



**REZONANČNÍ KMITÁNÍ VE STAVEBNÍM OBJEKTU:  
PŘÍKLAD EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ**

**RESONANT OSCILLATION IN A BUILDING OBJECT:  
EXAMPLE OF EXPERIMENTAL MEASUREMENT**

*Zdeněk Kaláb<sup>1</sup>*

**Abstrakt**

Každý stavební objekt či technologická konstrukce má tzv. vlastní frekvenci/frekvence, které závisí na fyzikálních vlastnostech objektů, včetně designu a stavebního materiálu. Seismické vlny šířící se od zdroje horninovým prostředím mají různý amplitudový i frekvenční rozsah. Rezonance (vyvolané harmonické kmitání) objektu nastává, pokud se kmitání (dynamické síly) shoduje frekvenčně s vlastními frekvencemi dané konstrukce. V příspěvku je představen příklad experimentálního měření rezonančního kmitání ve stavebním objektu. Toto kmitání bylo vyvoláno změnou konfigurace v okolí daného objektu. Později z interpretace naměřených dat a dodatkových informací bylo zjištěno, že rezonančního kmitání vyvolávalo nedodržení technologie ukládání nového plynového potrubí, po opravě uložení potrubí se rezonance výrazně snížila.

**Abstract**

Each building object or technological structure has its natural frequency/frequencies, which depend on the physical properties of the objects, including the design and building material. Seismic waves propagating from the source through the rock environment have different amplitude and frequency ranges. An object's resonance (induced by harmonic oscillation) occurs if the oscillation (dynamic force) coincides in frequency with the natural frequencies of the given structure. The article presents an example of experimental measurement of

resonant oscillation in a building. This oscillation was caused by a change in configuration around the given object. Later, from the interpretation of the measured data and additional information, it was found that the resonance oscillation was caused by non-compliance with the laying technology of the new gas pipeline, after the repair of the pipeline, the resonance decreased significantly.

### **Klíčová slova**

*Rezonanční kmitání, stavební objekt, seismický záznam*

### **Key words**

*Resonant oscillation, building, seismic record*

## **1. Úvod**

Stavební objekty a technologické konstrukce mohou být zatíženy extrémním nestacionárním dynamickým zatížením, které vzniká při kmitání v podloží. Tato kmitání (otřesy) mohou mít původ přírodní (tj. zemětřesení, sesuvy, extrémní meteorologické jevy ...) nebo technický (tj. trhací práce, činnost strojů a zařízení, doprava, zemní práce, důlně indukované jevy ...). Pro nové objekty je kromě posuzování primární únosnosti konstrukce a použitelnosti konstrukce prováděna i analýza možných vlivů kmitání nejen na objekt, ale také na zařízení citlivá na otřesy, které budou v objektech umístěny. Je obecně známo, že charakter otřesů (generovaných seismických vln) je zpravidla náhodný a detailní popis fyzikálního procesu je velmi obtížný až nemožný (např. Clough and Penzien, 1993, Lee et al., 2002, Villaverde, 2009, Towhaka, 2008, Elnashai, 2015).

Každý stavební objekt či technologická konstrukce má tzv. vlastní frekvenci/frekvence, které závisí na fyzikálních vlastnostech objektů, včetně designu a stavebního materiálu. Seismické vlny šířící se od zdroje horninovým prostředím mají různý amplitudový i frekvenční rozsah. Lokální geologická stavba ovlivňuje velikost seismických účinků na povrchu buďto jejich zesílením nebo také zeslabením (např. Ptilakis, 2004, Kaláb and Lyubushin, 2008). V zastavěných oblastech představuje zesílení seismických účinků na povrchu zvýšení rizika poškození stavebních objektů, a to převážně těch, jejichž vlastní frekvence je totožná s vlastní frekvencí přípovrchové geologické stavby. Z uvedeného plyne, že rezonance (vyvolané harmonické kmitání) objektu nastává, pokud se kmitání (dynamické síly) shoduje frekvenčně s vlastními frekvencemi dané konstrukce. Pak lze očekávat na objektu největší poškození.

