



**EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SEISMICKÉ RYCHLOSTI V PROSTORECH PODZEMNÍHO
VÝZKUMNÉHO PRACOVIŠTĚ BUKOV**

**EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF SEISMIC VELOCITY IN SPACES OF THE BUKOV
UNDERGROUND RESEARCH FACILITY**

Kaláb Zdeněk¹, Lednická Markéta²

Abstrakt

Podzemní výzkumné pracoviště Bukov je lokalizované v hloubce 550 metrů pod povrchem v katastru obce Bukov na Vysočině. Slouží jako testovací lokalita pro získání dat o chování horninového prostředí v předpokládané hloubce budoucího hlubinného úložiště. Zároveň je určeno i pro in-situ testy materiálů zvažovaných pro konstrukci inženýrských bariér.

Článek popisuje experimentální měření seismické rychlosti v podzemních prostorech zmiňovaného pracoviště. Zdrojem vibrací byla trhací práce realizovaná při dokončování ražby. Výsledky měření dokládají v souladu s geologií průchod přes poruchovou zónu se sníženými hodnotami rychlosti a byla dopočtena také rychlost ve vertikálním směru.

Abstract

The Bukov Underground Research Facility is located at a depth of 550 metres below the earth's surface, serves as a test site for the Radioactive Waste Repository Authority with respect to the assessment of the behaviour of the rock environment and building materials at a depth corresponding to that anticipated for the future deep geological repository for spent nuclear fuel and radioactive waste.

The article describes the experimental measurement of the seismic velocity in the underground spaces of the mentioned workplace. The source of the vibration was blasting carried out during the excavation. In accordance with geology, the measurement results show the passage through the fault zone with reduced velocity values and the velocity in the vertical direction was also calculated.

Klíčová slova

Podzemní výzkumné pracoviště Bukov, seismická rychlost, podzemní prostory, trhací práce

Keywords

Bukov Underground Research Facility, seismic velocity, underground spaces, blasting

1. Úvod

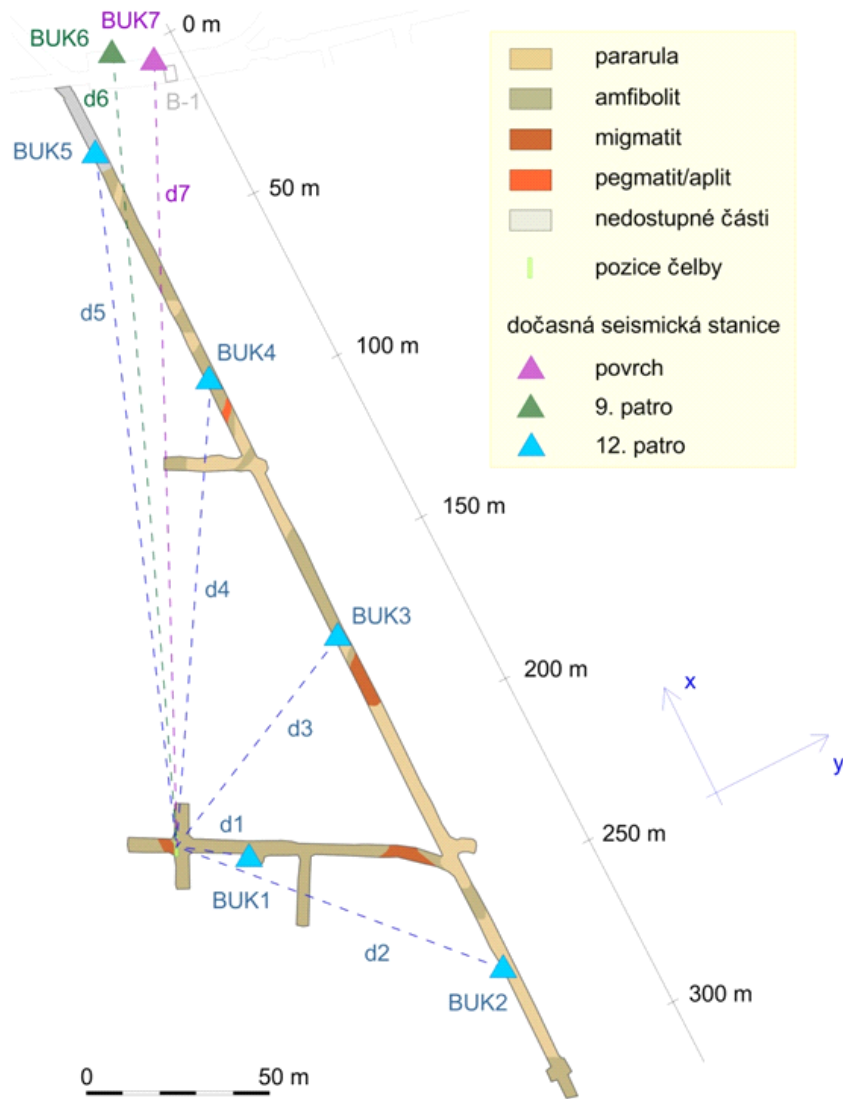
V období XI./2013 – VI./2016 probíhalo na úseku Bukov v důlním poli Rožná (DIAMO s.p., o.z. GEAM, Dolní Rožínka) měření vibračních projevů trhacích prací vyvolaných ražbou důlních děl pro experimentální laboratoř Podzemního výzkumného pracoviště Bukov (PVP Bukov; Souček et al., 2016, WEB1). Spouštěná registrace vibrací vyvolaných při trhacích pracích na ražbě PVP Bukov byla funkční po celou dobu sledovaného období (Kaláb et al., 2014, Verner et al., 2015). Během ní bylo na trvalé seismické stanici, umístěné na 9. patře dolu poblíž jámy B-1, zaregistrováno téměř 350 záznamů trhacích prací souvisejících s realizací PVP Bukov; dále byly zaznamenány mj. trhací práce z Dolu Rožná 1 a velké množství většinou neidentifikovatelných vibrací vyvolaných provozem dolu. Během uvedeného seismického měření nebyly v dané lokalitě zaregistrovány žádné přirozené, ani důlně indukované seismické jevy, a to ani jako samostatný vibrační projev nebo jako následek po trhací práci (např. Souček et al., 2018).

