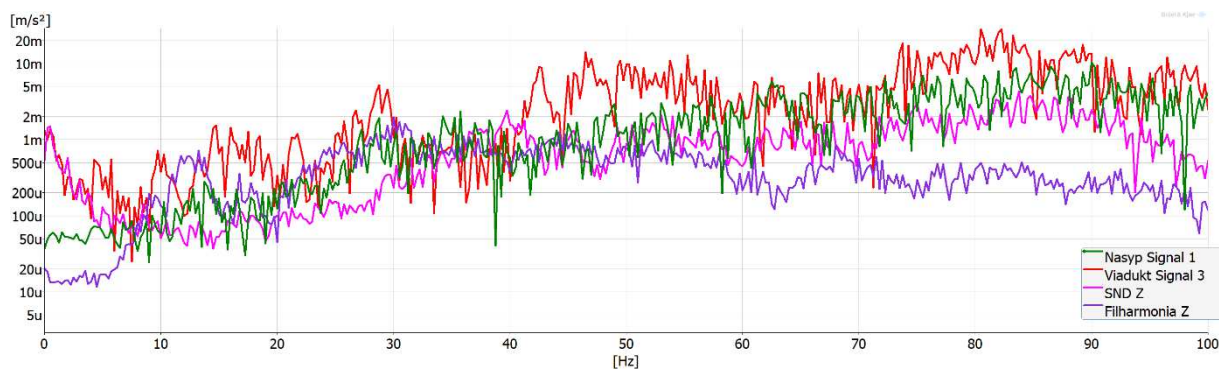


Obrázok 6.2 – Frekvenčná ozva kmitania vybraných nosných stavebných konštrukcií od prejazdu električiek (prízemie).



**Obrázok 6.3 – Frekvenčná ozva kmitania vybraných nosných stavebných a technologických konštrukcií od prejazdu električiek (suterén).**

Z porovnania frekvenčných spektier získaných meraním na zemnom podloží a vyvýšenej stavebnej konštrukcii v Petržalke, v historickej budove SND a v budove SF je vidieť, že električky bez ohľadu na typ pri prejazde generujú dynamické namáhanie nielen v oblasti technickej seizmicity, ale aj pri vyšších frekvenciách do 80 Hz (Obr. 6.4).

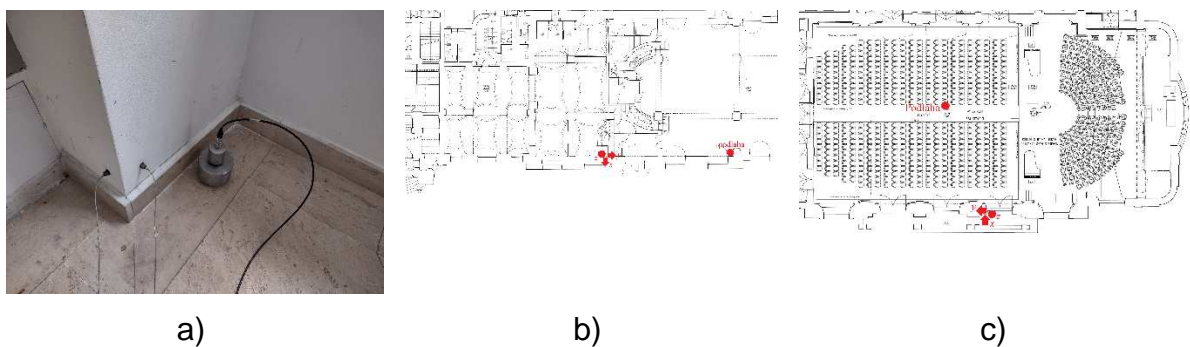


**Obrázok 6.4 – Frekvenčná ozva kmitania na vyvýšenej stavebnej konštrukcii a v historickej budove SND a budove SF v smere vertikálnom (hore) a v smere horizontálnom (dole).**