Dnes je užíváno několik přístupů ke stanovení vlastních frekvencí objektů. Základem je dnes numerické modelování, tj. tvorba dynamického modelu. K tomu je samozřejmě nutno zadat geometrii modelu a hraničních podmínek, generaci výpočetní sítě, zadání počátečních podmínek, materiálových charakteristik horninového prostředí a konstrukčních prvků objektu a specifikaci dynamického zatížení (např. Hori, 2006, Čada et al., 2011). Seismické zatížení je do modelu zavedeno zadáním časových hodnot horizontálních posunů na spodní hranici modelu, které mohou být přepočteny z naměřených seismogramů (např. Hradil et al., 2009, Kaláb a Hruběšová, 2015). Experimentální měření je další přístup ke stanovení rezonanční frekvence objektu. Zde je vhodné připomenout, že je nutno mít co nejširší

frekvenční rozsah seismického kanálu, protože rezonanční frekvence objektů nebo jejich konstrukčních prvků mohou nabývat různých hodnot. Příkladů experimentálních měření rezonančního kmitání objektů lze v odborné literatuře najít mnoho (např. Hanaidi, 2000, Kaláb a Lednická, 2011, Gangone et al., 2023).

Ke změně vlastních frekvencí objektu dochází při jejich přestavbě, výjimečně je rezonance objektu vyvolána změnou v okolním horninovém prostředí. V příspěvku je ukázka ze staršího měření (tomu odpovídá i kvalita obrázků), jak změna konfigurace v okolí stavebního objektu způsobila vyvolání rezonančního kmitání ve stavebním objektu.

## 2. Experimentální měření

Majitel domu si po provedení rekonstrukce místní komunikace stěžoval na významné zvýšení vibrací vyvolaných průjezdem automobilů. Komunikace se nachází ve vzdálenosti cca 35 metrů od domu, v okolí domu se nevyskytují vysoké stromy. Lokální geologickou stavbu lze charakterizovat jako nepříliš mocné hlíny s čočkami písků a štěrků nasedající na zvětralé břidlice. Dům není podsklepen, jeho půdorys i vlastní stavba jsou velmi členité.

Pro posouzení seismických vibrací vyvolaných dopravou ve sledovaném stavebním objektu bylo provedeno krátkodobé (několikadenní) experimentální měření seismických projevů. Jeden senzor měřící rychlost kmitání (označení ORL2) byl instalován na betonovou podlahu v přízemní prostora (měření dle ČSN 73 0040). Místo bylo vybráno u stěny nejbližší k silnici. Druhý senzor byl instalován na podlaze v prvním nadzemním podlaží. Pro zlepšení kontaktu mezi senzorem a podlahou byly senzory přitíženy. Tento postup byl nutný také z důvodu předpokladu registrace případných vyšších frekvencí konstrukčního prvku. K měření byly použity třísložkové senzory s horní mezní frekvencí 80 Hz. Vodorovná osa N (resp. X) byla orientována směrem k silnici, vodorovná osa E (Y) podél silnice a osa Z byla svislá. Digitální záznamy byly vzorkovány frekvencí 100 Hz. Aparatura byla nastavena na spouštěný záznam při překročení přednastavené hodnoty amplitudy rychlosti kmitání. Celkem bylo za dobu jednoho týdne realizováno 465 záznamů registrační aparaturou v přízemí a 256 záznamů registrační aparaturou v 1. nadzemním podlaží. Záznamy byly seismologicky interpretovány, většina z nich odpovídá projevům dopravy, malá skupina neidentifikovaných jevů jsou pravděpodobně vibrační projevy obyvatel domu.

