

VLASTNÍ A BUZENÉ KMITY KATEDRÁLY SV. BARTOLOMĚJE V PLZNI

NATURAL AND STIMULATED OSCILLATIONS OF ST. BARTHOLOMEW'S CATHEDRAL IN PILSEN

Milan Brož¹, Jaroslav Štrunc²

Abstrakt

V rámci vyhlášení „Plzeň Město kultury Evropy 2015“ byly po provedených sbírkách občanů a organizací vyrobeny čtyři chybějící zvony na katedrálu svatého Bartoloměje, jejíž kostelní věž je nejvyšší v České republice. V souvislosti s osazením těchto zvonů do věže byla provedena seismickým odd. Geofyzikálního ústavu AVČR měření pro posouzení seismických účinků jejich společného zvonění na stavební konstrukci věže. Vzhledem k originalitě okamžiku, který byl dne 17. 1. 2015 v 19:00 hod, kdy se město Plzeň stalo pro rok 2015 tímto městem kultury Evropy, nebylo možné provést žádná testovací měření. Před tímto prvním zvoněním byla provedena seismická měření sloužící pro analýzu vlastních kmitů věže jako odezva na dopravu a vliv přírodních podmínek. Pro seismická měření byla použita jednak stacionární seismická aparatura typu RUP2014 s dálkovým přenosem dat a dále 4 autonomní seismické aparatury typu BRS32, které byly umístěny po výškovém profilu věže. Vyhodnocení seismických měření prokázalo, že odezva věže při jejím vychýlení zvoněním na všech 5 zvonů současně se ve svých kmitoch drží vlastní harmonické frekvence a tedy nedochází k jinému než elastickému zatížení konstrukce. Tyto závěry byly vysloveny až na základě dlouhodobé, více než roční seismické registrace stacionární aparaturou ve věži katedrály.

Abstract

The St. Bartholomew's cathedral tower is the tallest Christian building in the Czech Republic. In the framework of “2015 Pilsen European Capital of Culture” an initiative of civil cash collection introduced re-making of four bells missing in its belfry. Installation of bells was followed by measuring their seismic influence on the building construction. This measuring started shortly before the first ringing which was held at the beginning of the year 2015 in the honour of Pilsen's reign takeover. The first goal was to evaluate the effect of tower's own oscillations as a result of traffic and natural influences. There were five seismic stations installed: one main apparatus RUP2014 with telemetry accompanied by four autonomous BRS32 settled in the tower's vertical profile. More than one year monitoring proved just elastic load of tower structure also in case of coherent bells' movements. The tower has not exceeded its own harmonic frequency in all cases. This paper deals with this long-term measurement process and its evaluation.

Klíčová slova

Kmitání věže katedrály, seismické účinky na stavby, indukovaná seismická, frekvenční spektrum

Keywords

Church tower oscillations, seismic impacts on buildings, induced seismicity, spectrogram

1 Úvod

V současné době stále narůstají požadavky na měření indukované seismicity v oblasti dopravních a průmyslových staveb, které vyžadují náročnou přístrojovou instrumentaci, zejména kontinuální seismické registrace s přesnou identifikací jak času, tak i stanovení místa umístění. Poměrně jiným, i když ne zcela výjimečným úkolem, bývá studium stability historických staveb, zejména chráněných památkových objektů. Tato měření byla např. prováděna v areálu Pražského hradu, v kostele sv. Václava v Praze, v kostele sv. Bartoloměje v Kutné hoře a jinde (např. Kaláb, Lednická, 2011, Procházka et al., 2011). Poměrně zvláštním případem je posuzování stability kostelních věží při jejich osazení novými zvony. Tento případ autoři řešili při osazování třetího zvonu do věže historické památkové stavby Sázavského kláštera a při osazení čtyř nových zvonů v roce 2015 do věže katedrály sv. Bartoloměje v Plzni (Obr. 1). Právě zkušenosti s měřením v historických objektech a kvalitní seismické aparatury pracující s vysokým frekvenčním i dynamickým rozsahem umožnily provést zcela objektivní měření, ze kterého mohly být výsledky aplikovány do oblasti posouzení stability těchto konstrukcí.

2 Parametry katedrály sv. Bartoloměje a použité seismické aparatury

I když počátky tohoto plzeňského kostela jsou dokumentovány již do roku 1307, tak stavba, která měla už svůj charakter kolem roku 1506, dostala současný tvar až po požáru věže v roce 1835 (Soukup, Hynčík, 2012). Po opravě byly v roce 1837 osazeny nové 4 zvony ulité stavitelem Pernerem, a to zvony Anna (0,6 t), Prokop (0,9 t), Jan Nepomucký (2 t) a Marie (4 t). V roce 1854 byl napodruhé do věže osazen i největší zvon Bárta (8,3 t). Celková váha zvonů ve věži byla 15,8 t. Všechny zvony byly postupně během 1. a 2. světové války použity pro zbrojní průmysl a prozatímne byly nahrazeny zvonem z jiného kostela. Jejich obnova začala na základě iniciativy občanů v roce 2011 a osazeny byly poté v roce 2015; jejich celková váha je 11,2 t (Obr. 2). Oproti původní konstrukci, která byla zhotovena jako samonosná uprostřed věže a která při požáru vyhořela, jsou současné zvony umístěny do konstrukce, která je částečně ukotvena do zdiva věže, což způsobuje přenos kmitů zvonů do stavební konstrukce.