Po vyražení větší části podzemních prostorů pro PVP Bukov bylo realizováno experimentální seismické měření. Zdrojem seismického impulzu byla trhací práce ze dne 17. 3. 2016, která byla součástí technologie ražebních prací (jednalo se o běžné technologické schéma – 45 kg Perunitu a 96 rozbušek). Trhací práce, kromě svého hlavního účelu (rozpojování hornin), bývají využívány také jako zdroj vibrací; teorii šíření seismických vln vyvolaných výbuchem lze nalézt v řadě publikací (např. Pijush, 2005, Pandula a Kondela, 2010).

Seismická stanoviště, určená pro experimentální měření (označená BUK1 – BUK5), byla rozmístěna na hlavní přístupové štole na 12. patře dolu (BZ-XIII), další stanoviště bylo na 9. patře (BUK6, na betonovém pilíři, na němž byl seismometr trvalé seismické stanice) a jedno bylo situováno na povrchu (BUK7). Poslední dvě stanoviště byla umístěna v blízkosti fárací jámy B-1. Cílem tohoto experimentu bylo získat hodnotu rychlosti šíření seismických vln v proměřované části horninového masivu (např. Souček et al., 2018). Na rozdíl od seismické tomografie, která poskytuje informace o seismické rychlosti v bezprostřední blízkosti měřeného profilu nebo vrtu (např. Bláha, 1996), toto experimentální měření postihuje masiv jako celek.

2. Metodika měření a aparatury

Experimentální měření bylo provedeno seismickými aparaturami typu GAIA, které vyrábí firma VISTEC Praha. Před měřením byly na povrchu aparatury spuštěny do kontinuálního záznamu dat a byl synchronizován interní čas v aparaturách pomocí připojené antény GPS (nelze použít tento druh synchronizace v důlním díle). Třísložkové snímače rychlosti kmitání typu ViGeo a Lennartz byly ustaveny na malou plochu na povrchu a bylo provedeno několik impulzů (úder kladiva v okolí), aby bylo možno stanovit časové aparaturní korekce.



Obr. 1 Schématické znázornění rozmístění stanovišť při experimentálním měření projevů trhací práce při ražbě PVP Bukov pro účely stanovení seismické rychlosti v horninovém prostředí (schéma vyražených prostor PVP Bukov se zakreslenou geologickou stavbou bylo sestaveno podle Bukovská et al., 2019)

Vzhledem k „malé vzdálenosti rozmístěných senzorů při experimentu v důlním díle“ je nezbytné realizovat časovou synchronizaci velmi přesně. I malé nepřesnosti odečtu času způsobí velké nepřesnosti v následném výpočtu seismické rychlosti.

K určení seismické rychlosti je nutné znát dobu šíření seismického vzruchu a k tomu je nutno především stanovit co nejpřesněji dobu odstřelu. Proto bylo jedno měřicí stanoviště zřízeno v nejbližší možné bezpečné vzdálenosti od čelby (z pohledu poškození aparatury). Zmíněné stanoviště bylo zřízeno ve výklenku cca 20 m od místa odstřelu. Po dopočítání seismické rychlosti z časů příchodu na dvě nejbližší stanoviště byl dopočítán přesný čas odstřelu – 10:45:19,7568 SEČ. S výjimkou uvedeného nejbližšího stanoviště byla ostatní stanoviště rozmístěna na hlavní přístupové štolě BZ-XIII na 12. patře. Senzory nemohly být umístěny na rostlé hornině, ale byly uloženy do mělkých jamek vyhrabaných v horninové drti. Tento fakt je mj. důvodem, proč není možno stanovit útlumové parametry masivu. Dalšími důvody je použití různých senzorů s různou vlastní frekvencí a také maximální vzorkovací frekvence záznamů digitálního signálu 500 Hz není pro stanovení útlumu v dané situaci postačující. Vodorovná složka X všech instalovaných seismických snímačů byla orientována ve směru hlavní štolky BZ-XIII (obr. 1).

Vzdálenosti mezi místem odstřelu a jednotlivými stanovišti byly odečteny z důlní mapy (v úvahu byly brány vzdálenosti jak v rovině důlního patra, tak i v vertikálním směru), stanoviště byla situována podle důlního zaměření a geologické stavby. Na základě teorie šíření vlnění mj. platí, že čas příchodu vlny na dané místo odpovídá tzv. „cestě nejkratšího času“ (Fermatův princip). To znamená, že odečítáme čas příchodu vlny šířící se „nejrychlejším prostředím“, tedy ne po přímé dráze. Seismickou rychlost vypočítáváme jako podíl vzdálenosti místa odstřelu a registrace po přímé dráze a doby šíření. Na horninových vzorcích v laboratoři lze stanovit rychlosti vyšší i nižší. To je ovlivněno změnou přírodních podmínek, zvláště vlhkosti a napěťových poměrů ve vzorku. Rozmístění jednotlivých stanovišť, jejich označení a vzdálenosti k místu odstřelu jsou uvedeny na obr. 1, dva příklady stanovišť – BUK6 na 9. patře dolu na seismickém pilíři trvalé stanice a BUK5 na začátku štolky BZ-XIII jsou na obr. 2.

