

METODIKA A VÝSLEDKY DLOUHODOBÉHO SEISMICKÉHO MONITORINGU NA PZP HÁJE – INNOGY.CZ

METHODOLOGY AND RESULTS OF LONG-TERM SEISMOLOGICAL MONITORING AT UNDERGROUND GAS STORAGE HÁJE – INNOGY.CZ

Milan Brož¹, Jaroslav Štrunc²

Abstrakt

Pro sledování stability geologického prostředí, ve kterém je vybudován, v hloubce 1000 m, podzemní zásobník plynu, byla kromě jiných geotechnických metod, zvoleno i seismické monitorování mikro-zemětřesení. Pro tato sledování byl jednak vytvořen technický koncept sestavy pozorovací sítě a následně i stanovena metodika pro určování seismických jevů a jejich lokalizaci. Vzhledem k rozměrům seismické sítě, jejímu vybavení snímači a aparaturami, je tato velmi cenným přínosem i pro seismické sledování širší oblasti.

Abstract

The underground gas storage that has been built in the depth of 1000 m is systematically monitored from several points of view. Beside the other geotechnical methods, the micro-earthquakes are monitored. Seismic events are detected by dedicated network, identified and localized. Thanks to its aperture and cutting-edge measuring technology the network is worth for scientific purposes and broad surroundings monitoring.

Klíčová slova

granitový masiv, zemětřesení, indukovaná seismická, seismické aparatury, frekvenční spektrum

Keywords

granit, earthquake, induced seismicity, seismograph, frequency spectra

1 Úvod

V současné době stále narůstají požadavky na měření indukované seismicity v oblasti hlubinných zásobníků, které vyžadují náročnou přístrojovou instrumentaci, zejména kontinuální seismické registrace s přesnou identifikací jak času, tak i stanovení místa vzniku tohoto seismického jevu. V tomto článku popisujeme monitoring seismické aktivity kolem podzemního zásobníku plynu Háje u Příbrami, který od r. 2013 probíhá na základě smluvního vztahu mezi společnostmi Innogy. a.s., a firmou ARENAL, s.r.o. Zásobník plynu byl uveden do provozu v roce 1998 a ve stejném roce zde byla vybudována i lokální seismická síť, která zahájila registraci 20. srpna 1998. Seismická

měření, při kterých jsou využívány zkušenosti z předchozích měření důlních otřesů při těžbě uranového ložiska, zde prakticky probíhají již více než 19 let. Přístrojové vybavení i konfigurace stanic se v průběhu této doby poněkud měnily. Začátkem roku 2006 byla seismická síť významně modernizována jak po stránce seismometrů, tak i registračních aparatur a SW vybavení. Od března 2006 jsou zaznamenávána kontinuální seismická data ze 7 širokopásmových snímačů typu GURALP CMG-40T s plochou frekvenční charakteristikou mezi 0,03 až 60 Hz. V prosinci 2010 byla uvedena do provozu osmá stanice a v březnu 2011 devátá. Tyto dvě nejnovější seismické stanice jsou vybaveny krátkoperiodickými snímači Lennartz LE-3D/BH, které jsou umístěny v zapažených monitorovacích hydrologických vrtech v hloubce 150 m. Toto rozšíření sítě bylo provedeno hlavně z důvodů zpřesnění určení hloubky epicentra otřesu v oblasti skladovacího prostoru zásobníku. Síť je tedy v současné době tvořena devíti třísložkovými digitálními seismickými stanicemi a poskytuje velmi rozsáhlý pozorovací materiál, neboť jsou kontinuální třísložková data s vysokou dynamikou (vzorkovací frekvence 100 Hz, 120 dB) zaznamenávána a ukládána on-line. Měřená data jsou časově synchronizována GPS satelitním příjmem včetně doplnění o HW vteřinové značky. Na obr. 1 je schematicky znázorněn prostor vytvořeného důlního prostoru zásobníku.

