

PŘÍKLADY ZEMĚTŘESENÍ ZAREGISTROVANÝCH V HLUBOKÉM DOLE

EXAMPLES OF EARTHQUAKES RECORDED IN DEEP MINE

Zdeněk Kaláb¹, Markéta Lednická²

Abstrakt

Obecně platí, že špičkové hodnoty kmitání vyvolané zemětřesením se snižují s hloubkou, tento pokles je rychlejší v mělkých vrstvách oproti hlubším vrstvám. Snížení amplitudy v závislosti na hloubce je ovlivněno velikostí magnituda zemětřesení a lokální geologickou stavbou. V Dole Rožná, jáma Bukov v hloubce 450 m byla realizována krátkodobá experimentální seismologická měření, při kterých bylo mimo jiné zaznamenáno také několik zemětřesení. V příspěvku jsou prezentovány záznamy zemětřesení z Otrokovice, Horní Plané, Klodzka, širšího okolí Vídně, maďarsko-slovenských hranic a západních Čech. Vlnové záznamy byly zpracovány v časové i frekvenční oblasti a poskytují informace pro hodnocení velikosti vyvolaných vibrací v daném místě.

Abstrakt

Generally, the peak values of vibrations generated by earthquakes decrease with depth; the decrease is faster in shallow layers compared with deeper parts. The amplitude decreasing as a function of depth is influenced by the earthquake magnitude and the local geological structure. Short-term experimental seismological measurements were performed in Rožná Mine (part Bukov) at depth 450 m and several regional earthquakes were also recorded. Wave patterns representing earthquakes from Czech Republic (Otrokovice, Horni Plana), Poland - Klodzko, Austria (wide surrounding of Vienna), boundary of Hungary and Slovakia, and West Bohemia are included as examples in this paper. Earthquake records were interpreted in time and frequency domains and results give us information for vibration effect evaluation at given place.

Klíčová slova

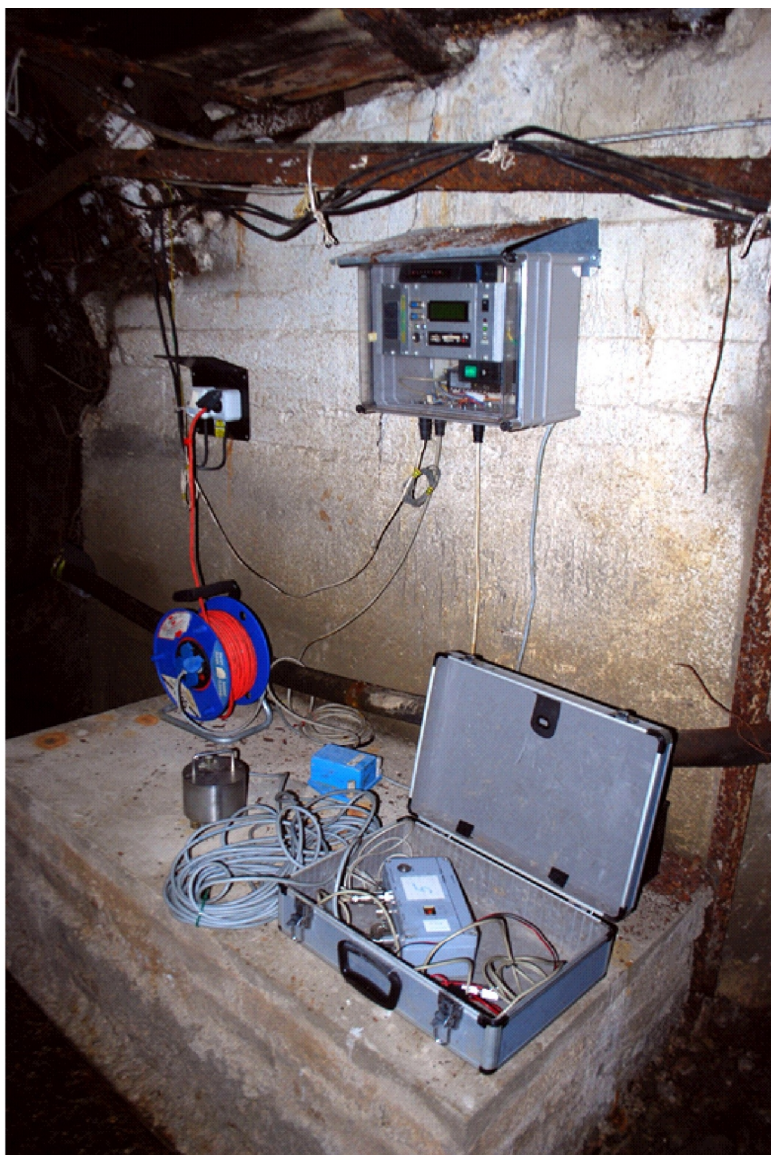
Seismologické měření, zemětřesení, hluboký důl, projev vibrací

Keywords

Seismological measurement, earthquake, deep mine, vibration effect

1 Úvod

Seismologické databáze, bulletiny a normy seismického zatížení uvažují hodnoty vibrací (posun, rychlost, zrychlení) na úrovni zemského povrchu hodnoceného místa. Obecně platí, že špičkové hodnoty vibrací vyvolané zemětřesením se snižují s hloubkou, tento