K popisu horninového masivu, zvláště jeho porušení, se mimo jiné používá měření seismických rychlostí. Na menší vzdálenosti a v přístupném prostředí se běžně používají metody seismické tomografie. Cílem zde prezentovaného měření bylo dostupným aparaturním vybavením realizovat „velmi zjednodušený experiment“, neboť nebylo možno mj. dlouhodoběji zastavit práce v důlním díle (např. kvůli kotvení senzorů na rostlý masiv, realizace zábran proti přímému účinku tlakové vlny ...). Naměřené záznamy jsou významně ovlivněny projevem tlakové vlny (princip superpozice signálů), což dokládá oprávněnost měření trvalou stanicí na jiném patře, než je trhací práce prováděna. Výsledek měření lze považovat za základní informaci o hodnotě seismické rychlosti mezi místem odstřelu a sledovaným stanovištěm.

3. Výsledky měření

Hodnoty doby šíření seizmického impulsu od trhací práce na jednotlivá stanoviště a vypočtené seismické rychlosti jsou uvedeny v následující tabulce 1.

Na obrázcích 3 až 6 jsou záznamy vlnových obrazů na vybraných stanovištích, přičemž shora dolů je znázorněna složka vertikální (Z) a vodorovné složky (X, Y). Vodorovné složky byly orientovány podle směru přístupové štoly na 12. patře dolu (BZ-XIIJ), kdy +x je směr vedený k jámě (viz obr. 1). Na vodorovné ose je vyneseno čas [s] a na svislé ose amplitudy rychlosti kmitání [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]. Uvedené svislé osy mají různá měřítka vzhledem k velkému rozsahu amplitud na jednotlivých stanovištích.

Na všech třech záznamech zaregistrovaných na stanovištích na 12. patře dolu je dobře patrný projev tlakové vlny s převládající amplitudou, která na nejbližším stanovišti BUK1 dosáhla na vodorovné složce x maximální hodnoty $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (obr. 3) Záznam ze stanoviště BUK3, pro které vychází nižší seismická rychlost $4934 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, je na obr. 4.



Obr. 2 Na obrázku vlevo je stanoviště BUK6 na 9. patře dolu s aparaturou Gaia a snímačem ViGeo2 umístěným na seizmickém pilíři trvalé stanice. Na obrzku vpravo je stanoviště BUK5 na 12. patře dolu s aparaturou Gaia a snímačem Lennartz Le3DLite umístěným na počvě chodby BZ-XIIJ (foto: Lednická)

Jedná se o stanoviště, u kterého se nachází podle geologické dokumentace významné porušení horninového masivu – v práci Součka et al. (2017) se uvádí snížení hodnoty RQD (rock quality designation, určuje se z výnosu vrtného jádra) stanovené na základě strukturního mapování na stěnách důlního díla in situ a v práci Bukovské et al. (2019) je ve staničení 174 m (BZ-XIII) zmíněna přítomnost poruchové zóny s přítokem vody. Vlnový obraz trhací práce na stanovišti BUK6 na 9. patře dolu je na obr. 5. Přímá vzdálenost je 268 metrů. Tato stanice a také stanice BUK7 byly použity pro stanovení seismické rychlosti ve „svislém“ směru. Na vlnovém záznamu ze stanoviště BUK6 jsou dobře rozpoznatelné jednotlivé časové stupně realizované trhací práce, neboť zde nedochází k projevu tlakové vlny šířící se v prostorách PVP Bukov na 12. patře dolu. Jak již bylo zmíněno výše, vzhledem k aparaturnímu vybavení s maximální vzorkovací frekvencí ukládaných dat 500 Hz a vzhledem k různým typům snímačů s odlišným frekvenčním rozsahem nebylo možno provést stanovení útlumových charakteristik horninového prostředí, a to jak v amplitudové, tak ve frekvenční oblasti. Na obr. 6 je uveden záznam trhací práce na stanovišti BUK4. Vzhledem k různým převládajícím frekvencím projevů trhací práce – a to projev tlakové vlny (pod 70 Hz) a projev vibrací šířících se horninovým prostředím (nad 70 Hz), lze tyto účinky dobře rozlišit v časově frekvenčním spektru. Na obr. 7 a 8 jsou uvedena časově-frekvenční spektra signálu získaná pomocí dvou různých metod výpočtu (např. Lyubushin et al., 2015). Časově-frekvenční spektrum signálu získané výpočtem výkonového spektra pomocí posuvného krátkého časového okna poskytuje větší rozlišení ve frekvenční oblasti (obr. 7). Naopak časově-frekvenční spektrum signálu ve formě mocniny koeficientu Morletových waveletů poskytuje větší rozlišení v časové oblasti, což v daném případě umožňuje rozlišit například jednotlivé časové stupně trhací práce (obr. 8).