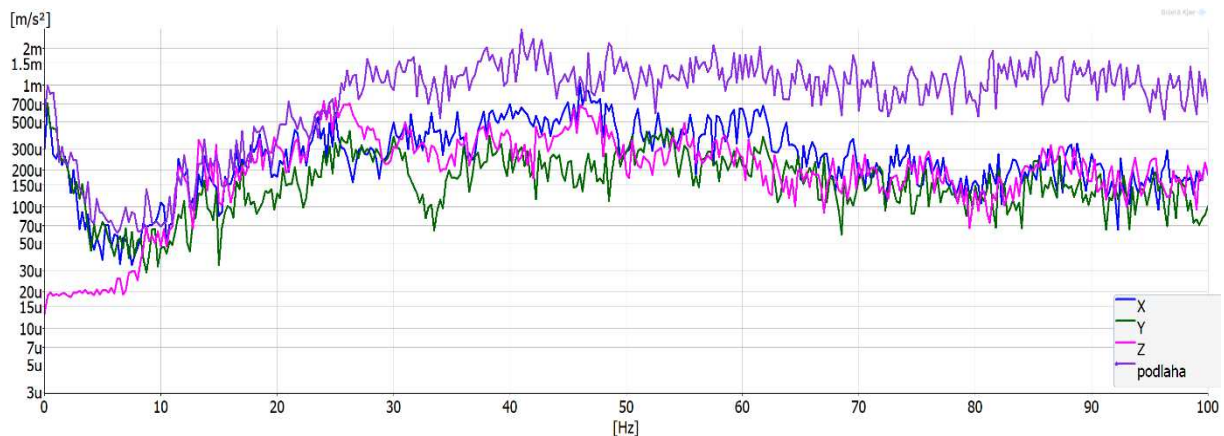
## 7 Frekvenčná analýza v budove Slovenskej filharmónie od budenia prejazdom električiek

Analýza frekvenčnej ozvy v budove Slovenskej filharmónie (SF) sa vykonala v blízkosti koľajovej trate v smere vertikálnom a v dvoch smeroch v horizontálnej rovine, a to kolmo na koľajnice a rovnobežne s koľajnicami v meracích bodoch podľa obrázku 7.1. Meracie body  $x, y, z$  sú stanovené v zmysle požiadavky normy ISO 4866 [23]. Cieľ týchto meraní bol zistiť frekvenčné rozloženie dynamického namáhania nosných stavebných konštrukcií budovy SF od budenia pri prejazde koľajového vozidla po klasickom uložení koľajovej dráhy, teda na zemnom podloží, kde sú výrazné diskontinuity, a to výhybka a križovanie koľajníc. Meracie miesta sa situovali v reštaurácii v blízkosti koľajovej trate a približne v strede kraja vstupnej haly (Obr. 7.1a,b) a na balkóne koncertnej haly na poschodí a v jej strede (Obr. 7.1c).