V současné době je otázka seismických měření realizována převážně stacionárními monitorovacími aparaturami a jejich osazení při terénních experimentech vyžaduje zvláštní péči, zejména pokud se jedná o bezobslužný provoz s on-line připojením k internetu. Pro tato měření byla tedy do věže kostela osazena automatická monitorovací aparatura typu RUP2014 s GSM modemovým připojením k internetu (Obr. 3). Aparatura je vybavena satelitním přijímačem času a polohy a osazena středně periodickým snímačem LE3D s vlastní frekvencí 1 Hz a citlivostí 400 mV/mm/s (Brož et al., 2015). Při použití čtyřkanálového 28 bitového AD převodníku byla dosažena dynamika měření až 144 dB. Kromě této stacionární aparatury, byly pro expediční měření do profilu věže kostela umístěny 4 přenosné autonomní aparatury typu BRS32 (Obr. 4), které byly rovněž vybaveny snímači LE3D. Pro snímání velkých amplitud rychlosti kmitání (až $v = 72$ mm/s) byly osazeny geofony SM6 s citlivostí 28,8 mV/mm/s. (Brož et al., 2014a, 2014b). Základní podmínkou pro vyhodnocení seismických dat při měření rozsáhlých objektů je zajištění shodné a přesné časové základny pro všechny seismické aparatury. Ta byla v našem

případě zajištěna tím, že všechny aparatury využívají synchronizace času ze satelitních přijímačů Garmin, které jsou vybaveny i HW pro příjem vteřinových impulsů a synchronizují interní časové hodiny seismických záznamníků.



Obr. 1 Kostelní věž katedrály sv. Bartoloměje v Plzni, která je nejvyšší věží v České republice (výška 103 m)



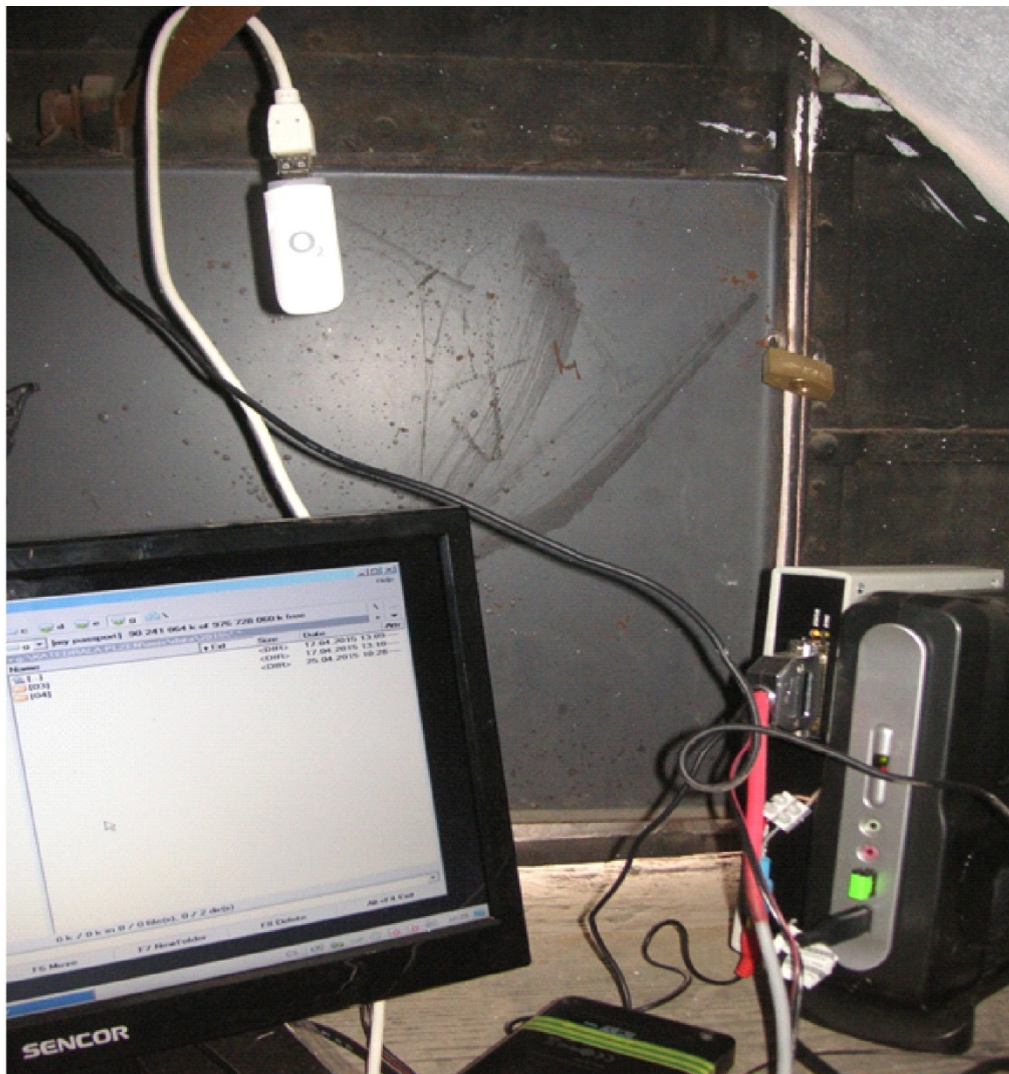
Obr. 2 Nový zvon v kostelní věži ve výšce 67 m