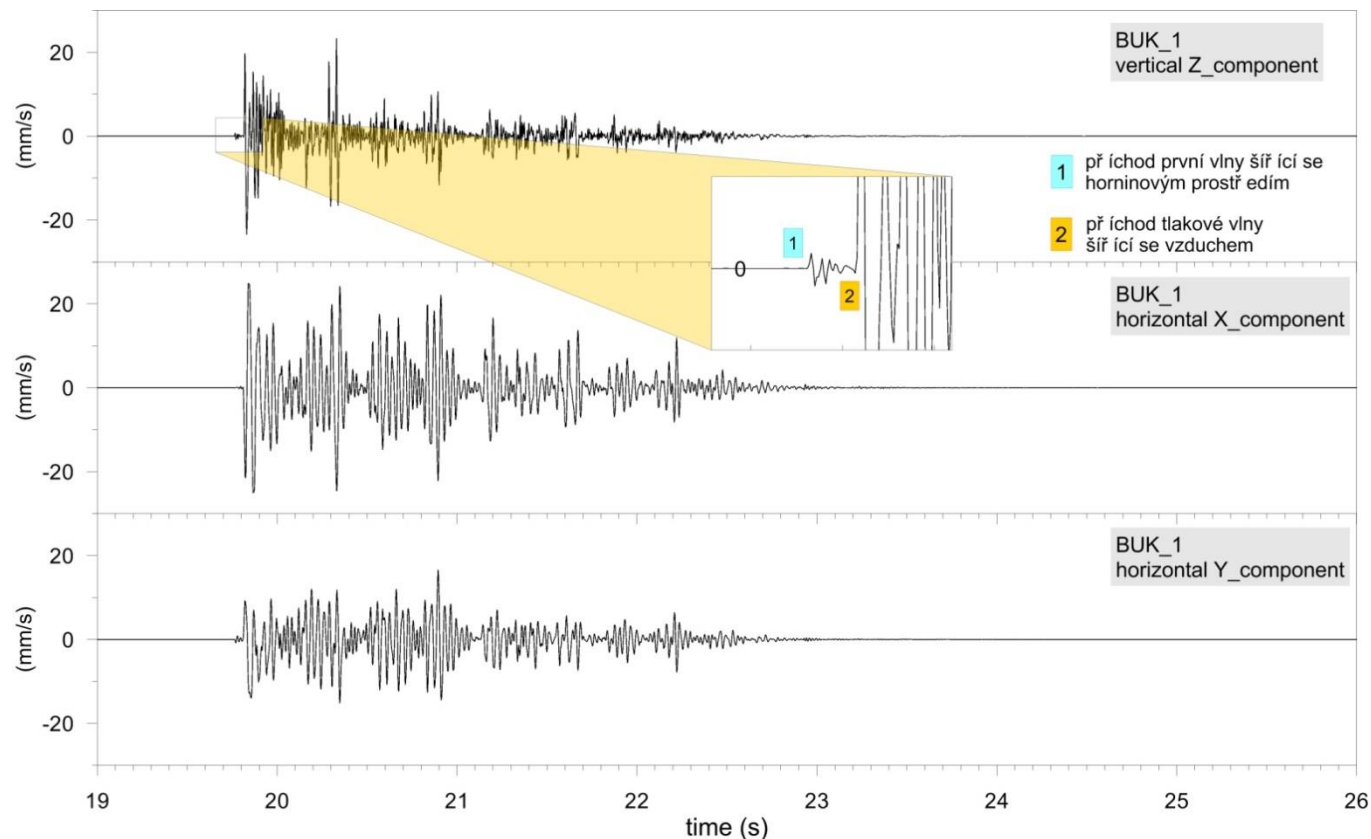
Tab. 1 Parametry stanovené pro jednotlivá stanoviště z digitálních záznamů

	čas příchodu první vlny [s]	čas odstřelu [s]	doba šíření [s]	vzdálenost [m]	seismická rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
BUK1	19,76	19,7568	0,0032	21	6562
BUK2	19,771	19,7568	0,0142	94	6620
BUK3	19,772	19,7568	0,0152	75	4934
BUK4	19,778	19,7568	0,0212	131	6179
BUK5	19,786	19,7568	0,0292	195	6678
BUK6	19,8	19,7568	0,0432	268	6204
BUK7	19,873	19,7568	0,1162	568	4888