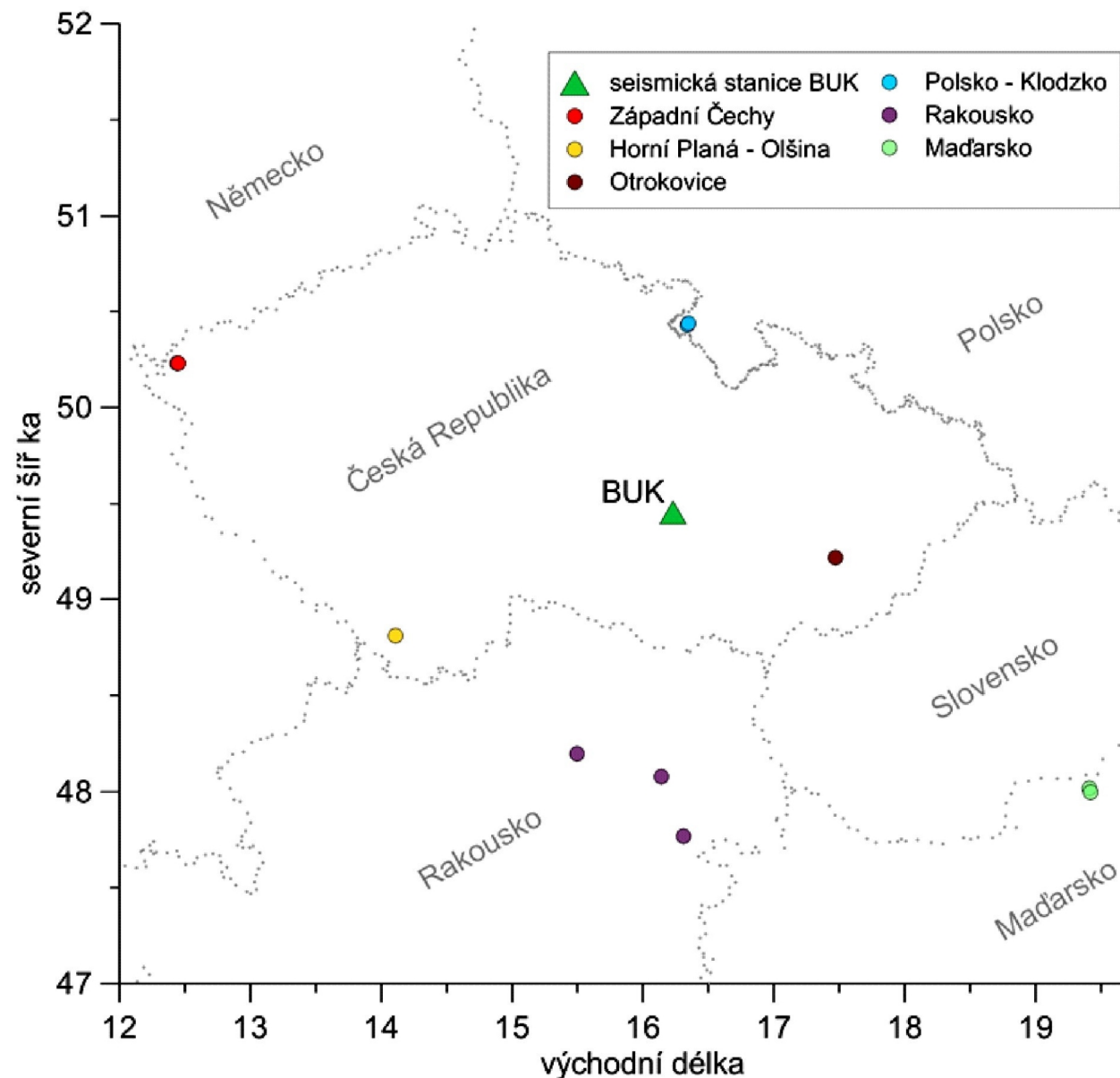
Obr. 1 Seismický pilíř s aparaturou PCM3-EPC se senzorem Le3D (aparatura zavěšena na stěně, projekt „Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov“) a s aparaturou GAIA Vístec se senzorem ViGeo2 (v kufru) během jednoho z testovacích měření (Foto: Lednická)

pokles je rychlejší v mělkých vrstvách oproti hlubším vrstvám. Pokles amplitudy v závislosti na hloubce může být ovlivněn velikostí magnitudy zemětřesení a lokální geologickou stavbou (např. Hu, Xie, 2004, Kaláb et al., 2015, Singh, 2002, Varnusfaderan et al., 2015). Získání informací o velikosti vibrací v hloubce má velký význam při hodnocení seismického zatížení podzemních objektů, jako jsou např. tunely, jeskyně, muzejní i těžené důlní prostory, podzemní zásobníky, hlubinná úložiště (např. Kaláb et al., 2015, Lednická, Kaláb, 2013, Szeidovitz et al., 2008, Wang et al., 2014). Proto jsou studovány vlastnosti záznamů jevů různého typu, aby bylo možno zpřesňovat aproximace/interpolace vibrací naměřených na povrchu do hloubky.

Cílem tohoto článku je prezentovat několik záznamů regionálních zemětřesení, která byla zaznamenána v Dole Rožná, jáma Bukov, ložisko Rožná. Seismická stanice (BUK) byla situována v hloubce cca 450 m (Obr. 1), dokladuje tedy projev vibrací v podzemí. Ve jmenovaném dole bylo v letech 2013 – 2016 realizováno několik krátkodobých experimentálních seismologických měření, při nichž byl seismometr instalován na betonovém seismickém pilíři. Tento pilíř byl pracovníky dolu (DIAMO, s. p., o. z. GEAM) vybudován pro účely střednědobého seismologického monitoringu. Později byl pilíř využit i pro monitorování seismického efektu trhacích prací používaných při výstavbě podzemního výzkumného pracoviště, které je budováno v hloubce 600 m pod povrchem (projekt Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov, SÚRAO). Cílem uvedených krátkodobých experimentálních měření bylo testování aparatur a senzorů s různým frekvenčním rozsahem a registrace zemětřesení byla „šťastná náhoda“. Vybrána byla zemětřesení, jejichž epicentra jsou lokalizována na území České republiky a v nejbližších okolních státech, jako je Rakousko, Polsko a Maďarsko.

Ložisko Rožná se nachází na sv. okraji strážeckého moldanubika, v rudním poli Rožná – Olší. Jemnozrnné až středně zrnité biotitické pararuly s různě výrazně vyvinutou planární stavbou a jejich migmatitizované ekvivalenty jsou nejhojnějšími horninami ložiska Rožná. Okolními horninami ložiska jsou převážně biotitické a amfibol-biotitické pararuly, polohy amfibolitů, vložky erlanových rul, mramorů, kvarcitů a budiny serpentinitů a pyroxenitů (podle Kříbek et al., 2005).

2 Aparaturní vybavení a přehled zaznamenaných zemětřesení



Obr. 2 Poloha epicenter vybraných regionálních zemětřesení (viz Tab. 1) a lokalizace seismické stanice v Dole Rožná (trojúhelník, BUK)

Seismická stanice (označená BUK) byla umístěna v části Dolu Rožná, jáma Bukov, kde již neprobíhá těžba. Stanice byla situována na 9. patře dolu poblíž jámy, a to ve vzdálenosti cca 30 m od ní. Ke snímání vibrací během experimentálních měření byl instalován třísložkový rychlostní snímač ViGeo2 s vlastní frekvencí snímače 2 Hz a horní mezní frekvencí 200 Hz. Jedna složka byla vertikální (označena Z); zbývající dvě byly horizontální a byly orientovány přibližně do směru geografických os (sever-jih označené N a východ-západ označené E). Toto označení je použito i při popisu vlnových obrazů zaznamenaných seismických jevů. Senzor byl kabelem připojen k aparatuře GAIA firmy VISTEC, Praha. Aparatura poskytuje kontinuální záznam seismických dat, přičemž byla nastavena vzorkovací frekvence digitálního záznamu 250 Hz. Časová informace byla odvozena ze signálu interních hodin, který byl pouze na začátku měření synchronizován časovým normálem GPS. Pouze při záznamu zemětřesení v roce 2016 (viz níže) byl použit třísložkový rychlostní senzor typu Le3D (aktivní geofon - výrobce Lennartz Electronic GmbH, Tuebingen, Německo). Jeho vlastní frekvence je 1 Hz, horní mezní frekvence je 80 Hz.