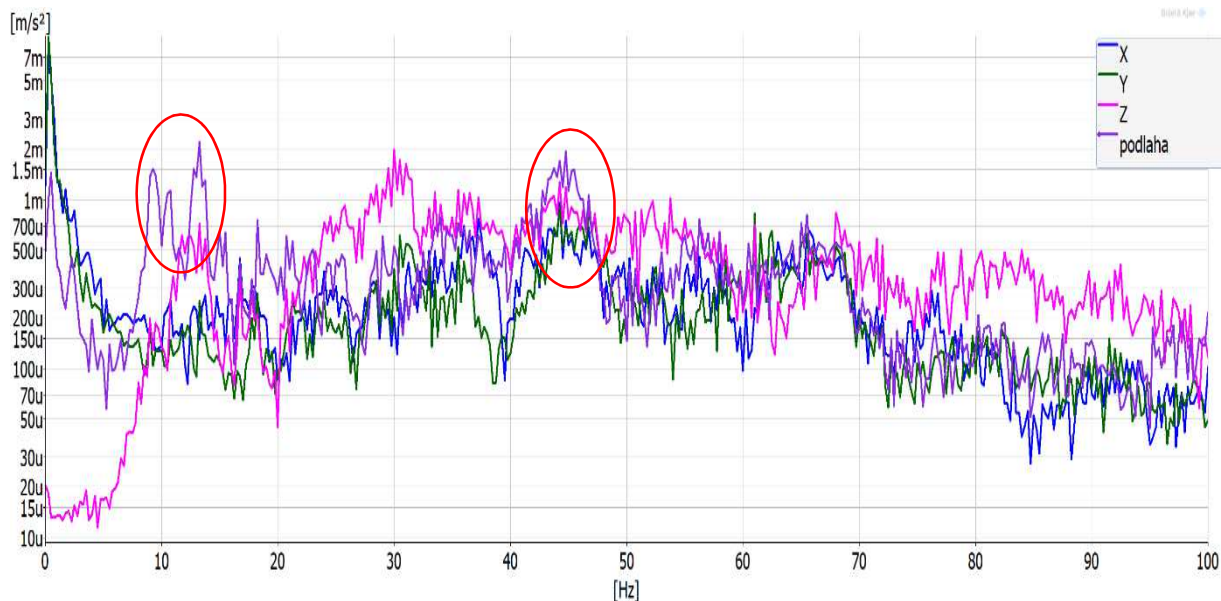


Obrázok 7.1 – Meracie miesta v budove Slovenskej filharmónie.

Z analýzy frekvenčnej ozvy v budove SF je vidieť vybudenie vlastných frekvencií nosných stavebných konštrukcií vo frekvenčnej oblasti technickej seizmicity. Časté náhodné vybudenie vlastných frekvencií stavebných a technologických konštrukcií nežiaduco prispieva k znižovaniu ich stability a k skracovaniu ich životnosti. Treba pripomenúť, že najviac poškodení budovy zdrojmi vyvolanými aktivitami človeka sa vyskytujú vo frekvenčnom rozsahu od 1 Hz do 150 Hz [23]. Frekvenčné spektrá ozvy nosných stavebných konštrukcií budovy SF vybudené prejazdom električiek naznačujú nežiaduce únavové namáhanie budovy v oblasti frekvenčného rozsahu (oblasť nízkych frekvencií) do 80 Hz, ktoré spôsobujú únavové poškodenie budovy. K nežiaducemu dynamickému vybudeniu kmitania prispieva aj výhybka a kríženie koľajníc.



Obrázok 7.2 – Frekvenčná ozva kmitania na nosných stavebných konštrukciách v priestore reštaurácie a v strede vstupnej haly od prejazdu električiek.



**Obrázok 7.3 – Frekvenčná ozva kmitania nosných stavebných konštrukcií na balkóne a v strede koncertnej sály od prejazdu električiek.**

Z Obr. 7.3 je vidieť výrazné nízkofrekvenčné dynamické namáhanie podlahy koncertnej sály Slovenskej filharmónie seizmickým vlnením do 35 Hz a tiež dynamické namáhanie frekvenciami do 80 Hz. Kmitanie týchto nosných stavebných konštrukcií generuje aj nízkofrekvenčný zvuk, a to vo frekvenčnej oblasti v okolí 50 Hz a infrazvuk vo frekvenčnom pásme 8 Hz až 15 Hz, čo zodpovedá vlastnej frekvencii zodpovedajúcej stavebnej konštrukcii.