3 Metodika seismického měření a seismické záznamy

Pro seismická měření byla použita jednak stacionární seismická aparatura typu RUP2014 s dálkovým přenosem dat a dále čtyři autonomní seismické aparatury typu BRS32, které byly umístěny po výškovém profilu věže. Pro stanovení charakteristik stavby věže, byla před osazením věže zvony provedena registrace seismických účinků tramvajové dopravy a stanovena frekvence vlastních kmitů věže. Pro

měření byly využity seismické aparatury BRS32. Tato měření byla prováděna jednak v místě budící funkce, na horním ochozu věže a na dřevěné konstrukci stolice zvonů. Na Obr. 5 je uveden jednak seismogram při průjezdu tramvaje, na Obr. 6 a 7 odezvy tohoto buzení na výše uvedených dvou stanovištích. Na následném Obr. 8 a 9 jsou zpracovaná FFT frekvenční spektra na obou těchto stanovištích. Výsledkem těchto měření je zjištění, že vlastní kmity věže v horizontálních směrech kmitání mají frekvenci v rozsahu 0,9 Hz až 1,1 Hz.

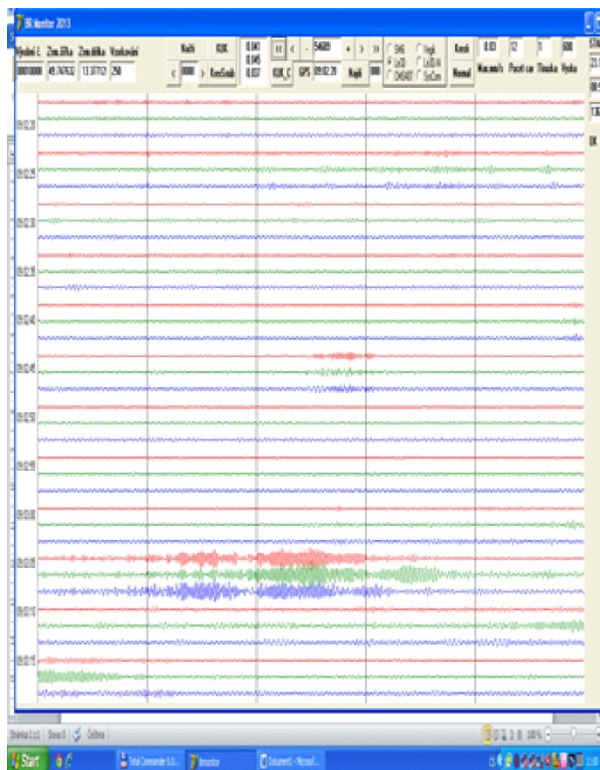
Frekvenční spektrum ve vertikálním směru je ovlivňováno podložím snímače a nemá vliv na stabilitu konstrukce.



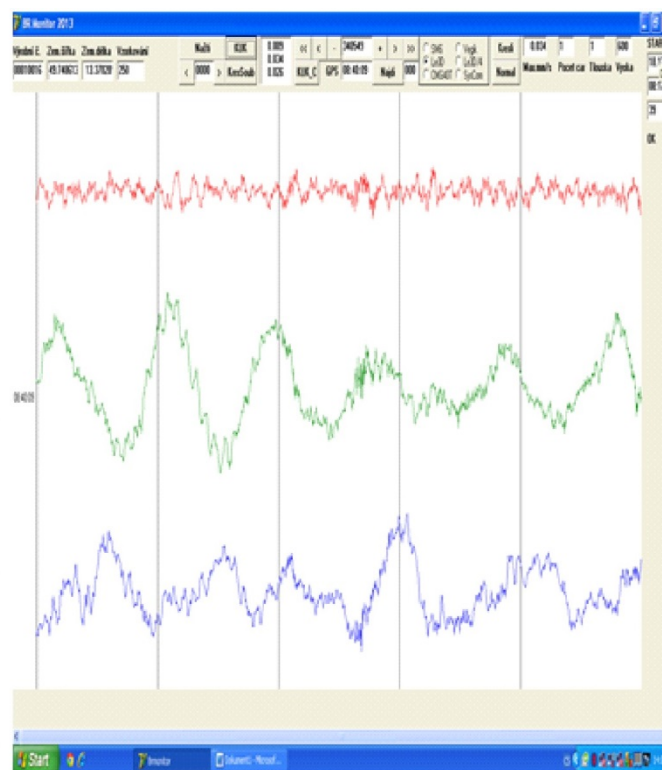
Obr. 3 Aparatura RUP 2015 s GSM modemem.