Pro účely této studie byla vybrána regionální zemětřesení, jejichž epicentrum se nachází na území České republiky nebo v jeho blízkém okolí. Nejsou zahrnuty záznamy důlně indukovaných jevů, které mají ohniska v oblasti Karvinska, polské části Hornoslezské pánve a Lubinu. Tyto indukované jevy mají podobnou epicentrální vzdálenost, ale jejich

mechanismus vzniku, a tedy i charakter záznamu, je odlišný od přirozených zemětřesení. Celkem bylo použito 12 záznamů zemětřesení (Tab. 1, Obr. 2), přičemž nejbližší epicentrum bylo v Otrokovicích (84 km), nejvzdálenější pak v oblasti západních Čech a v Maďarsku (286 km). Zdrojové parametry jednotlivých zemětřesení jsou upraveny a jsou převzaty z databáze České regionální seismické sítě (ČRSS - <http://www.czechgeo.cz/>), kterou vytváří pracovníci Geofyzikálního ústavu AVČR Praha (GFU). Kromě vlastních dat ČRSS jsou využity i údaje získané ze západočeské sítě WEBNET (IG, 1991), na brněnském Ústavu fyziky Země MU (IPE – www.ipe.muni.cz) a na dalších evropských seismologických centrech (např. EMSC - <http://www.emsc-csem.org/#2>). Zaznamenaná zemětřesení mají magnituda (typ magnituda a zdroj je označen v Tab. 1) v rozmezí 1,5 až 4,4.

Tab. 1 Souhrnný přehled zdrojových parametrů zpracovaných zemětřesení (sestaveno z údajů databáze České regionální seismické sítě) a naměřené maximální hodnoty rychlosti kmitání pro jednotlivé složky na stanici BUK. Vysvětlivky: čas (UTC) – světový čas, lat – severní šířka, lon – východní délka, hloubka – hloubka hypocentra v [km], vzd – epicentrální vzdálenost v [km], magnitudo – hodnoty magnituda podle různých zdrojů (uveden v závorce), PGV – maximální složkové rychlosti kmitání naměřené stanicí BUK v [mm.s⁻¹]

datum	čas (UTC)	lat	lon	hloubka [km]	vzd [km]	magnitudo		PGV [mm.s ⁻¹]		
								Z	N	E
11. 12. 2013	17:14	47,77	16,31	2	188	ML = 3,1 (EMSC)	Rakousko	0,001650	0,002500	0,002150
24. 12. 2013	21:28	48,81	14,11	1	171	ML = 1,5 (IPE)	Horní Planá – Olšina	0,000247	0,000318	0,000375
31. 12. 2013	07:22	50,43	16,34	3	109	ML = 2,5 (GFU)	Polsko – Klodzko	0,001853	0,002389	0,001904
4. 1. 2014	10:30	50,44	16,35	2	110	ML = 2,2 (GFU)	Polsko – Klodzko	0,001157	0,001636	0,001172
7. 1. 2014	03:19	49,22	17,47	17	94	ML = 1,8 (IPE)	Otrokovice	0,000875	0,001252	0,001050
19. 1. 2014	01:34	48,02	19,41	10	284	mb = 4,2 (EMSC)	Maďarsko	0,001493	0,001785	0,001850
19. 1. 2014	01:48	48,00	19,42	10	285	Mag = 3,3 (EMSC)	Maďarsko	0,000199	0,000229	0,000256
17. 3. 2014	20:33	48,20	15,50	2	150	ML = 3,0 (EMSC)	Rakousko	0,006350	0,007950	0,007900
24. 5. 2014	14:35	50,23	12,45	9	285	ML = 3,5 (WEBNET)	Západní Čechy	0,004750	0,004300	0,004350
31. 5. 2014	10:37	50,23	12,44	9	286	ML = 4,4 (WEBNET)	Západní Čechy	0,022200	0,024350	0,022300
3. 8. 2014	23:58	50,23	12,45	9	285	ML = 3,6 (WEBNET)	Západní Čechy	0,004450	0,004300	0,003600
25. 4. 2016	10:28	48,08	16,14	8	153	ML = 4,1 (EMSC)	Rakousko – pocítěno na jižní Moravě	0,095950	0,086650	0,104250

Příklady seismogramů pěti zemětřesení jsou na Obr. 3 – 7. Zvolena byla zemětřesení, pro která je možno identifikovat příchod P-vlny. Výjimku tvoří záznam zemětřesení ze západních Čech, na kterém nebyl zaznamenán nástup P-vlny. Aby byly seismogramy dobře čitelné, nejsou časové osy na obrázcích ve stejném měřítku, na časové ose je uveden pouze relativní čas, neboť časový signál nebyl opravován na přesnou hodnotu (viz výše). Na Obr. 8 jsou výsledky spektrální analýzy záznamů zemětřesení z obrázků 3 až 7, amplitudová spektra byla spočtena pomocí FFT a jsou vyhlazena. Na spektrech záznamů zemětřesení z Klodzka a Otrokovice jsou zřetelné významnější píky pro spektra N složek, a to o hodnotách postupně 7 Hz a 4 Hz. Záznam rakouského zemětřesení má ve spektrech všech tří složek významnější píky v rozmezí hodnot 4 až 5 Hz. Ve spektrech nejvzdálenějších zemětřesení jsou detekovatelné významnější píky v rozmezí hodnot 1 – 2 Hz (Maďarsko – Z a E složka, západní Čechy – Z a N složka). U spekter zbývajících složek lze detekovat pouze méně významné frekvenční píky.