## 8 Diskusia a záver

Na základe požiadavky MK SR sa vykonali vibro-akustické merania smerujúce k potenciálnej analýze dynamického zaťaženia (kmitanie, hluk) budovy SND. Experimentálne skúšky (merania) parametrov kmitania sa vykonali pri prejazde električiek po koľajovej dráhe uloženej na klasickom zemnom podloží a následne na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte) v Petržalke a pri prejazde električiek po koľajovej dráhe v blízkosti historickej budovy SND a budovy Slovenskej filharmónie. Modálna analýza sa vykonala na vytypovaných nosných konštrukciách v veľkoplošných sálach SND a v podzemnej garáži, nad ktorou sa plánuje uloženie koľajovej dráhy, s cieľom hľadania zhody potenciálnych budiacich frekvencií generovaných prejazdom koľajového vozidla popred budovou SND s vlastnými frekvenciami nosných stavebných konštrukcií budovy SND. **Vykonané experimenty potvrdili možnú zhodu budiacich frekvencií generovaných potenciálnym prejazdom koľajového vozidla popred budovou SND a vlastných frekvencií nosných stavebných konštrukcií budovy SND, čo by viedlo k rýchlejšiemu únavovému poškodzovaniu nosných stavebných konštrukcií budovy SND. Vybudenie rezonancie stavebných konštrukcií má za následok generovanie nízkofrekvenčného hluku a potenciálneho vybudenia stojateho alebo čiastočne stojateho vlnenia (dunivého hluku) vo veľkoplošných sálach, čo sa potvrdilo pri aplikácii modálnej analýzy (kapitola 3, Obr. 3.4).**

Vyjadrený pomer hodnôt nameraných na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte) a na klasickom zemnom podloží pri prejazdoch električiek z Petržalky (B) a do Petržalky (D) efektívnych rýchlostí kmitania v oblasti technickej seizmicity je **viac než 10-násobne vyšší na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte) ako na zemnom podloží. Treba zdôrazniť, že kvadrát rýchlosti kmitania reprezentuje kinetickú energiu, ktorá vykonáva nežiaducu únavovo-deštrukčnú prácu na budovách nachádzajúcich sa v blízkosti prejazdov koľajových vozidiel. Treba mať na zreteli, že predpokladané vibroizolačné uloženie koľajovej trate nad podzemnými garážami SND bude mať pri seizmických frekvenciách zanedbateľný útlm [18, 21, 22].**

**Výsledky vykonaných experimentov a dosiaľ riešené podobné projekty (pozri odkazovú literatúru) hovoria v neprospech vybudovania koľajovej trate na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte) tak, ako sa to plánuje v „predpokladanom ideovom riešení“, ktoré nám bolo poskytnuté (pozri Obr. 1.1) [32]. Potvrďuje to aj veľmi výrazný pomer efektívnych rýchlostí kmitania, ktorý je, ako sa uvádza vyššie, viac než 10-násobne vyšší na vyvýšenej stavebnej konštrukcii (estakáde, viadukte) ako na zemnom podloží.**

**Z vykonanej dynamickej analýzy vyplýva, že analyzovaná vyvýšená konštrukcia (estakáda, viadukt) vykazuje nežiaduce dynamické zaťaženie na okolité stavebné konštrukcie a tým aj blízke akusticky chránené priestory z hľadiska generovania nízkofrekvenčného hluku (dunivého hluku).**

**Frekvenčné spektrá ozvy nosných stavebných konštrukcií historickej budovy SND a budovy Slovenskej filharmónie vybudené prejazdom električiek potvrdzujú nežiaduce únavové namáhanie budovy v oblasti uvedeného frekvenčného rozsahu (oblasť nízkych seizmických frekvencií), ktoré spôsobujú ich trvalé únavové poškodenie.**

**Vybudenie frekvencií seizmického vlnenia prejazdom električky je zrejmé z Obr. 5.6 a určite je tu zhoda s vlastnými frekvenciami stavebných konštrukcií získaných modálnou analýzou. Vychádzajúc zo zhody vlastných frekvencií vlastných tvarov nosných stavebných konštrukcií ohraničujúcich prostredie činoherných sál a opernej sály s vybudenými frekvenciami prejazdom električiek (pozri článok 5.4) vygeneruje sa akustické nízkofrekvenčné vlnenie, ktoré môže ovplyvniť akustické prostredie v týchto sálach [21].**

Riešenie úlohy si vyžadovalo aj určitú konfrontáciu s odbornými poznatkami uvedenými v publikáciách, ktoré možno nájsť v použitej odkazovej literatúre. Väčšina z týchto publikácií je verejnosti prístupná.