### 2.1. Stanoviště v přízemí

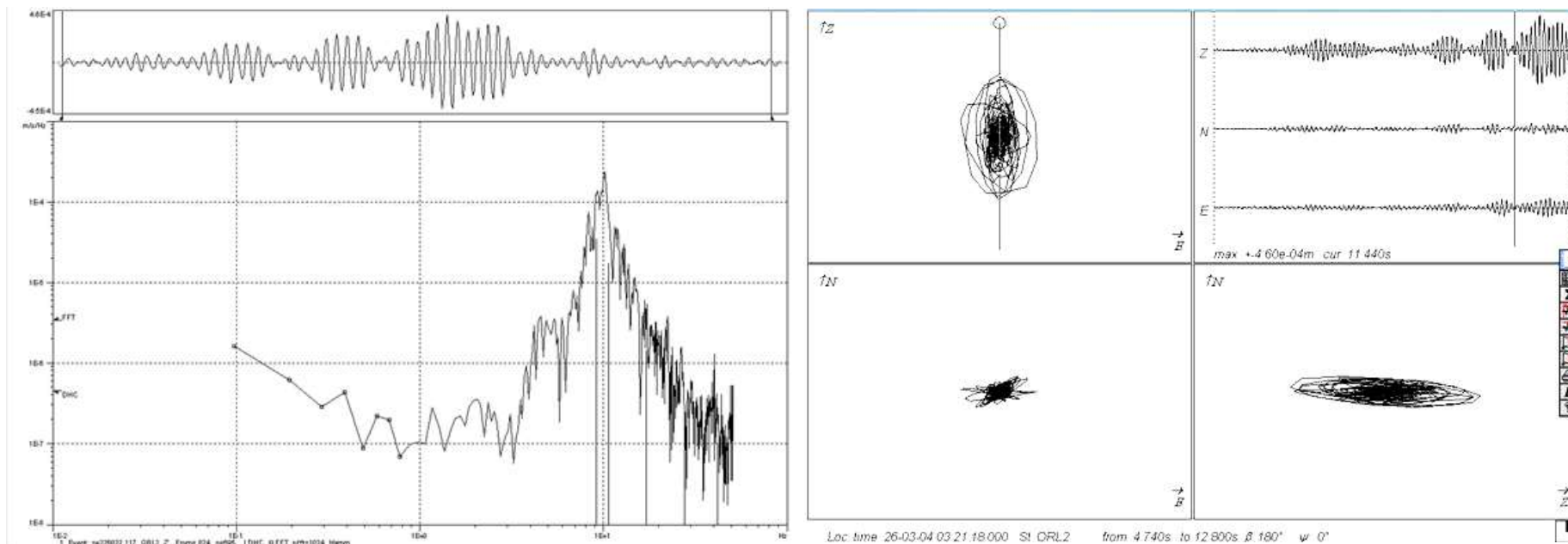
Všechny záznamy seismických projevů dopravy registrované aparaturou v přízemí mají velmi podobný charakter. Vlnové obrazy mají charakteristický tvar s typickým nárůstem a tlumením maximálních výchylek, přičemž maximální hodnoty byly registrovány na záznamech svislé složky. Doba trvání projevů po průjezdu automobilů byla v rozmezí od 5 do 10 s (delší záznamy byly interpretovány jako projev více dopravních prostředků). Interpretaci seismických záznamů lze sumarizovat následovně:

- maximální naměřenou složkovou amplitudu rychlosti kmitání  $0,419 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  (zaznamenána na svislé složce) – obr. 1,
- jedinou významnou dominantní harmonickou frekvenci o kmitočtu v rozmezí 8 až 10 Hz (na všech třech složkách) – obr. 2 vlevo,

- úvodní fázi vyvolaného kmitání representovanou svislým lineárně usměrněným kmitáním, v dalších fázích kmitání slabě elipsovité ve svislé rovině kolmé k vozovce – obr. 2 vpravo.



*Obr. 1 Vlnový obraz nejintenzivnějšího projevu dopravy ve sledovaném objektu (stanoviště v přízemí), jednotlivé složky normovány na své absolutní maximum (spodní hodnota u záznamu) [ $mm \cdot s^{-1}$ ], vodorovná osa je čas [h:min:s]*