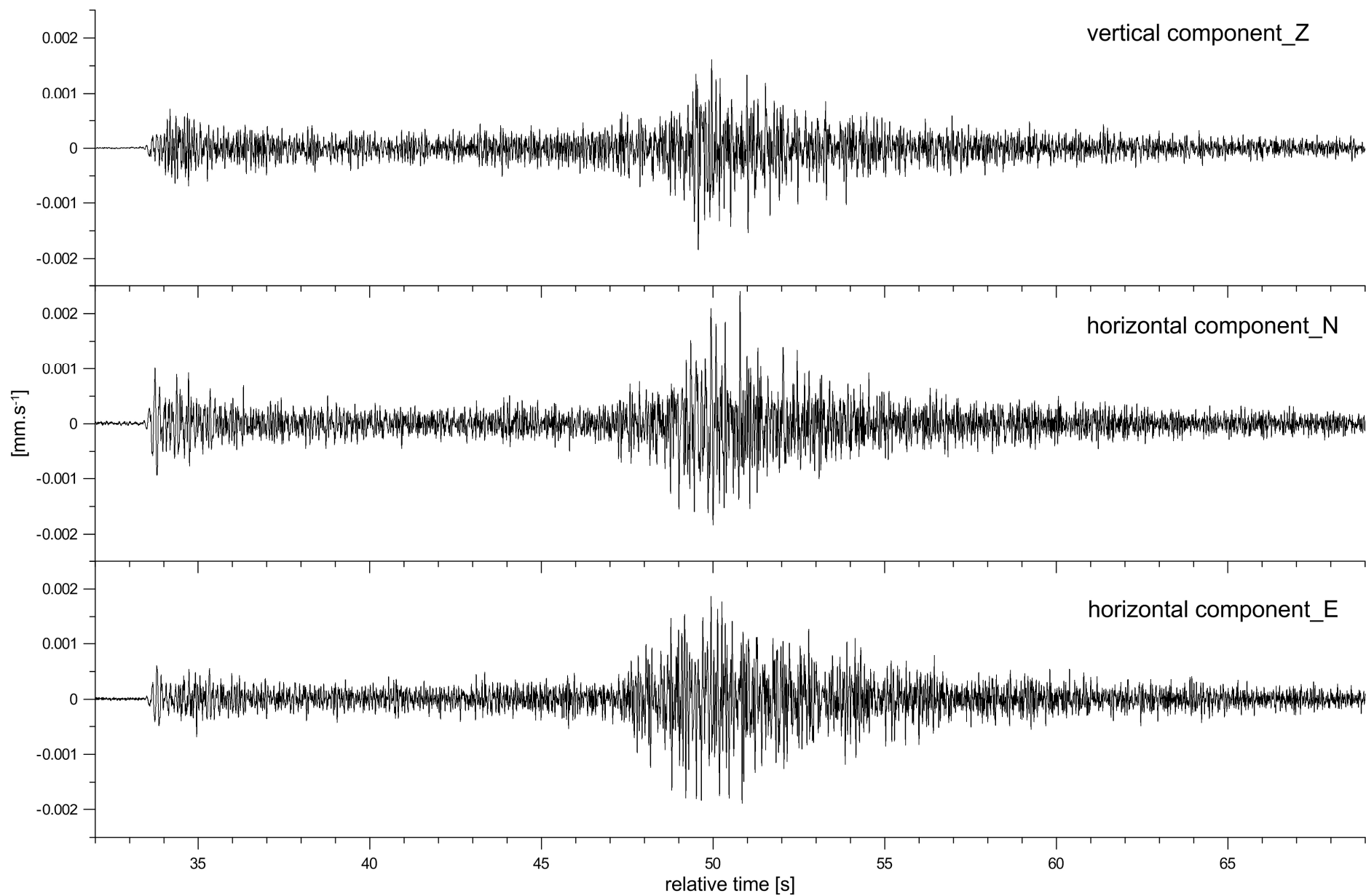
3 Interpretace maximálních hodnot rychlosti kmitání

K hodnocení projevů uvedených zemětřesení byla z časových záznamů (seismogramů) odečtena maximální hodnota rychlosti kmitání pro jednotlivé složky. Pro rychlou představu o velikosti vibračních projevů v důlním díle byly získané hodnoty vyneseny do grafu na Obr. 9 (jsme si vědomi skutečnosti, že jednotlivé typy magnitud nejsou plně srovnatelné, ale z použitých databází nebylo možno získat magnituda zpracovaná jednotnou metodikou). Jednotlivá zemětřesení jsou identifikovatelná z hodnoty magnitudy uvedeného v Tab. 1 a též podle barevného značení zdrojových oblastí. Pro stanovení závislosti PGV na magnitudu pro jednotlivé zdrojové oblasti (tj. podobné epicentrální vzdálenosti a stejný směr ohnisko – registrační místo) by bylo nutné mít ke zpracování větší soubor dat.

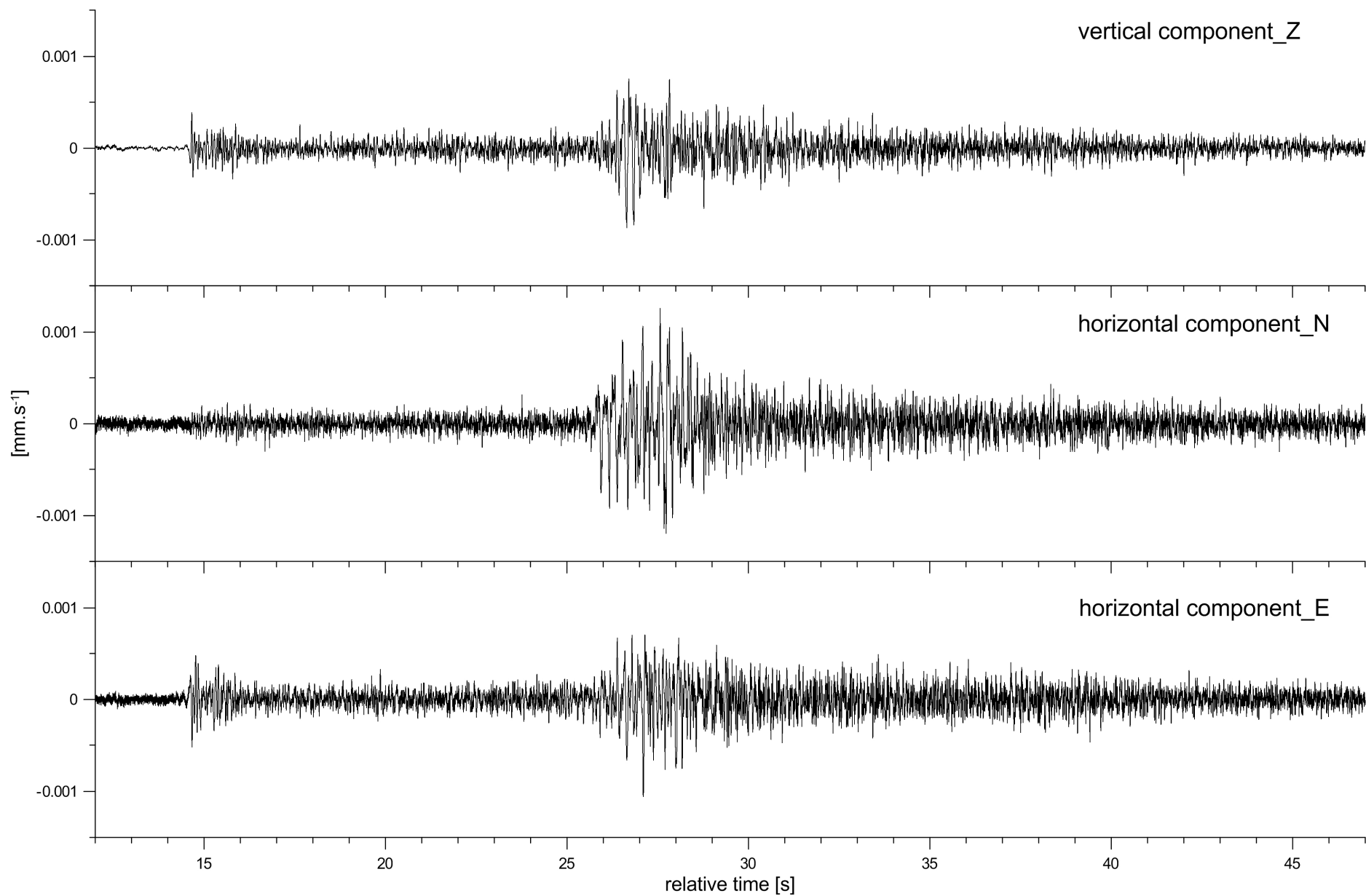
Z grafu lze nicméně vyznat podstatný rozdíl v zaznamenaném vibračním projevu pro zemětřesení ze zdrojové oblasti v západních Čechách a ze zdrojové oblasti v Maďarsku, i když epicentrální vzdálenost obou zmiňovaných zdrojových oblastí je téměř totožná (284 – 286 km). Lze předpokládat, že tento rozdílný vibrační efekt na monitorované lokalitě může být důsledkem rozdílné lokální geologie zdrojových oblastí. Západní Čechy náleží k zóně Českého masivu (hercynské vrásnění), zatímco druhá zdrojová oblast náleží k alpské zóně.