Výsledky meraní v tejto správe sa týkajú iba podmienok prostredia, ktoré sa vyskytli počas merania. Výskumnú správu možno brať do úvahy len ako celok.

Zodpovedný riešiteľ: prof. Ing. Stanislav Žiaran, CSc.

## Odkazová literatúra

- [1] Žiaran, S., Chlebo, O., Pokusová, M., Šooš, L., Úradníček, J., Mačák, L.: Nová generácia nákladných železničných vozidiel. Časť 1.: Meranie vibroakustických vlastností cisternového vozňa. Výskumná správa Sjf STU v Bratislave, Trnava 2019, str. 73.
- [2] Žiaran, S., Chlebo, O., Musil, M., Úradníček, J., Mačák, L.: Nová generácia nákladných železničných vozidiel. Časť 2.: Frekvenčná analýza zvuku podvozku cisternového vozňa. Výskumná správa Sjf STU v Bratislave, Trnava 2020, str. 31.
- [3] Žiaran, S., Chlebo, O., Petrák, P., Úradníček, J., Šooš, L., Mačák, L., Búry M.: Nová generácia nákladných železničných vozidiel. Časť 3.: Frekvenčná analýza kmitania a hluku cisternového vozňa za pohybu s návrhom opatrení. Výskumná správa Sjf STU v Bratislave, Trnava 2020, str. 166.
- [4] Žiaran, S., Chlebo, O.: Dynamické zaťaženie čerpadiel Hydac Bieri pri pohybe vozňa. Výskumná správa, s. 35, Sjf STU v Bratislave (2021).
- [5] Žiaran, S., Chlebo, O., Pokusová, M., Šooš, L., Úradníček, J., Túma, J., Mačák, L.: Use of vibro-isolation and non-conventional materials for reducing noise of railway wagons. ICSV27, Prague 2021.
- [6] Žiaran, S., Chlebo O., Šooš L.: Influence of kinematic excitation on the dynamic load of rotary machines bearings mounted on a rail vehicle. Vehicle and Automotive Engineering 4 Miskolc 2022, Springer, str. 835.
- [7] Ziaran, S., Chlebo, O., Musil, M.: "Analysis of the impact of different types of vibration isolation on the dynamic loading of machines and the surrounding environment". Proceedings of Internoise/ASME NCAD Noise control and acoustics division conference, 2018, Article number: IN2018-6135, (2018).
- [8] Žiaran, S.-Chlebo, O.-Čekan, M.: Effects of the mounting of the 3D seismic exciter on the working environment and surrounding structures. 25. kongres ICSV, Hirošima 2018.
- [9] Žiaran, S.-Chlebo, O.: Effects of isolating machine vibrations on the transmission of structure-borne and air-borne sound energy. In Proceedings of the INTER-NOISE 2017 [elektronický zdroj]: 46th International congress and exposition on Noise Control Engineering. Hong Kong, Čína, 27.-30. 8. 2017. 1. vyd. Hong Kong, S. 6335-6344.
- [10] Žiaran, S.-Chlebo, O.: The Transmission of Vibroacoustic Energy from the Industrial Machines Through the Building Structure to the Mounting Base. ICSV24, London, 23-27 July 2017.
- [11] Žiaran, S., Chlebo, O.: Dynamické vplyvy trojosovej seizmickej stolice LINK na blízke technologické a stavebné konštrukcie. Výskumná správa Bratislava 2016, str. 24 – VUJE a.s. Trnava.
- [12] Ziaran, S., Cekan, M., Chlebo, O. and Musil, M.: Analysis of seismic response on the excitation of support structures, *Proceeding of the 43nd international congress and exposition InterNoise*, Melbourne, Australia, 16-19 November, (2014).
- [13] Žiaran, S.: Using frequency and modal analysis to attenuate low frequency waves. In: INTER-NOISE 2014 [elektronický zdroj]: The 43nd international congress and exposition on Noise Control Engineering. Melbourne, Australia, 16.-19.11. 2014. - [S.I.]: International Institute of Noise Control Engineering, 2014. - CD-ROM, [10] p. ISBN: 978-0-909882-04-4.
- [14] Ziaran, S., Musil, M., Cekan, M. and Chlebo, O.: Analysis of Seismic Waves Generated by Blasting Operations and their Response on Buildings. *International Journal of Environmental, Earth Science and Engineering*, 7 (11), (2013).