2 Umístění seismických stanic a organizace seismického a hydrologického monitoringu a metodika zpracování dat

Tab. 1 Souřadnice stanic v Křovákových souřadnicích JTSC

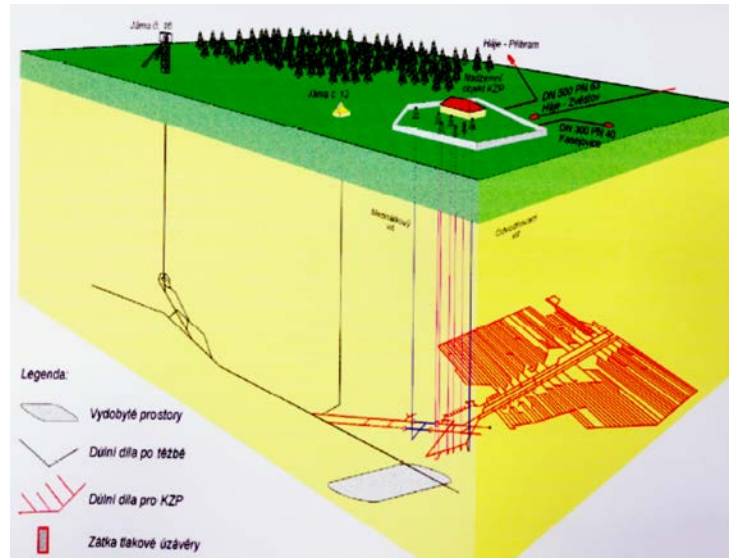
Jméno	Zkratky	Y[km]	X[km]	Z[km]
Buk	B – BUK	775,189	1087,698	0,572
Jeruzalém	R – JER	776,402	1085,979	0,548
Jesenice	J – JES	775,443	1086,088	0,563
Konětopy	K – KON	776,941	1087,201	0,562
Palivo	P – PAL	774,567	1088,370	0,552
Háje	H – HAJ	775,680	1084,762	0,560
Lešetice	L – LES	778,817	1087,608	0,560
Vrt MV1	V – MV1	775,881	1086,646	0,410
Vrt MV2	M – MV2	775,443	1086,084	0,413

Takto jsou vyloučeny rušivé signály vzniklé technologickým šumem, provozem na silnicích, stavební činností akustickými jevy, přelety letadel, bouřkami atd. Jsou tak ponechány záznamy blízkých zemětřesení a seismické jevy, které vznikají při trhacích pracích v kamenolomech. Dále jsou na základě typové analýzy všechny seismické jevy rozděleny do 4 skupin podle vzdálenosti od PZP. Toto rozdělení bylo zavedeno již v roce 2006 a je nasále používáno kvůli kontinuitě zpracování, přestože v některých případech nelze

Kromě seismického monitoringu se na stanicích sleduje i průnik plynu na povrch v testovacích pětmetrových vrtech a dále na 4 stanovištích i výška vodní hladiny ve speciálních 150 m hlubokých vrtech (MV1 – MV4). Obě tyto veličiny se zpracovávají souběžně se seismickým monitoringem. V tab. 1 je uvedeno umístění stanic (JES a MV2 jsou na shodném místě). Dále je na obr. 2 znázorněn půdorys ochranného pásma zásobníku a umístění sítě. Seismický monitoring je organizován tak, že seismické záznamy jsou ukládány na pevné disky přímo na seismických stanicích se současným zálohováním všech dat na dalším disku. Přesná synchronizace stanic je zajištěna pomocí družicového signálu GPS. Přibližně v měsíčních intervalech jsou záznamy přenášeny do interpretačního centra, kde jsou dále zpracovávány. V případě požadavku pracovníků Innogy Gas Storage i častěji. Kontinuální záznam všech seismických složek je postupně zobrazován na displeji a kontrolován interpretátorem, který vybírá seismogramy, které představují seismické jevy na principu jejich koincidence.