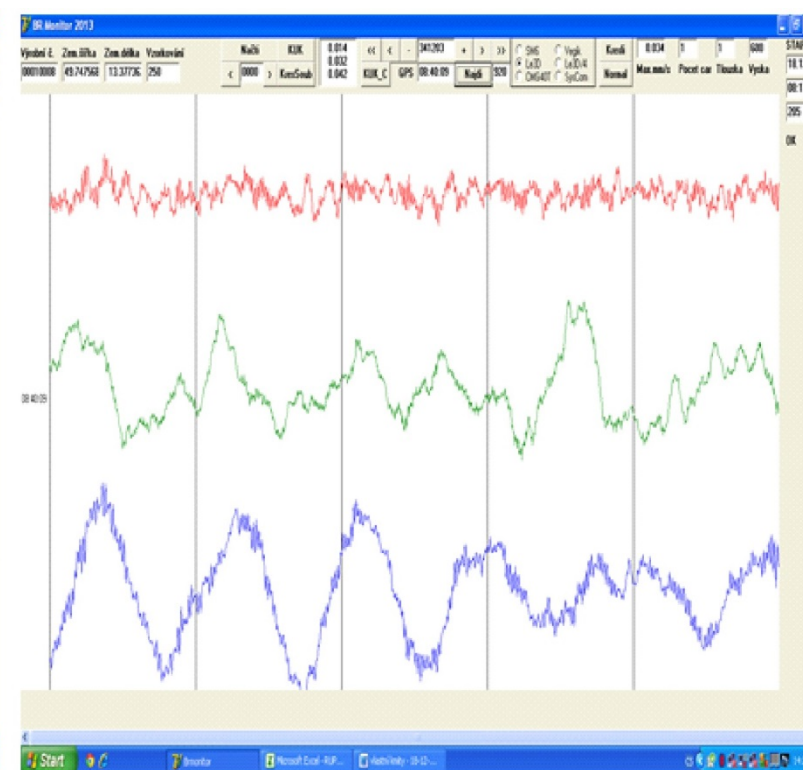
Obr. 4 Umístění aparatury BRS32 ve výklenku zdiva – 84 m.