- [15] Ziaran, S.: Low Frequency Vibration and Noise Generated by Seismic Sources and their Effects on Surroundings. *Proceeding of the 42nd international congress and exposition InterNoise*, Innsbruck, Austria, (2013).
- [16] Ziaran, S. and Chlebo, O.: Research Report STU Bratislava, Analysis of the dynamic load of the base plate TruLaser 3040 compared to the concrete blocks, (2017).
- [17] Ziaran, S., Chlebo, O., Cekan, M. and Tuma, J.: Transmission of Vibrations through Vibration Isolators, Theory and Application. *Advances in Mechanism and Machine Science. Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*, Krakov, Poľsko, Springer Nature Switzerland AG 2019, pp. 3995-4004.
- [18] Žiaran, S.: Kmitanie a akustika. Znižovanie hluku a kmitania v priemysle. Vedecká monografia. Vydavateľstvo STU Bratislava 2006, str. 330. ISBN 80-227-2366-5.
- [19] Žiaran, S.: Kmitanie a akustika. Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom. Monografia. Vyd. STU Bratislava 2008, str. 264, ISBN 80-227-2799-0.
- [20] Žiaran, S.: Technická diagnostika. Vedecká monografia. Nakladateľstvo STU Bratislava 2013, str. 332, ISBN 978-80-227-4051-7.
- [21] Žiaran, S.: Nízko frekvenčný hluk a kmitanie. Vedecká monografia. Nakladateľstvo STU Bratislava 2016, str. 316, ISBN 978-80-227-4536-9.
- [22] Žiaran, S.-Chlebo, O.: Dynamická analýza recirkulačného ventilátora s návrhom opatrení na redukciu dynamického zaťaženia. Projekt DenoxAlpiq Kladno pre GE Power s.r.o. – tepláreň Alpiq elektrárne Kladno. Výskumná správa Sjf STU Bratislava 2018, str. 46.
- [23] ISO 4866 Mechanické kmitanie a otrasy. Kmitanie budov. Pokyny na meranie kmitania a hodnotenie jeho vplyvov na budovy.
- [24] STN EN ISO 3381 Železnice. Akustika. Meranie hluku v koľajových vozidlách.
- [25] STN EN 13715 Železnice. Dvojkolesia a podvozky. Kolesá. Jazdný profil kolesa.
- [26] Žiaran, S.-Chlebo, O.: Vyhodnotenie ozvy kmitania skriň rozvádzačov elektro emo12. Výskumná správa 2019, str. 45 – VUJE, a.s. Trnava pre JE Mochovce.
- [27] Žiaran, S.-Chlebo, O.: Meranie a hodnotenie seizmickej odolnosti skriň uniblok. Výskumná správa 2019, str. 16 – VUJE, a.s. Trnava.
- [28] Žiaran, S.-Chlebo, O.: Vyhodnotenie ozvy kmitania skriň rozvádzačov 1BDK pole 8 a 1BNK pole 3. Výskumná správa 2020, str. 35 – VUJE, a.s. Trnava pre JE Mochovce.
- [29] Žiaran, S.: Vplyv explozívneho otrasu na stavebné konštrukcie. Odborná správa, Bratislava 2012 str. 17 – Inžinierske služby Martin.
- [30] Žiaran, S.: Správanie sa vybraných typov zariadení na rôzne parametre seizmického budenia s rôznymi parametrami tlmenia. Výskumná správa projektu ITMS kód Projektu: 26220220171 "Zvyšovanie bezpečnosti jadrovej energetických zariadení pri seizmickej udalosti", Trnava 2014, str. 34.
- [31] Protokol o skúške A\_177\_2020. „Nové električkové trate v Bratislave úsek Košická“. Dokumentácia pre proces EIA. Vibroakustická štúdiá. Klub ZPS vo vibroakustike s.r.o. Žilina
- [32] Podkladový materiál Magistrátu hl. mesta SR Bratislava
- [33] Žiaran, S.: Analýza príčin dynamického zaťaženia stavebných konštrukcií a ľudí oddelenia expedície od vonkajších zdrojov s návrhom opatrení na jeho redukciu. Výskumná správa, Bratislava 2006. str. 20 – WITZENMANN Slovakia Vlkánová
- [34] Žiaran, S.: Dynamická analýza rámovej pily s opatreniami na zníženie prenosu kmitania do okolitého priestoru. Výskumná správa, Bratislava 2003. str. 39 – Stredisko drevárskej výroby Stupava
- [35] Žiaran, S.-Michalíček, M.: Identifikácia a odstránenie zdrojov nadmerného mechanického kmitania jednorámovej pily. Výskumná správa. Bratislava 1995. – Garter Holíč