epicentrální vzdálenost přesně určit a proto je toto rozdělení pouze orientační. Podle tohoto rozdělení se určují typy seismických jevů z hlediska možného vlivu na lokalitu zásobníku:

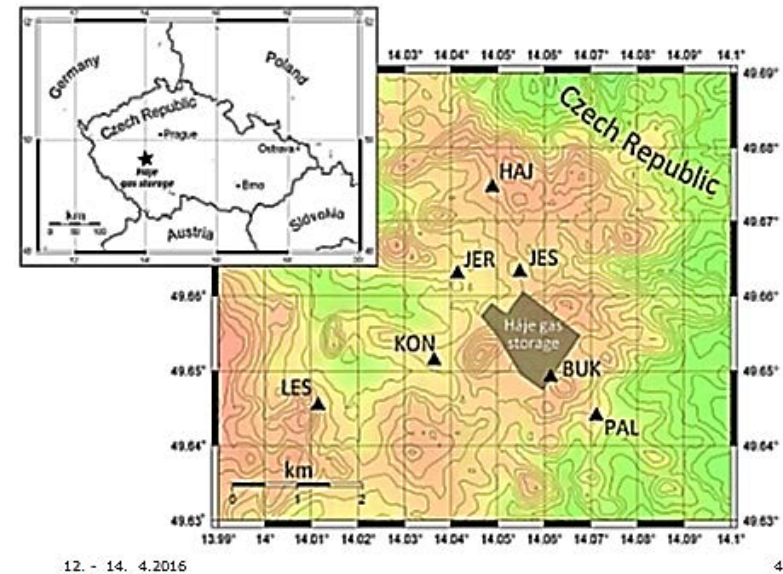
- lokální jevy – epicentrum leží do 3 km od nejbližší stanice sítě;
- blízké jevy – epicentrum leží od 3 do 100 km od sítě;
- regionální jevy – epicentrum leží od 100 do 200 km od sítě,
- vzdálené jevy – epicentrum leží dále než 200 km.



Obr. 1 Schematické znázornění podzemního zásobníku plynu PZP Háje – hloubka 1000m

Epicentrální vzdálenost se v této první fázi zpracování pouze odhaduje na základě časového rozdílu mezi příchodem podélných vln P a příčných vln S. Na všech seismogramech jsou odečteny maximální amplitudy rychlosti kmitání na svislé složce Z, které slouží k jednoduché charakterizaci, jaké účinky měl příslušný seismický jev v místě plynového zásobníku. Uváděn je medián ze všech stanic, na kterých byla amplituda odečtena.

V měsíčních zprávách, které jsou předávány průběžně vedení provozu zásobníku, je uveden seznam všech seismických jevů, který obsahuje i nejdůležitější zaznamenané seismogramy. Dále pak jejich srovnání se zaznamenanými zemětřeseními, především vzdálenými a jejich srovnání s Katalogem České regionální sítě. V roční souhrnné zprávě je uváděna statistika zaznamenaných jevů a podrobnější popis lokálních jevů z oblasti zásobníku.



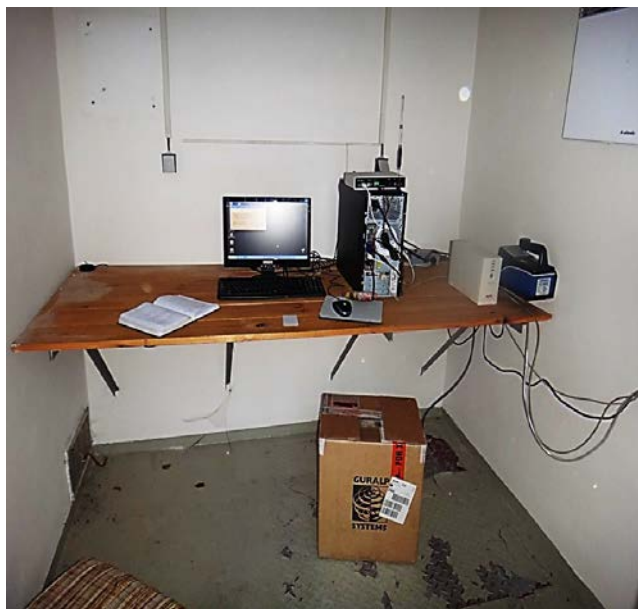
Obr. 2 Rozmístění seismických stanic monitorovacího systému PZP Háje. Vrt MV1 je umístěn uvnitř půdorysu objektu „Háje gas storage“ Vrt MV2 je přímo v místě stanice JES.