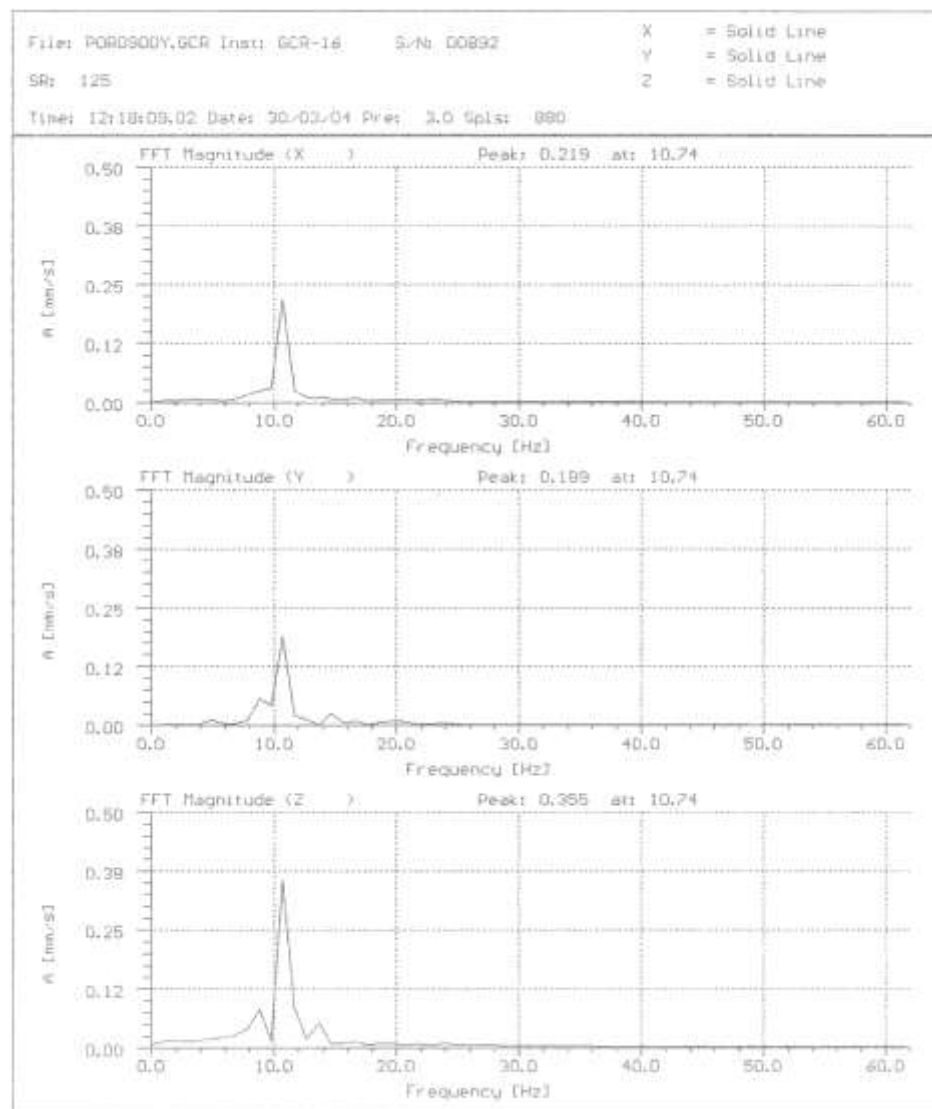
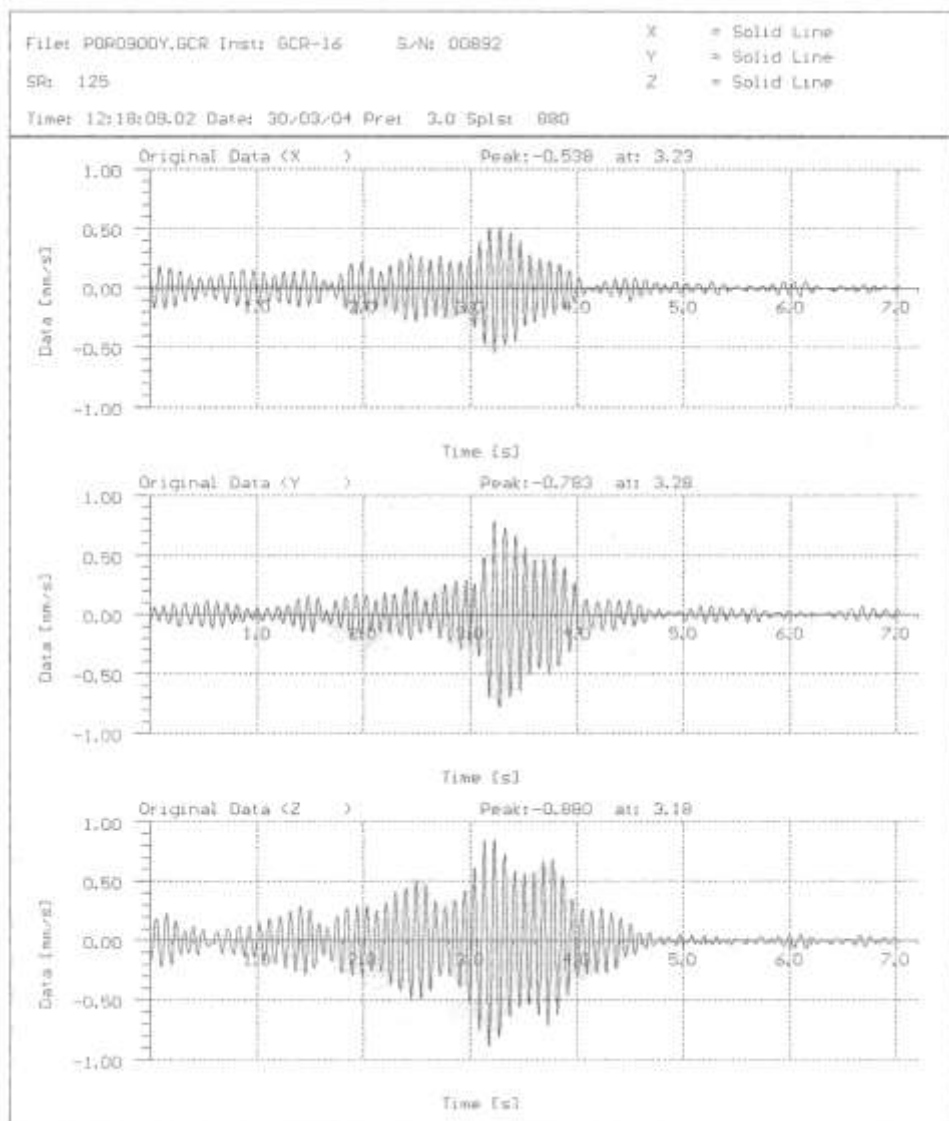
**Obr. 2** Spektrum Z složky (vlevo) a polarogram (vpravo) nejintenzivnějšího záznamu na stanovišti v přízemí