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2 Prostredie, predmet, cieľ, opis a metodika merania kmitania</b>	<b>7</b>
2.1 Prostredie a podmienky merania	7
2.2 Predmet a postup merania	10
2.3 Cieľ a meracia technika	17
2.3.1 Cieľ merania potenciálneho dynamického zaťaženia prevádzky SND	17
2.3.2 Meracia technika dynamického zaťaženie (kmitania)	17
2.3.3 Určenie meracích miest a podmienky merania	18
2.3.4 Merané parametre, postup a analýza prenosu	19
<b>3 Modálna analýza nosných stavebných konštrukcií sál budovy SND</b>	<b>20</b>
3.1 Modálna analýza vytipovaných konštrukcií v sále opery a baletu	20
3.2 Modálna analýza vybraných konštrukcií v sále činohry	23
3.3 Modálna analýza vybraných konštrukcií v sále štúdia	24
3.4 Modálna analýza v podzemnej garáži SND	26
<b>4 Analýza časového záznamu prejazdu električiek</b>	<b>29</b>
4.1 Grafické zobrazenie časového záznamu	29
4.2 Tabuľkové vyjadrenie nameraných kinematických parametrov	35
<b>5 Frekvenčná analýza od budenia prejazdom električiek na vyvýšenej stavebnej konštrukcii</b>	<b>40</b>
5.1 Prenosový útlm	40
5.2 Frekvenčná analýza kmitania pri koľajovej trati uloženej na zemnom podloží a vyvýšenej stavebnej konštrukcii	40
5.3 Frekvenčná analýza prenosu kmitania od koľajovej dráhy do uloženie podperných konštrukcií	43
5.4 Porovnanie frekvenčných spektier kmitania s modálnou analýzou.	44
5.5 Porovnanie frekvenčných spektier zvuku pri koľajovej trati a pod vyvýšenu stavebnou konštrukciou	45
<b>6 Frekvenčná analýza v historickej budove SND od budenia prejazdom električiek</b>	<b>47</b>
<b>7 Frekvenčná analýza v budove Slovenskej filharmónie od budenia prejazdom električiek</b>	<b>49</b>
<b>6 Diskusia a záver</b>	<b>51</b>
<b>Odkazová literatúra</b>	<b>53</b>