Obr. 5 Průjezd tramvaje pod kostelem

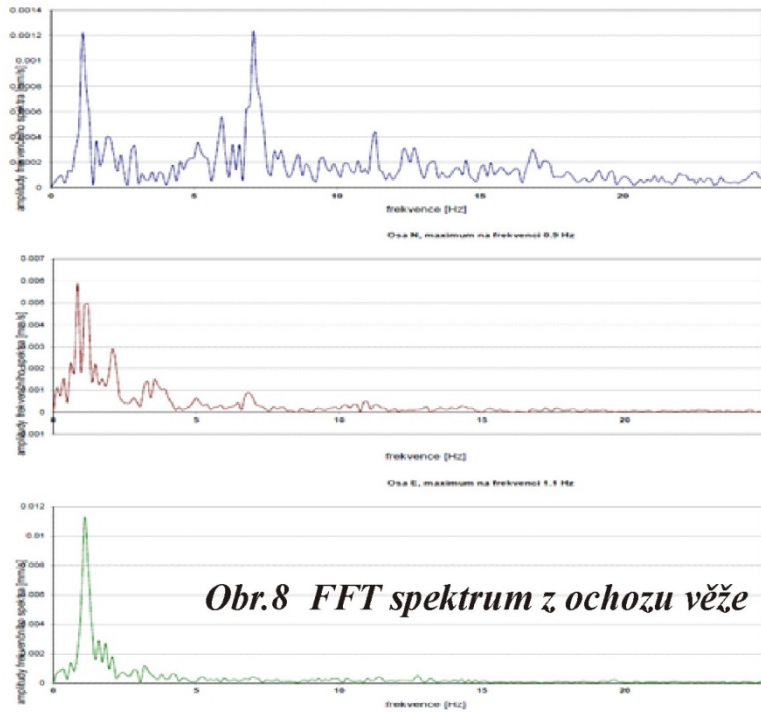


Obr. 6 Ochoz – detail seismogramu



Obr. 7 Konstrukce zvonů – detail seismogramu

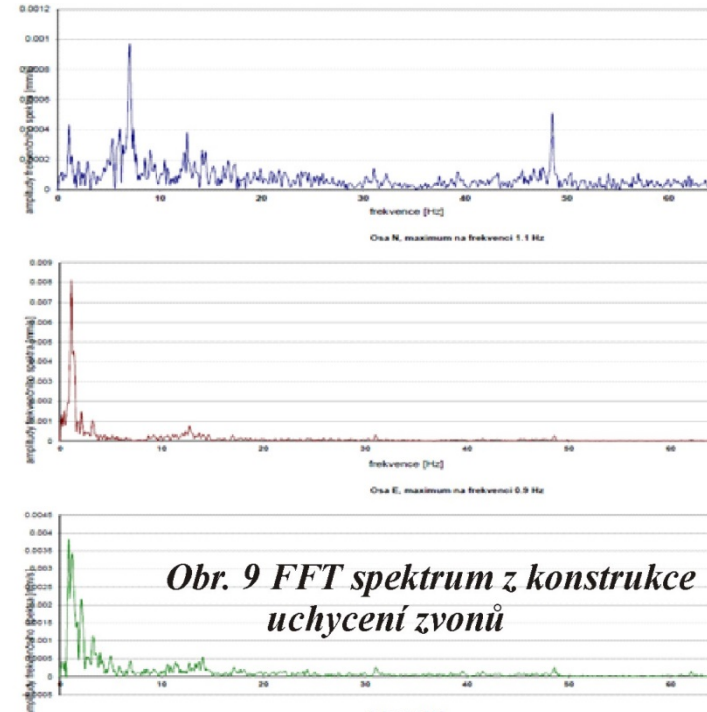
Aparaturou RUP2014 pro dlouhodobý seismický monitoring byla GSM modemem kontinuálně přenášena tříložková seismická data a prováděno jejich vyhodnocení. Pro tyto úlohy byl používán program seismické vizualizace, pomocí kterého je možné zobrazit libovolně dlouhé časové úseky seismického záznamu, provádět jejich úsekový výběr a následnou analýzu. Příklad tohoto zpracování dat je uveden na Obr. 10 až 12. Na obr. 10 je uveden 10-ti minutový tříložkový záznam seismických signálů v amplitudách rychlosti kmitání ve výšce 56 m věže katedrály při velikonočním zvonění dne 6. 4. 2016 v 07 hod (na seismogramu světový čas). Na následném Obr. 11 jsou uvedeny detailní průběhy seismických signálů opět v amplitudách rychlosti kmitání. Na Obr. 12 je uveden průběh budící funkce kmitání zvonů, jejíž seismická odezva byla naměřena přímo na dřevěné konstrukci zavěšení zvonů. Kmity, které byly zaregistrovány na složce E, jsou ve směru kývání dvou největších zvonů Bartoloměj (5 t) a Hroznata (3,7 t).



Obr.8 FFT spektrum z ochozu věže

FREKVENČNÍ SPEKTRUM OTŘESU

18.12.2014 v 08:40:09.00 UTC
 Měřeno aparaturou RUP-B08 /141218084009B08.DAT, 3x SM6
 Zpracováno softwarem Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd ČR, v.v.i.
 Norma CSN Logaritmická škála (rychlost kmitání) Logaritmická škála (frekvence)
 Délka záznamu pro spektrální analýzu: 8.192s
 Osa Z, maximum na frekvenci 7.1 Hz



Obr. 9 FFT spektrum z konstrukce uchycení zvonů

FREKVENČNÍ SPEKTRUM OTŘESU

18.12.2014 v 08:40:09.00 UTC
 Měřeno aparaturou RUP-B16 /141218084009B16.DAT, 3x SM6
 Zpracováno softwarem Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd ČR, v.v.i.
 Norma CSN Logaritmická škála (rychlost kmitání) Logaritmická škála (frekvence)
 Délka záznamu pro spektrální analýzu: 8.192s
 Osa Z, maximum na frekvenci 7.1 Hz

RENAL | BULLETIN | LOG

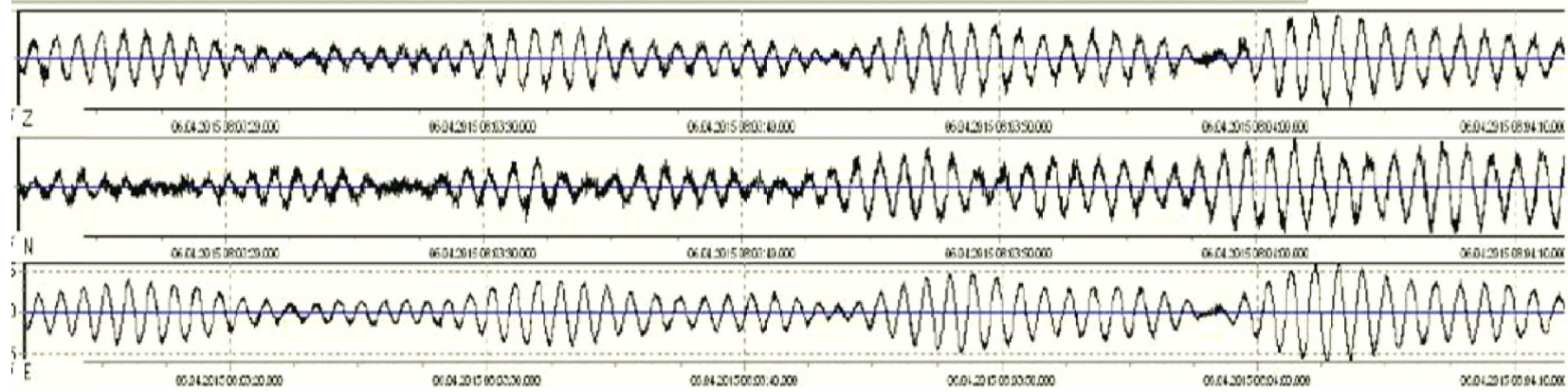
Interval: 1 s, 16 s, 10 min. | Amplituda: mm/s, cm/s, m/s, mm/s, cm/s, m/s