## 2.2. Stanoviště v prvním nadzemním podlaží

Také na tomto stanovišti mají všechny záznamy seismických projevů dopravy velmi podobný charakter. Vlnové obrazy mají:

- charakteristický tvar s typickým nárůstem a tlumením maximálních výchylek,
- maximální hodnoty na záznamech na svislé složce nebo na vodorovné složce v rovině kolmé k vozovce,
- maximální naměřená složková amplituda rychlosti kmitání byla  $0,880 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  (zaznamenána na svislé složce) – obr. 3 vlevo,
- doba trvání projevu v rozmezí od 3 do 6 s (delší záznamy byly interpretovány jako projev více dopravních prostředků),
- zpravidla jedinou významnou dominantní harmonickou frekvenci o kmitočtu v rozmezí 6 až 12 Hz (na všech třech složkách) – obr. 3 vpravo,
- úvodní fáze vyvolaného kmitání je reprezentována kruhovým (občas spirálovým) pohybem hmotného bodu,

- v dalších fázích je kmitání slabě elipsovité až výrazně lineární ve svislé rovině kolmé k vozovce s projevy natáčení osy usměrnění.



**Obr. 3** Vlnový obraz nejintenzivnějšího projevu dopravy v prvním nadzemním podlaží sledovaného objektu [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ], vodorovná osa je čas [s]- vlevo, spektra jednotlivých složek záznamu - vpravo

### 3. Diskuze a závěr

Souhrnně lze konstatovat, že dobu měření lze charakterizovat jako běžný vzorek seismického zatížení daného stavebního objektu. Maximální naměřená hodnota rychlosti kmitání měřená na základech budovy dosáhla hodnoty  $0,418 \text{ mm.s}^{-1}$ , hodnota odezvy budovy měřená v prvním nadzemním podlaží dosáhla hodnoty  $0,88 \text{ mm.s}^{-1}$ . Spektra signálů ukazují významné rezonanční frekvence na hodnotě blízké 10 Hz. Lze důvodně předpokládat, že naměřené hodnoty byly dostatečně reprezentativní pro další hodnocení a analýzu seismického zatížení sledovaného místa.