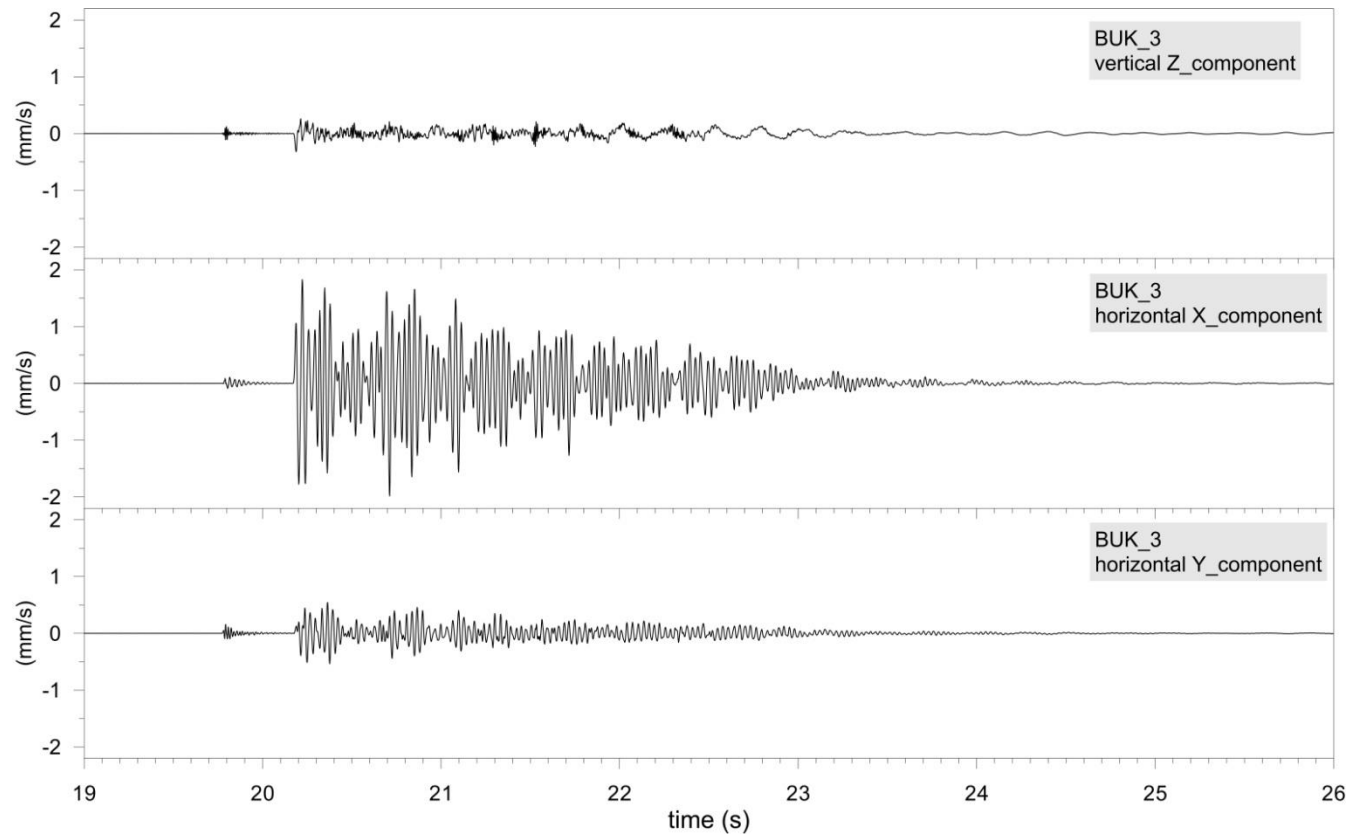
Ponechme stranou metodické a technické nedostatky, které byly zmíněny výše. Vypočtené seismické rychlosti v horninovém masivu na dvanáctém patře se pohybují v rozmezí 6562 až 6678 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro pevný neporušený masiv. V místech porušeného masivu (jak dokládá i geologická dokumentace) je dokladován více či méně zřetelný pokles seismické rychlosti, a to na 6179 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro směr na stanoviště BUK4 a především na 4934 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro směr na stanoviště BUK3.

Seismická rychlost mezi zdrojem a stanovištěm na 9. patře byla dopočtena na hodnotu 6204 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. To je hodnota, která odpovídá mírně porušenému masivu (připomínáme platnost Fermatova principu – cesta nejkratšího času). Nejnižší naměřená seismická rychlost byla odečtena pro dráhu zdroj – povrch. Zde však snížení seismické rychlosti může být dáno různými příčinami, nejen porušeností masivu. Může jít např.

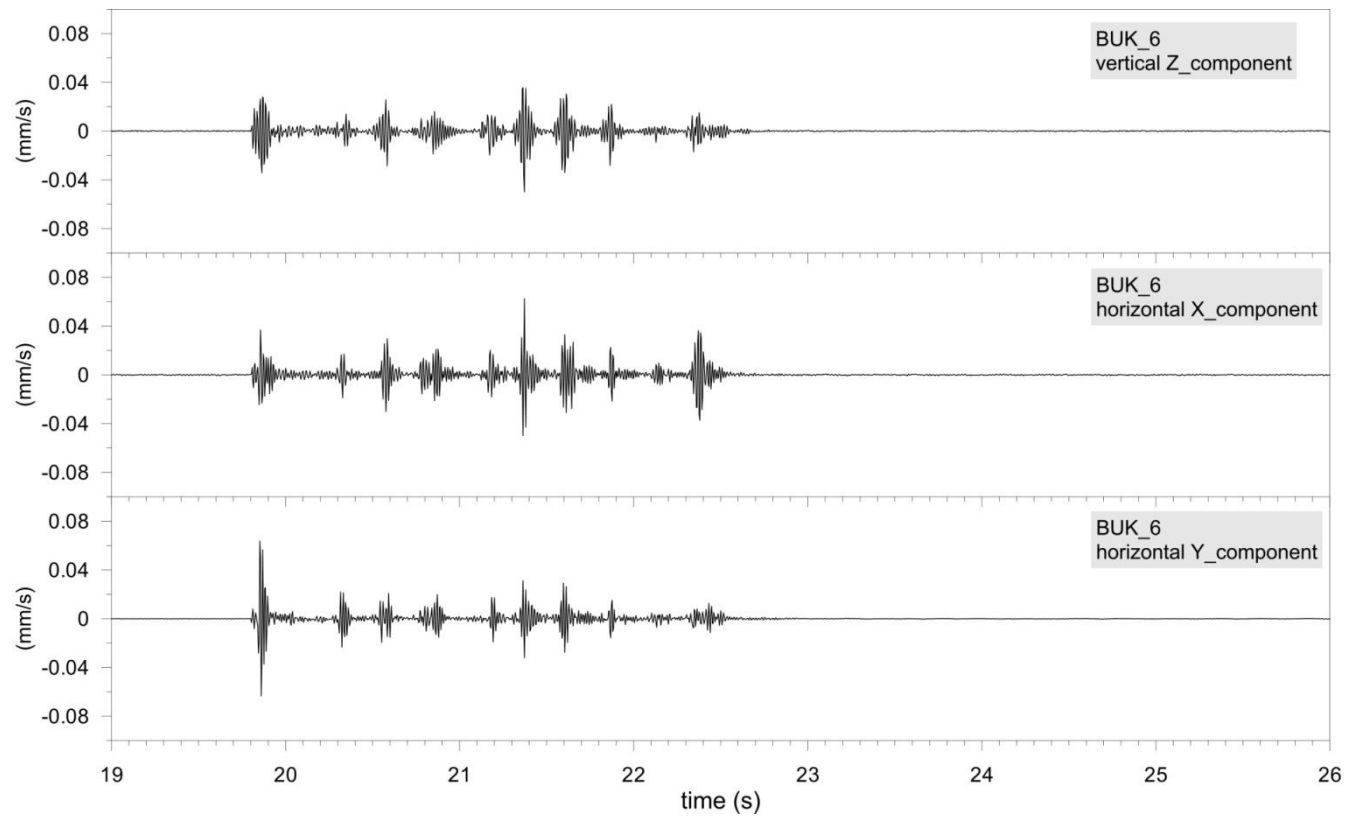
o přípovrchové zvětrání hornin a sedimentární pokryv pevných hornin. Tato hodnota 4888 m.s^{-1} však může být užitečná jako odhad vstupu pro přepočty účinků vibrací do hloubky.