4 Závěr

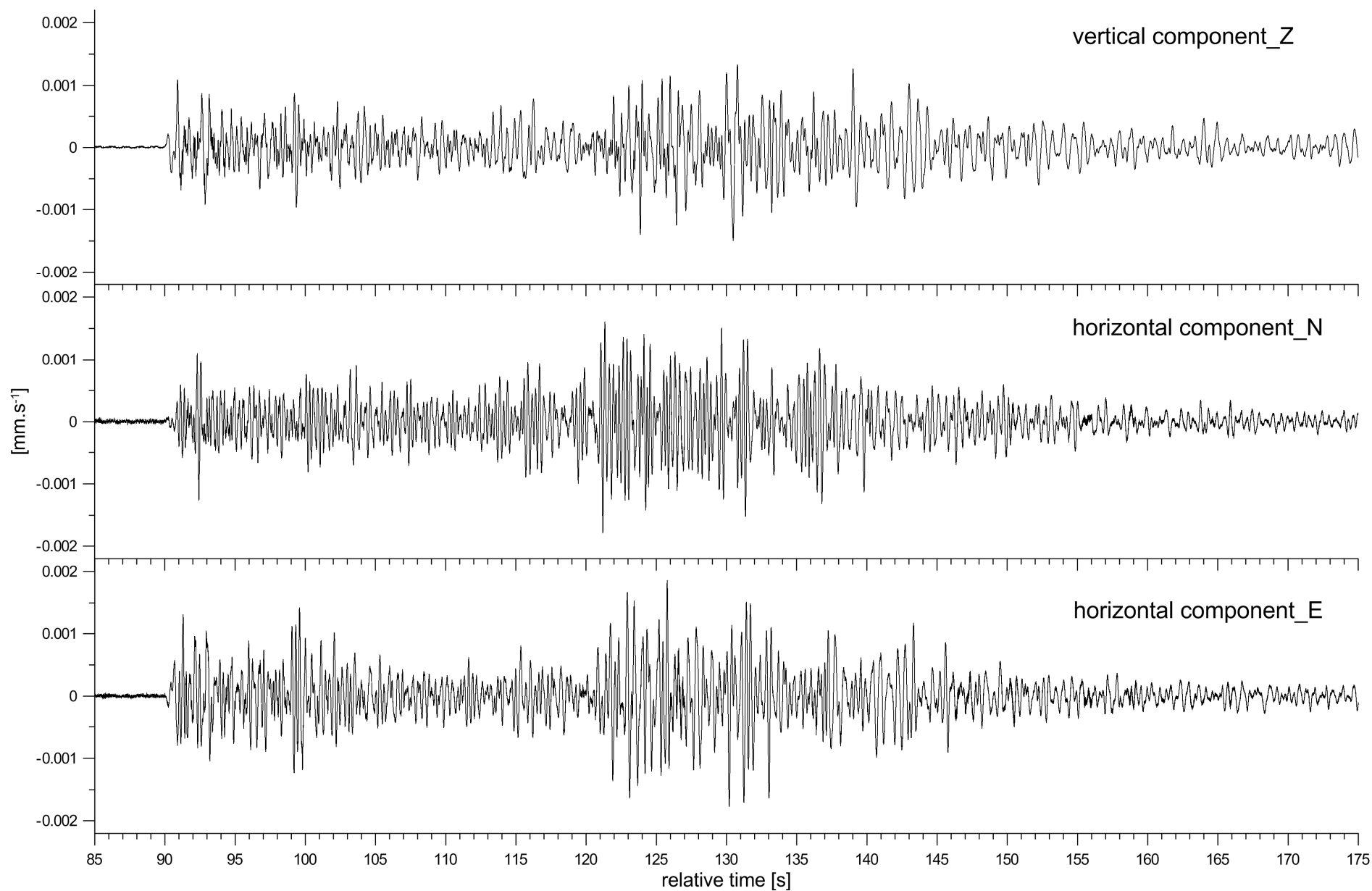
Cílem příspěvku bylo představit charakter záznamů regionálních zemětřesení, které byly pořízeny na seismické stanici umístěné v Dole Rožná, jáma Bukov v hloubce cca 450 m. Výsledek naznačuje, že pro posuzování seismického zatížení v podzemních prostorách je nutný dlouhodobý monitoring, a to zvláště v oblastech se slabou seismickou aktivitou. Největší zaznamenané vibrace byly vyvolány během zemětřesení s epicentrem v okolí Vídně (25. 4. 2016, ML 4,1), při němž složková amplituda dosáhla hodnoty $0,1 \text{ mm.s}^{-1}$. Převládající frekvence vyvolaného kmitání byla v rozmezí 4 až 5 Hz. Z makroseismických hlášení uvedených na seismologických webových stránkách je dokladováno pocítění účinků tohoto zemětřesení také na území České republiky, a to především v kraji Jihomoravském a kraji Vysočina. Několik hlášení pochází také z blízkého okolí Dolu Rožná.