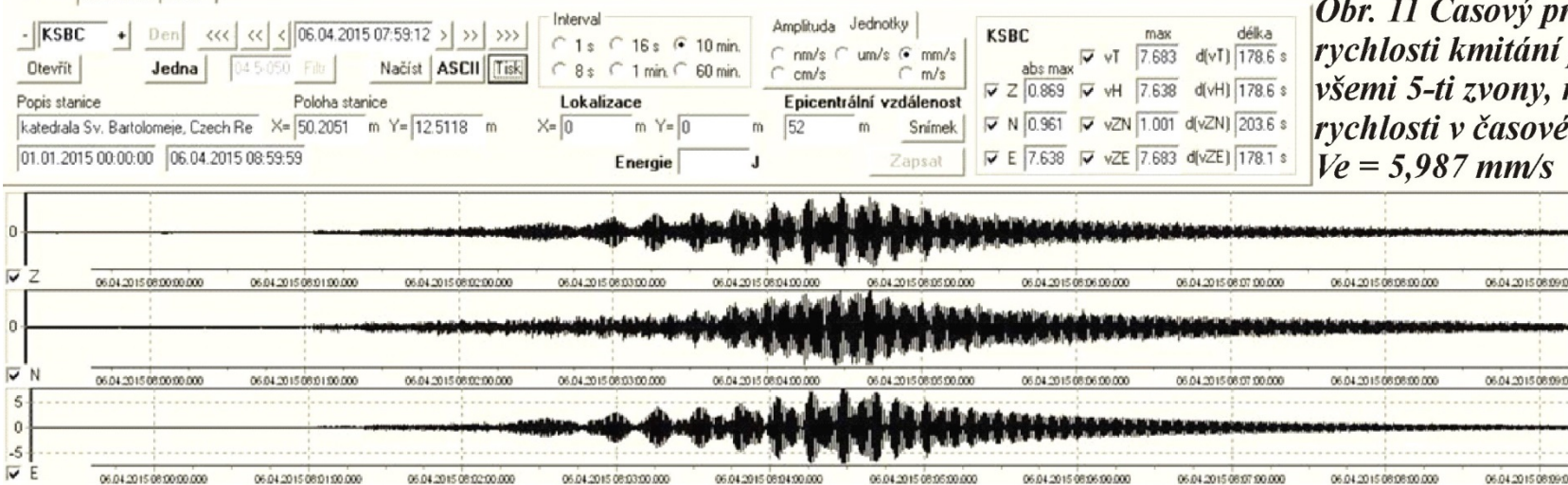
KSBC: Z 0.693, N 0.731, E 5.997 | vT 6.025, vH 5.997, vZE 6.024 | d(vT) 53.20 s, d(vH) 53.02 s, d(vZE) 53.18 s

Popis stanice: katedrálě Sv. Bartoloměje, Czech Rep | Poloha stanice: X=50.2051 m, Y=12.5119 m | Lokalizace: X=0 m, Y=0 m | Epicentrální vzdálenost: 52 m | Snímatek: Zapsal