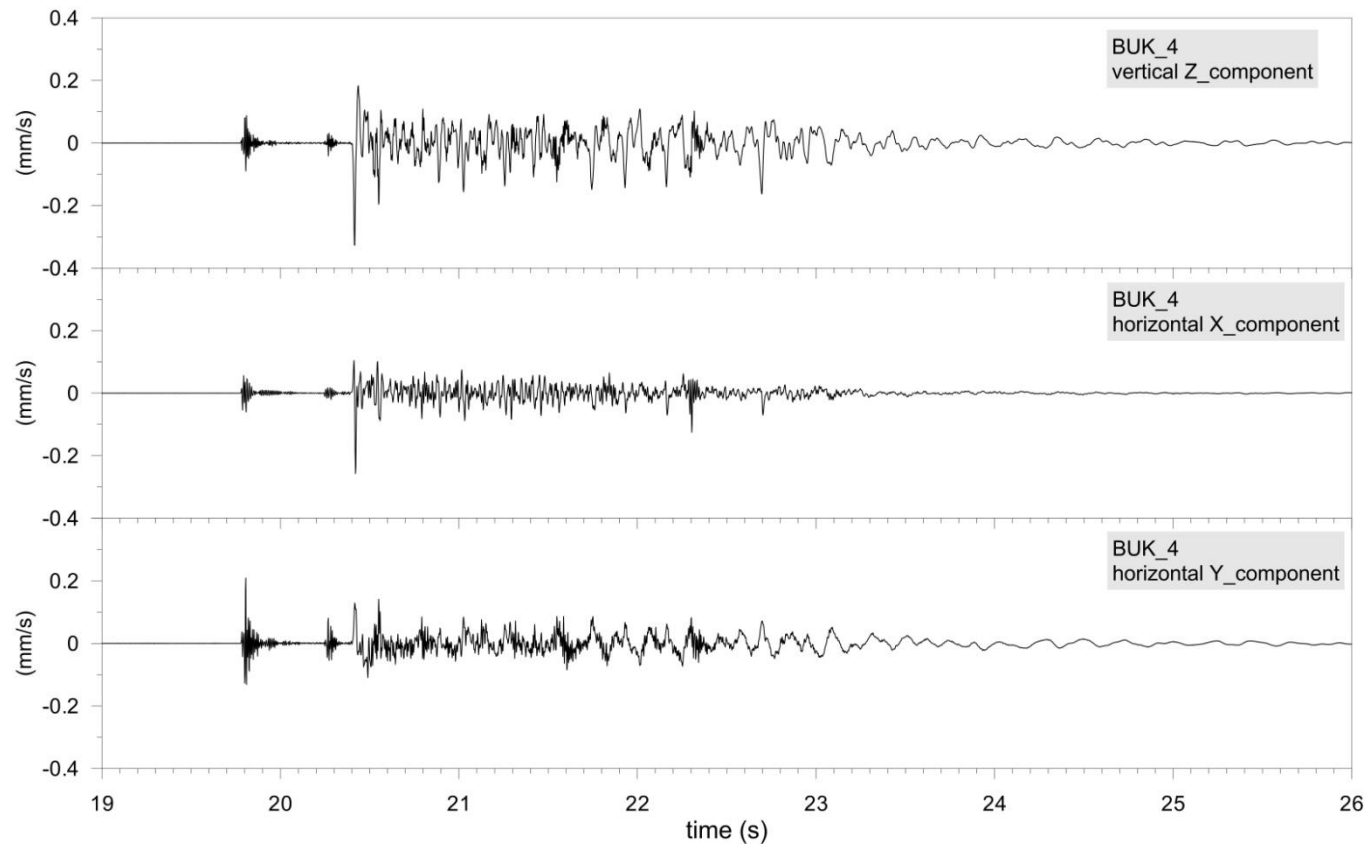
Obr. 3 Vlnový obraz trhací práce na stanovišti BUK1 na 12. patře dolu, umístění stanic je uvedeno na obr. 1. V záznamu je shora dolů složka vertikální (Z) a vodorovné složky (X, Y), na vodorovné ose je čas [s], na svislé ose amplitudy rychlosti kmitání [mm.s^{-1}]