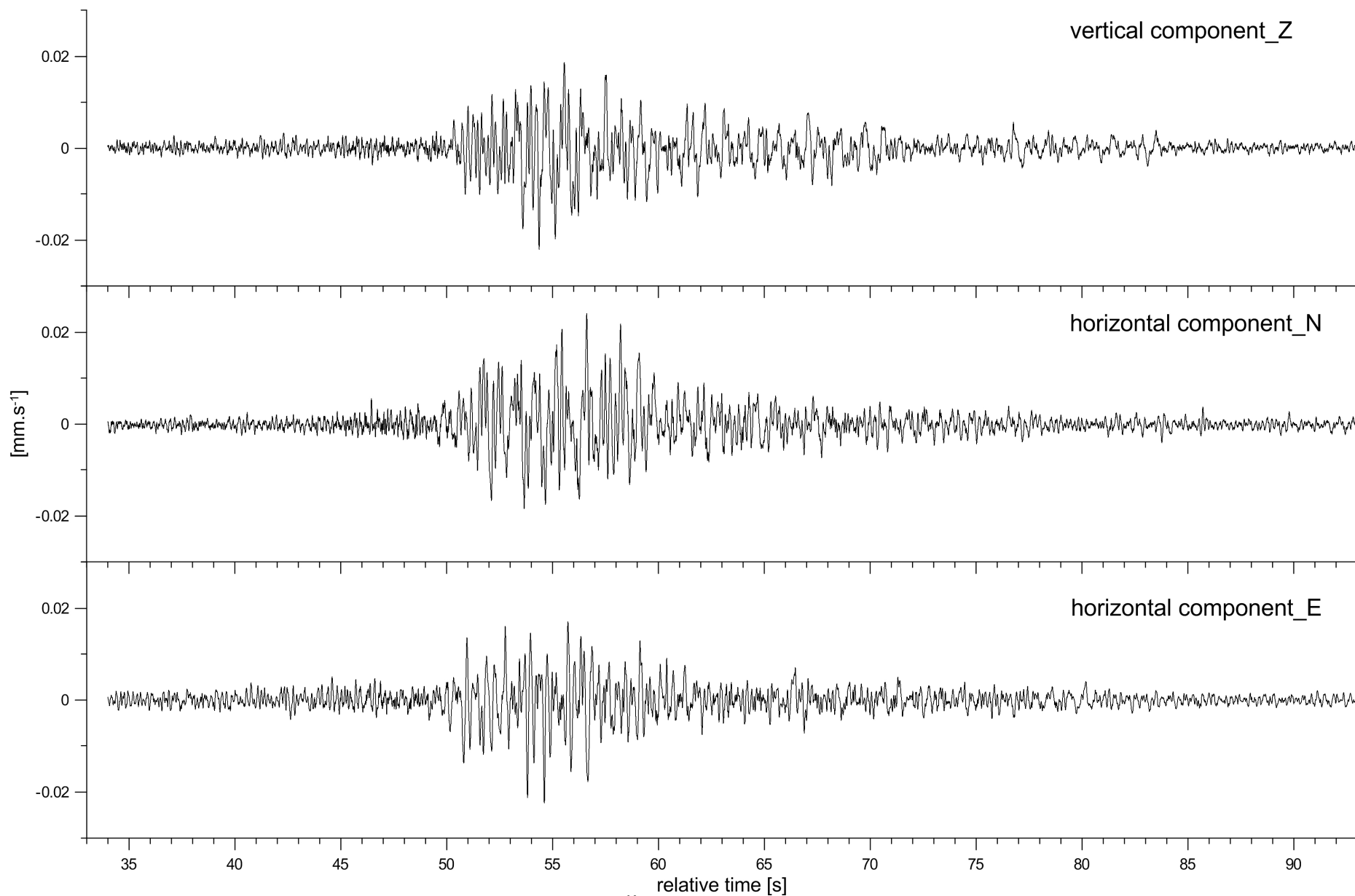
Obr. 3 Seismogram zemětřesení z 31. 12. 2013 (Polsko - Kłodzko), parametry v Tab. 1. (na vodorovné ose je relativní čas)



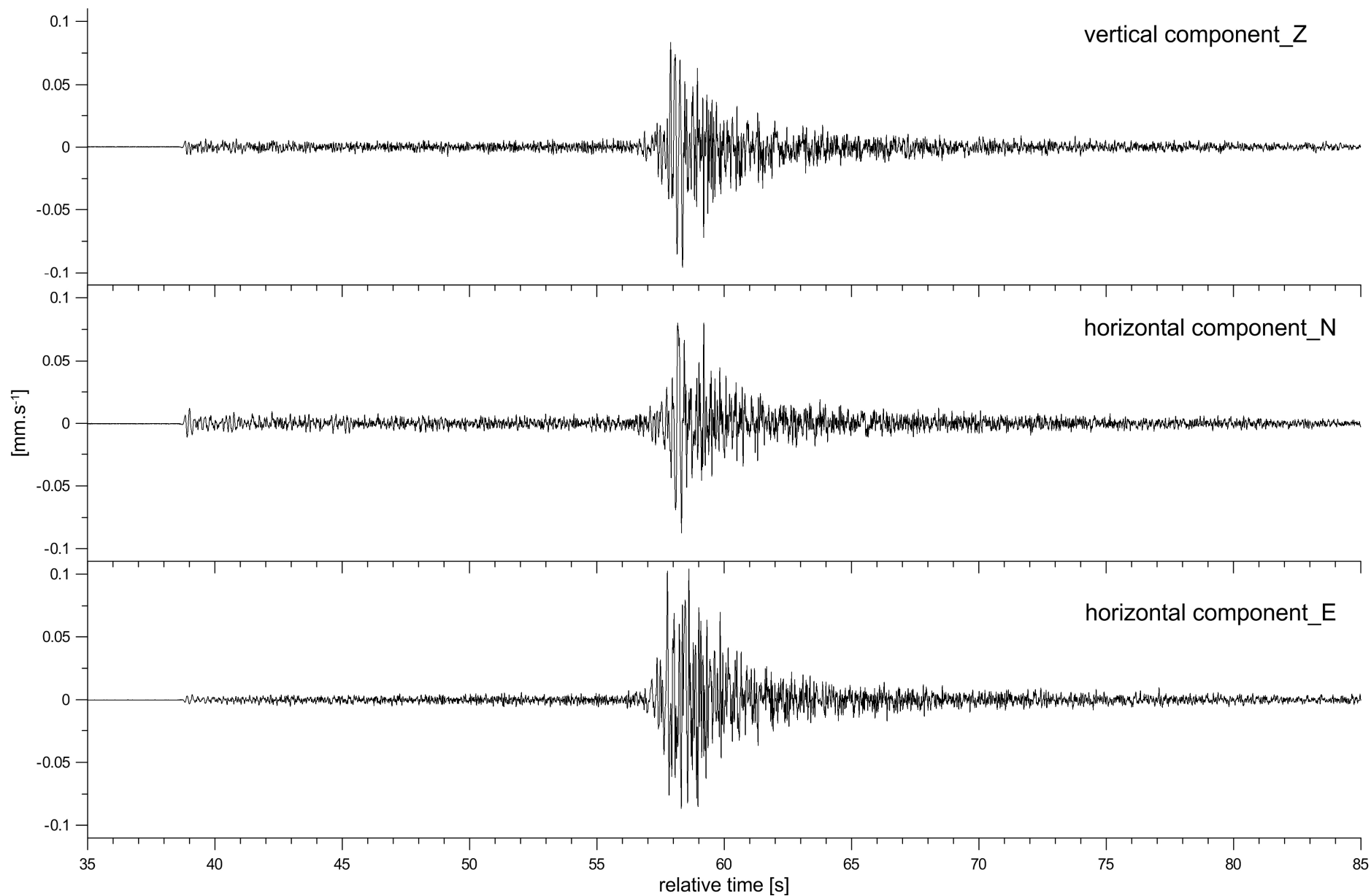
Obr. 4 Seismogram zemětřesení ze 7. 1. 2014 (Otrokovice), parametry v Tab. 1. (na vodorovné ose je relativní čas)