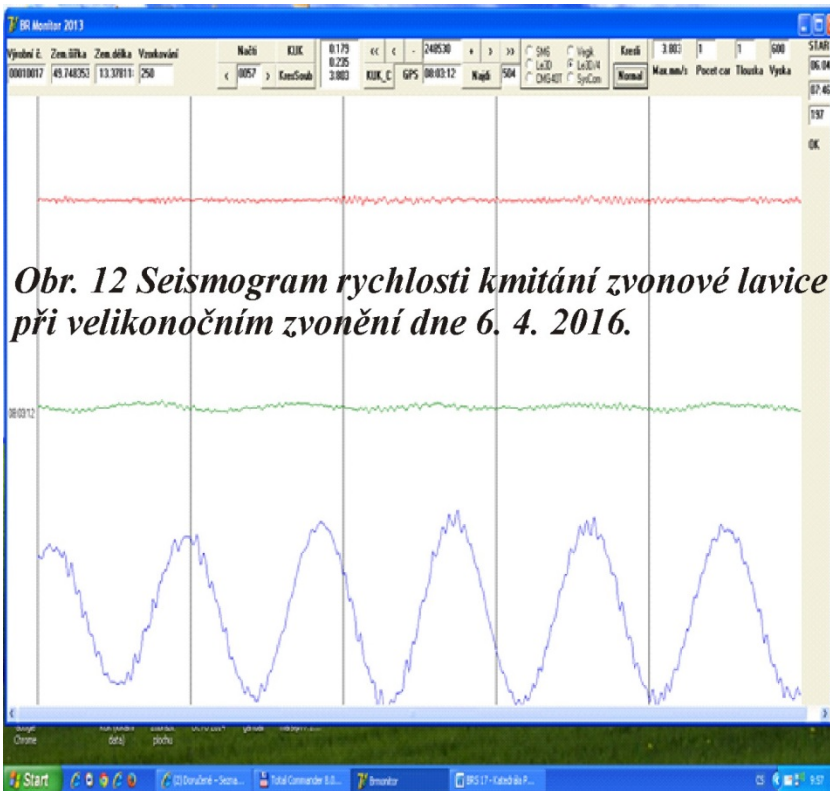
01.01.2015 00:00:00 | 06.04.2015 08:59:59

Obr. 10 Odezva zvonění na zdivo katedrály ve výšce 56 m – maximální hodnoty amplitud rychlosti kmitání byly zaznamenány na E složce a dosáhly hodnoty $V_e = 7,638$ mm/s





Obr. 11 Časový průběh seismických amplitud rychlosti kmitání při velikonočním zvonění všemi 5-ti zvony, maximální hodnota amplitud rychlosti v časovém úseku byla zaznamenána $V_e = 5,987 \text{ mm/s}$

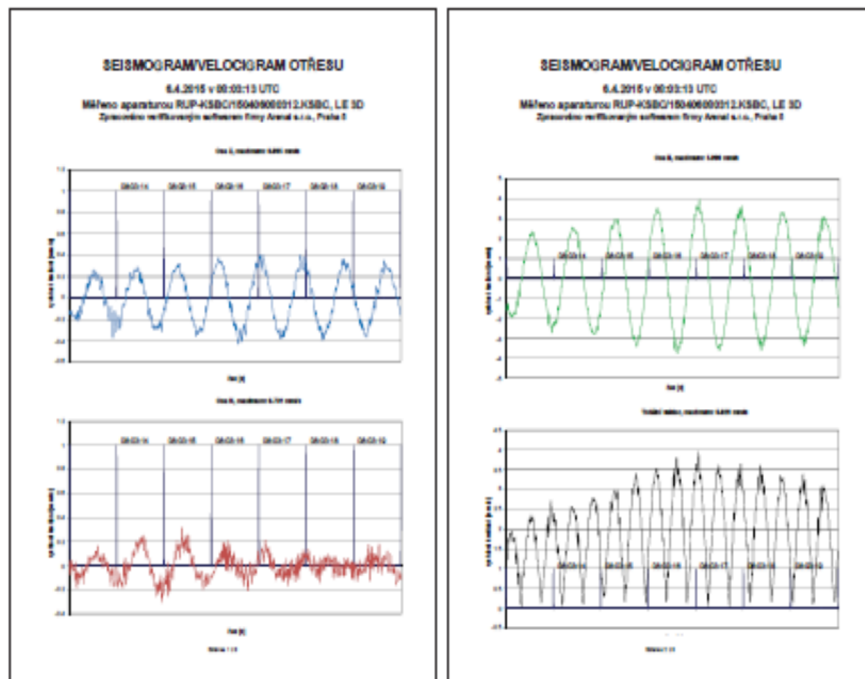


Obr. 12 Seismogram rychlosti kmitání zvonové lavice při velikonočním zvonění dne 6. 4. 2016.

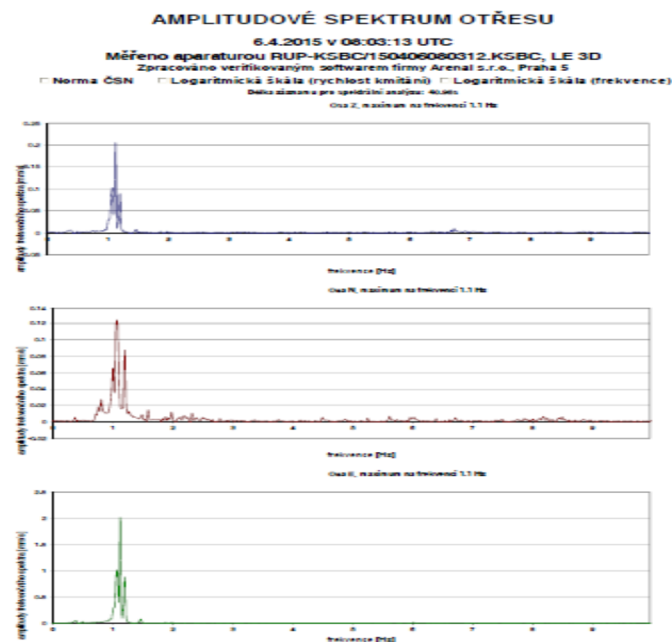
4 Vyhodnocení seismických účinků zvonění na stavbu věže katedrály sv. Bartoloměje