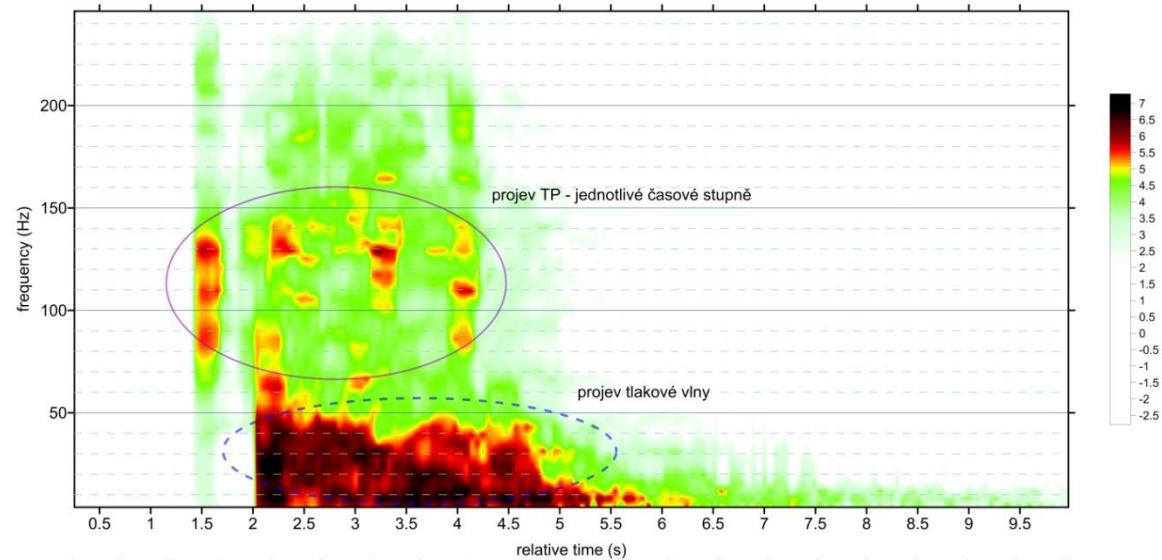
Obr. 4 Vlnový obraz trhací práce na stanovišti BUK3 na 12. patře dolu. V záznamu je shora dolů složka vertikální (Z) a vodorovné složky (X, Y), na vodorovné ose je čas [s], na svislé ose amplitudy rychlosti kmitání [mm.s⁻¹]



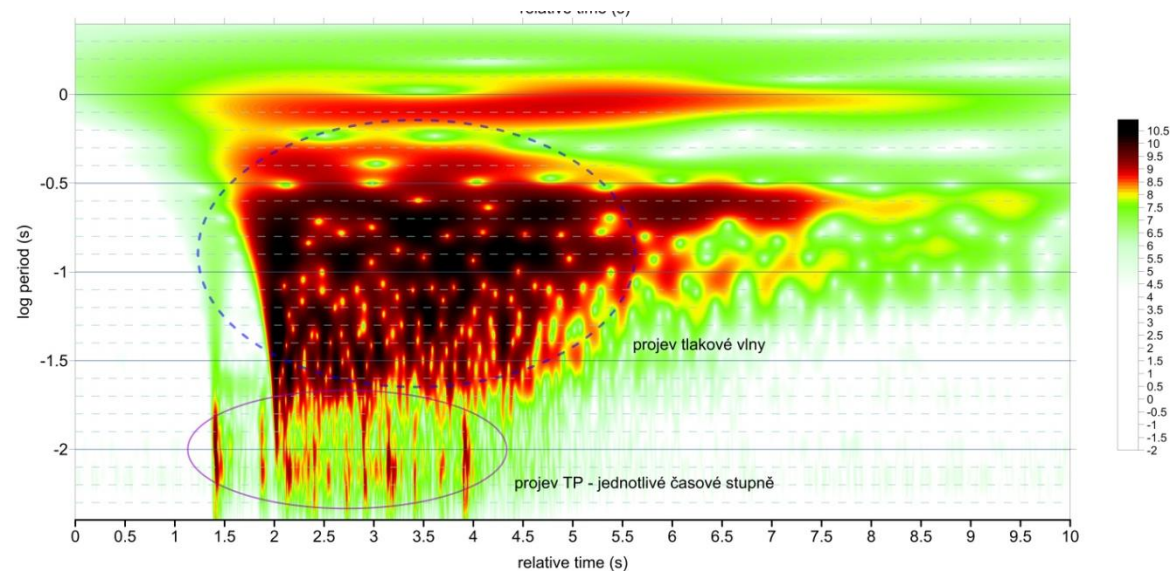
Obr. 5 Vlnový obraz trhací práce na stanovišti BUK6 na 9. Patře dolu. V záznamu je shora dolů složka vertikální (Z) a vodorovné složky (X, Y), na vodorovné ose je čas [s], na svislé ose amplitudy rychlosti kmitání [mm.s⁻¹]