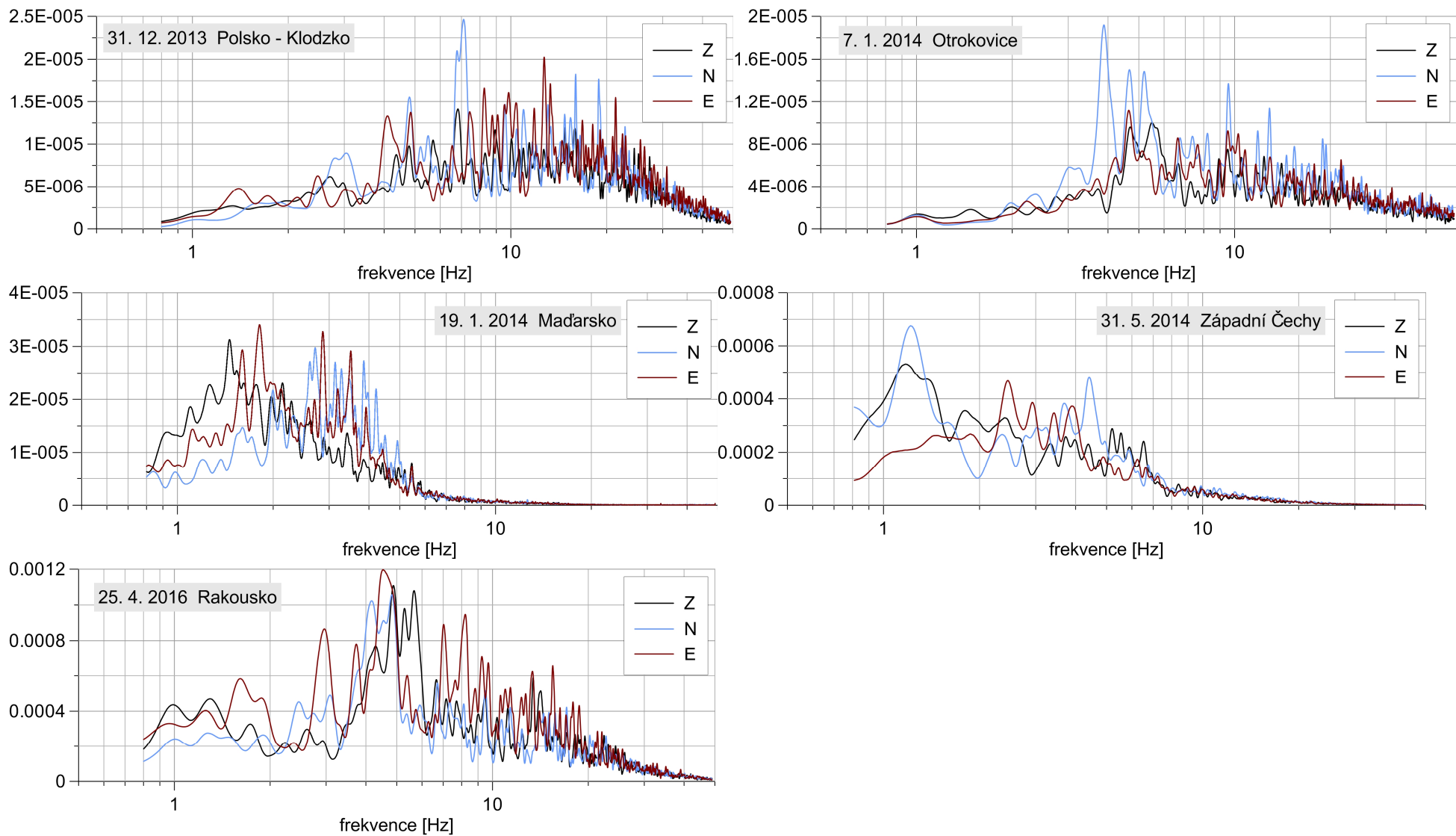
Obr. 5 Seismogram zemětřesení z 19. 1. 2014 (Maďarsko), parametry v Tab. 1. (na vodorovné ose je relativní čas)