Pro posouzení vlivu kmitání zvonů na stavební konstrukci věže katedrály byla provedena vyhodnocení více než 15-ti časových úseků o délce cca 10 minut, ve kterých probíhalo během 6 měsíců zvonění všemi 5-ti zvony současně. Tato zvonění jsou prováděna při významných náboženských svátcích nebo výročích, při běžných zvonění je zvonění prováděno jedním nebo dvěma zvony. Při těchto zvoněních byly provedeny detailní analýzy seismických signálů a bylo shledáno, že tyto průběhy mají zcela podobné typické průběhy, které charakterizují vlastnosti stavební konstrukce věže katedrály. Na výše uvedeném Obr. 10 je zcela zřejmé, že časový průběh počátku a konce zvonění má obdobný charakter, který je charakterizován přenosem kmitů do hmoty věže.

Na základě provedených analýz průběhů amplitud rychlosti kmitání uvedených na Obr. 13 (příklad vibrací) a hlavně podle průběhů frekvenčních spekter horizontálních složek těchto signálů, uvedených na Obr. 14, jsme dospěli k jednoznačnému závěru, že kmity věže mají při zvonění shodnou frekvenci $f = 1,1 \text{ Hz}$, která především souvisí s vlastní frekvencí stavby.



Obr. 13 Seismogramy buzených kmitů věže



Obr. 14 FFT spektrum seismických kmitů

5 Závěr

Provedená seismická měření a jejich vyhodnocení prokázala, že osazení věže katedrály 5-ti zvony a jejich zvonění neovlivňuje nepříznivě historickou stavbu věže katedrály. Toto naše hodnocení zdůvodňujeme tím, že zvoněním na všechny zvony se vlastní kmitů věže katedrály nijak neliší od vlastních kmitů buzených jinými zdroji. Tímto můžeme tedy vyslovit závěr, že odezva stavby věže katedrály má lineární odezvu a že nevznikají kmitání, která by porušila elastické chování stavby. Do budoucna bychom však doporučili dlouhodobé sledování tohoto stavu, neboť opakováním tohoto zatěžování se mohou tyto závěry změnit. Zejména bychom doporučovali odpružení konstrukce zvonové stolice od stavby věže. Praktické zkušenosti popsané v příspěvku a v následných citacích literatury (Brož et al., 2008, Brož, Štrunc, 2015a, 2015b, Štrunc, Brož, 2007) jsou návodem na další možné aplikace těchto měřicích systémů v seismologických měřeních.

Literatura

- BROŽ, M., ŠTRUNC, J. Anomalous seismological effects of quarry blasts recorded during long-time monitoring periods. *Blasting Techniques 2015, Conference proceedings*, 2015a, 117-130, ISBN 978-80-970265-7-8.
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J. Měření indukované a technické seismicity polní aparaturou BRS 32. *Zpravodaj Trhací technika a pyrotechnika, 1/2015*, ČVTS, Společnost pro trhací techniku a pyrotechniku, Praha, 2015b, 19-30.
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., LINDA, M. *Seismický záznamník - Užitiný vzor č. 28 283* (9. 6. 2015)
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., SVATOŠ, J. Monitoring of seismic impact on historical buildings and their damage during building the tunnel Blanka. *Sborník konference Ostravice*, Ostrava, 2008, ISBN 978-80-86407-36-4.
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., MÁLEK, J., LINDA, M. New generation seismological datalogger BRS32-USB and its application in induced seismicity monitoring. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment (EGRSE), XXI. 1*, 2014a, 35-46, ISSN 1803-1447.
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., MÁLEK, J., LINDA, M. Measuring of induced and technical seismicity using portable apparatus BRS32, *Blasting Techniques 2014, Conference proceedings*, 2014b, 120-132, ISBN 978-80-970265-6-1.
- 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, 53-61. CD-ROM ISSN 1803-1447.
- PROCHÁZKA, J. a kol. *Stabilita historických objektů*. ČVUT Praha, 2011, 222 s., ISBN 978-80-01-04776-7.
- SOUKUP, J., HYNČIK, V. *Katedrála svatého Bartoloměje v Plzni*. Agentura David a Jakub, s.r.o. Plzeň, 2012, ISBN 978-80-260-3592-3.
- ŠTRUNC, M., BROŽ, M.: Seismické přístroje pro lokální měření a monitorovací sítě. *Trhací technika a pyrotechnika, zpravodaj 3/2007*, ČVTS - Společnost pro trhací techniku a pyrotechniku, 2007, Praha. 9-11.

Autoři:

¹ Geofyzikální ústav AV ČR, v.v.i., Praha 4, milan@ig.cas.cz

² ARENAL, s.r.o., Praha 5