Na závěr uvedme poznámky plynoucí z diskuze k identifikaci zdroje kmitání a následného rezonančního projevu. Z uvedeného experimentálního měření nebylo možno zdroj stanovit. Vibrace vyvolané dopravou po nedaleké komunikaci do rekonstrukce komunikace zdaleka nevyvolávaly výše uvedenou rezonanci objektu. Protože lokálně geologická stavba se nezměnila, bylo třeba hledat jinou příčinu. Při detailním studiu prací během rekonstrukce komunikace bylo zjištěno, že současně byla provedena výměna páteřního plynového potrubí. Pravděpodobně nebyla dodržena technologie uložení potrubí, neboť po vyžádané úpravě uložení potrubí došlo k významnému snížení vyvolaného rezonančního kmitání. Předpokládáme, že zdrojem kmitání byla rezonance plynového potrubí vyvolaná pojezdem „větších“ automobilů.

### Poděkování

Príspevek je zpracován s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO: 68145535.

### References

- CLOUGH, R.W., PENZIEN, J.: *Dynamics of Structures*. 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1993.
- ELNASHAI, A.S., DI SARNO, L.: *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Wiley, 2015.
- GANGONE, G., GALLIPOLI, M. R., TRAGNI, N., VIGNOLA, L., CAPUTO, R.: Soil-Building Resonance Effect in the Urban Area of Villa d'Agri (Southern Italy). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 7, p. 3273-3296. DOI: 10.1007/s10518-023-01644-8
- HANAIDI, O.: Traffic Vibrations in Buildings. *Construction Technology Update*, No. 39, 2000, [www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ctus/ctus-n39.html](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ctus/ctus-n39.html).
- Hori, M.: *Introduction to Computational Earthquake Engineering*. Imperial College Press, London, 2006.
- HRADIL, P., KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., KORÍNEK, R., SALAJKA, V., KANICKÝ, V.: Response of a Panel Building to Mining Induced Seismicity in Karvina Area (Czech Republic). *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 14, 2009, No. 2, p. 143 - 151.
- ČADA, Z., HRADIL, P., MROZEK, M., SALAJKA, V.: Parametric Study on Dynamic Behaviour of a Multi-Storey Building including Soil-Structure Interaction. *Engineering Mechanics 2011*, p. 91 – 94.
- KALÁB, Z., HRUBEŠOVÁ, E.: Evaluation of Seismic Effect of Traffic-Induced Vibrations. *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 20, 2015, No. 1, p. 33 - 37. <http://actamont.tuke.sk/pdf/2015/n1/5kalab.pdf>

- KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M.: Analýza naměřených vibračních projevů v kostelní věži. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment (EGRSE)*, 2011, Vol. XVIII.3, s. 53-61.
- KALÁB, Z., A. A. LYUBUSHIN: Study of Site Effect using Mining Induced Seismic Events and Ambient Noise from Karviná Region. *Acta Geodyn. Geomater.* Vol. 5, No. 2 (150), 2008,p: 105 - 113.
- LEE, W.H.K., KANAMORI, H., JENNINGS, P.C., KISSLINGER, C. (eds): *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Academic Press, IASPEI, 2002.
- PITILAKIS, K.: Site effect. In: A. Ansal (ed.): *Recent Advance in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation*. Dordrecht (Netherlands): Kluwer Academic Publisher, 2004, p. 139 - 197.
- VILLAVERDE, R.: *Fundamental Concept of Earthquake Engineering*. CRC Press, Ninth edition., Taylor & Francis Group, 2009.
- TOWHAKA, I.: *Geotechnical Earthquake Engineering*. Springer, 2008. DOI 10.1007/978-3-540-35783-4.

---

**Autor**

<sup>1</sup> prof. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, [kalab@ugn.cas.cz](mailto:kalab@ugn.cas.cz)