Obr. 6 Vlnový obraz trhací práce na stanovišti BUK4 na 12. patře dolu. V záznamu je shora dolů složka vertikální (Z) a vodorovné složky (X, Y), na vodorovné ose je čas [s], na svislé ose amplitudy rychlosti kmitání [mm.s⁻¹]



Obr. 7 Časově-frekvenční spektrální struktura signálu svislé složky Z stanice BUK4 získaná výpočtem výkonového spektra pomocí posuvného krátkého časového okna



Obr. 8 Časově-frekvenční spektrální struktura signálu svislé složky Z stanice BUK4 ve formě mocniny koeficientu Morletových „vlnek“

4. Závěr

Cílem tohoto příspěvku bylo prezentovat výsledky experimentálního měření seismické rychlosti na úseku Bukov v důlním poli Rožná (DIAMO s.p., o.z. GEAM, Dolní Rožínka), kde se budovalo Podzemní výzkumné pracoviště v garanci SÚRAO. Získané hodnoty seismických rychlostí jsou uvedeny v tabulce 1a jsou na úrovni cca 550 m pod povrchem v rozmezí 6179–6678 m.s⁻¹. Výjimku tvoří hodnota 4934 m.s⁻¹ pro směr na stanoviště BUK3, neboť stanoviště se podle geologické dokumentace nacházelo v porušené zóně. Pro vertikální směr byla dopočtena hodnota 4888 m.s⁻¹. Tyto hodnoty společně s dalšími výsledky z geologických a geomechanických měření mohou být použity pro další výzkum, např. jako vstupy pro numerické modelování situace PVP Bukov.

Poděkování

Experimentální měření a průzkumné práce na PVP Bukov byly financovány SÚRAO, projekt PB-2014-ZL-U2301-004-BUKOV. Příspěvek byl zpracován za finanční podpory výzkumného programu Akademie věd České republiky, OZ30860518.

Literatura

- BLÁHA, P. *Seismická tomografie*, NIS, Geotest, Praha, Brno, 1996, 50 s.
- BUKOVSKÁ, Z., SOEJONO, I., VONDROVIC, L., VAVRO, M., SOUČEK, K., BURIÁNEK, D., DOBEŠ, P., ŠVAGERA, O., WACLAWIK, P., ŘIHOŠEK, J., VERNER, K., SLÁMA, J., VAVRO, L., KONÍČEK, P., STAŠ, L., PÉCSKAY, Z., VESELOVSKÝ, F. Characterization and 3D visualization of underground research facility for deep geological repository experiments: A case study of underground research facility Bukov, Czech Republic. *Engineering Geology*, 2019, vol. 259, p. 1-18, DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105186.
- KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., LEDNICKÁ, M. *Seizmický projev trhacích prací při ražbě přístupového důlního díla pro Podzemní výzkumné pracoviště Bukov*. Výzkumná zpráva, Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava, 2014, 11 s. + přílohy.
- LYUBUSHIN, A.A., KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., KNEJZLÍK, J. Coherence spectra of rotational and translational components of mining induced seismic events. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2015, vol. 50, no. 4, p. 391-402, DOI: 10.1007/s40328-015-0099-3.
- PANDULA, B., KONDELA, J. *Metodológia seizmiky trhacích prác*. SSTVP, Banská Bystrica, 2010, 156 s.
- PIJUSH P. R. *Rock Blasting: Effects and Operations*. A.A. Balkema Publishers, 2005.
- SOUČEK, K., VAVRO, M., STAŠ, L., KALÁB, Z., KONÍČEK, P., GEORGIOVSKÁ, L., KALÁB, T., KONEČNÝ, P., KOLCÚN, A., KRÁLOVÁ, L., KUBINA, L., LEDNICKÁ, M., MALÍK, J., MARTINEC, P., PTÁČEK, J., VAVRO, L., WACLAWIK, P., ZAJÍCOVÁ, V. *Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov – část II: Geotechnická charakterizace*. Závěrečná zpráva. TZ 221/2018, Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava, SÚRAO, Praha, 2018, 218 s.
- SOUČEK, K., VAVRO, M., STAŠ, L., KONÍČEK, P., PTÁČEK, J., WACLAWIK, P., VAVRO, L., LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z., ŠŇUPÁREK, R., VONDROVIC, L. *Bukov PVP underground research laboratory - geotechnical conditions of construction*. Underground Construction Prague 2016, Eastern European Tunneling Conference (EETC 2016). Praha: ITA-AITES, 2016.
- SOUČEK, K., VAVRO, M., STAŠ, L., VAVRO, L., WACLAWIK, P., KONÍČEK, P., PTÁČEK, J., VONDROVIC, L. Geotechnical characterization of Bukov underground research facility. In: *Koníček, P., Souček, K., Konečný, P. (Eds.), Proceedings of the ISRM European Rock Mechanics Symposium EUROCK 2017*, 2017, vol. 191., p. 711–718. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.236.

VERNER, K., BUKOVSKÁ, Z. A KOLEKTIV (VČ. KALÁB Z., LEDNICKÁ M.) *Seismické projevy trhacích prací* (kapitola) - Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov. Technická zpráva 1/2015, Česká geologická služba, Praha, SÚRAO, Praha, 2015.

WEB1 (červenec 2019): <https://www.pvpbukov.cz/>

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