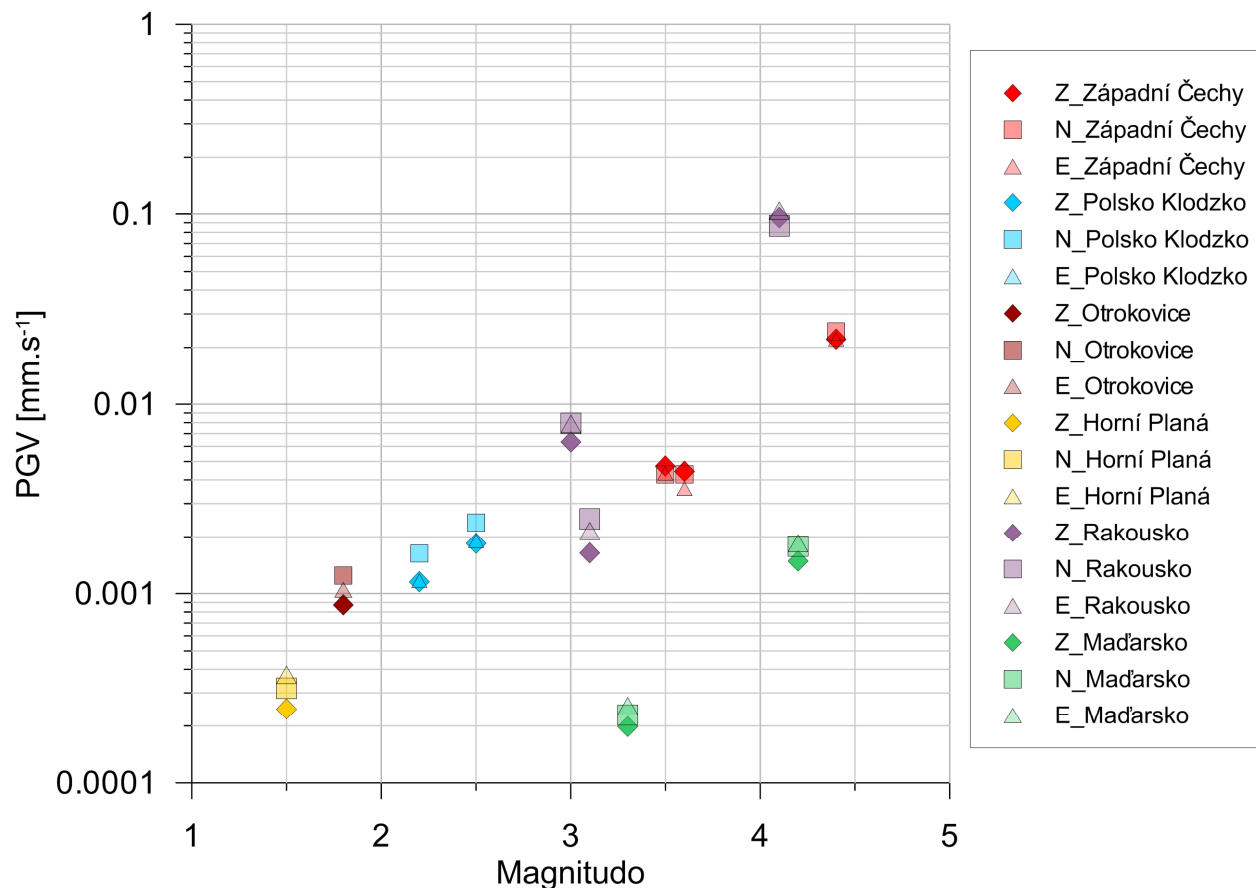
Obr. 6 Seismogram zemětřesení z 31. 5. 2014 (západní Čechy), parametry v Tab. 1. (na vodorovné ose je relativní čas)



Obr. 7 Seismogram zemětřesení z 25. 4. 2016 (Rakousko), parametry v Tab. 1., (na vodorovné ose je relativní čas)



Obr. 8 Amplitudová spektra (FFT) pro zemětřesení uvedené na Obr. 3 – 7



Obr. 9 Hodnoty maximální složkové rychlosti kmitání PGV [mm.s⁻¹] pro zpracovaná zemětřesení

Poděkování

Příspěvek je zpracován s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO: 68145535 a projektu *CzechGeo/EPOS LM2015079*. Autoři příspěvku děkují pracovníkům DIAMO, státní podnik, o.z. GEAM za spolupráci, jmenovitě Ing. Petru Křížovi, Ph.D. a Mgr. Jiřímu Vorlovi.

Literatura

- HU, J., XIE, L. Variation of earthquake ground motion with depth. *Acta Seismologica Sinica*, 18, 1, 2004, 72-81, DOI: 1000-9116(2004)01-0072-10.
- KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., KNEJZLÍK, J., KALÁB, T. Deset let geotechnických studií v Dole Jeroným. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment (EGRSE)*, Vol. XXII., 1, 2015, 1-9. CD-ROM ISSN 1803-1447.
- KALÁB, Z., ŠÍLENÝ, J., LEDNICKÁ, M., JECHUMTÁLOVÁ, Z. (2015): *Seismic stability of DGR potential sites*. Technical report 26/2015/eng, Institute of Geonics of the CAS, v.v.i. and Institute of Geophysics of the CAS, v.v.i., Ostrava and Prague, 108 p.
- KŘÍBEK, B., LEICHMANN, J., RENÉ, M., HOLECZY, D. <http://www.geology.cz/1919/historie/publikace/2005-uran-web.pdf>, 2005, staženo 1. 9. 2016.
- LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z.: Vibration effect of earthquakes in abandoned medieval mine. *Acta Geod Geophys.*, Vol. 48, Issue 3, 2013, 221-234. DOI: 10.1515/ACGEO-2016-0085.
- SINGH P.K. Blast vibration damage to underground coal mines from adjacent open-pit blasting. *Int J Rock Mech Min Sci.*, 39, 2002, 959–973.
- SZEIDOVITZ, G., PASKALEVA, I., GRIBOVSKI, K., KOSTOV, K., SURANY, G., VARGA, P. NIKOLOV, G. Estimation of an upper limit on prehistoric peak ground acceleration using the parameters of intact speleothems in caves situated at the western part of Balkan Mountain range, North-West Bulgaria. *Acta Geod. Geophys. Hu.*, Vol. 43, No. 2-3, 2008, 249-266, DOI: 10.1556/AGEOD.43.2008.2-3.13.
- VARNUSFADERANI, M.G., GOLSHANI, A., NEMATI, R. Behavior of circular tunnels crossing active faults. - *Acta Geodyn. Geomater.*, 12, 4 (180), 2015, 363–376. DOI: 10.13168/AGG.2015.0039
- WANG, T., YANG, CH., YAN, X., LI, Y., LIU, W., LIANG, CH., LI, J. Dynamic response of underground gas storage salt cavern under seismic loads. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 2014, 241–252.
- Institute of Geophysics, Academy of Sciences of the Czech Republic (1991): West Bohemia Local Seismic Network. International Federation of Digital Seismograph Networks. Other/Seismic Network. doi:10.7914/SN/WB.

Autoři:

¹ prof. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, kalab@ugn.cas.cz

² Ing. Markéta Lednická, Ph.D. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, lednicka@ugn.cas.cz