Obr. 3. Seismická stanice Háje



Obr. 5. Umístění snímače Guralp na pilíři (stanice Háje)



Obr. 4. HW sestava seismické stanice s monitoringem metanu

Pro seismickou bezpečnost podzemního zásobníku má význam především identifikace lokálních mikrozemětřesení. Proto je další podrobnější zpracování zaměřeno na tyto lokální jevy. Jsou přesně odečteny časy příchodu podélných vln P a příčných vln S. Pokud to kvalita seismogramů umožňuje, provede se přesná lokalizace ohniska, tj. na základě časů příchodu jsou nalezeny souřadnice hypocentra ohniska, ohniskový čas a je spočteno lokální magnitudo. Lokalizace je úspěšná pouze v případě, že se podaří velmi přesně odečíst časy příchodu vln P na alespoň čtyřech stanicích. Pokud je lokální mikrozemětřesení příliš slabé nebo v případě velkého šumu není možné přesnou lokalizaci provést. V tom případě uvádíme nejbližší stanici k hypocentru, na kterou přijdou vlny nejdříve a na které je obvykle největší amplituda.

Metoda lokalizace je podrobně popsána v práci MÁLEK, J. et al. (2000). Využívá se nasazení přímých P-vln i S-vln, kterým se přiřazuje různá váha podle jejich kvality. Větší váha se klade na nasazení P-vln a na stanice, které se nacházejí blízko epicentra. Pro úspěšnou lokalizaci je třeba znát model seismických rychlostí. Pro výpočet je používán homogenní model s rychlostmi seismických vln, které jsou tyto: $V_p = 5,320$ km/s a $V_s = 3,205$ km/s.

Tyto hodnoty vycházejí optimalizací tak, aby časová residua pro většinu seismických jevů byla minimální. Podrobný rozbor přesnosti lokalizace je proveden v článku MÁLEK, J., BROKEŠOVÁ, J. (2003). Přesnost určení epicentra pro silnější jevy uvnitř sítě, které jsou zaznamenané na všech stanicích, je přibližně 150 m. Chyba v určení hloubky je výrazně větší, přibližně 300 m a to i s využitím seismických stanic ve vrtech. Pro slabé jevy, případně pro jevy vně sítě, je tato přesnost podstatně horší.

Lokální magnitudo charakterizuje velikost otřesu. Vzorec pro jeho výpočet byl odvozen, aby korespondoval se systémem výpočtu magnituda, které používá národní seismická síť, podle stanice Průhonice - České seismické sítě. Jeho tvar je následující:

$$MI = \log A_z + 1,4 \times \log R - 1,5,$$

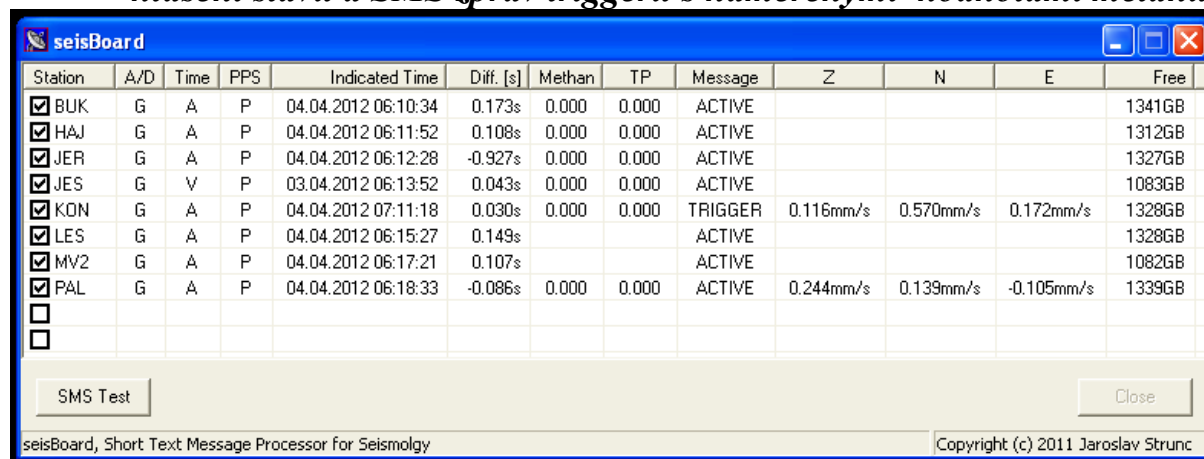
kde maximální amplituda rychlosti kmitání na svislé složce A_z se udává v $\mu\text{m/s}$ a hypocentrální vzdálenost R v km. Výsledné magnitudo je počítáno jako průměr ze všech stanic, kde byl získán nezkreslený seismogram. Nakonec je prováděno základní statistické zpracování zaznamenaných jevů.

3 Seismologická instrumentace monitorovací sítě

Moderní seismologický monitoring je realizován stacionárními monitorovacími aparaturami. Jejich osazení při terénních experimentech vyžaduje zvláštní péči, zejména pokud se jedná o bezobslužný provoz s on-line sledováním provozu pomocí SMS zpráv. Pro tato měření byly na všechny stanice sítě osazeny automatické monitorovací aparatury typu RUP-SEIS s GSM modemovým připojením. Pomocí SMS je stav sítě sledován softwarem a předáván do technologické sítě zásobníku; ŠTRUNC, BROŽ, (2011). Aparatury jsou vybaveny satelitním přijímačem času a polohy GARMIN GPS-18x a osazeny dlouhoperiodickým snímačem GURALP CMG-40T s vlastní frekvencí 0,03 Hz a citlivostí 800 V/(m/s). Při použití čtyřkanálového 28-bitového AD převodníku byla dosažena dynamika měření až 144 dB. Kromě těchto stacionárních aparatur, jsou pro expediční měření umístovány i přenosné autonomní aparatury typu BRS32, které jsou vybaveny snímači LE3D; BROŽ, M., ŠTRUNC, J., MÁLEK, J. (2014). Základní podmínkou pro vyhodnocení seismických dat při měření na dislokovaných stanovištích je zajištění shodné a přesné časové základny pro všechny seismické aparatury, to je v našem případě

zajištěno tím, že všechny aparatury i provoz centrálního serveru sítě na dispečinku využívá synchronizace času ze satelitních přijímačů, které jsou vybaveny i HW příjmem vteřinových impulsů a synchronizují interní časové hodiny seismických záznamníků

Tab. 2 Zpracování provozu seismické sítě ve velínu PZP – automatické hlášení stavu a SMS zpráv triggerů s naměřenými hodnotami metanu



Station	A/D	Time	PPS	Indicated Time	Diff. [s]	Methan	TP	Message	Z	N	E	Free
☒ BUK	G	A	P	04.04.2012 06:10:34	0.173s	0.000	0.000	ACTIVE				1341GB
☒ HAJ	G	A	P	04.04.2012 06:11:52	0.108s	0.000	0.000	ACTIVE				1312GB
☒ JER	G	A	P	04.04.2012 06:12:28	-0.927s	0.000	0.000	ACTIVE				1327GB
☒ JES	G	V	P	03.04.2012 06:13:52	0.043s	0.000	0.000	ACTIVE				1083GB
☒ KON	G	A	P	04.04.2012 07:11:18	0.030s	0.000	0.000	TRIGGER	0.116mm/s	0.570mm/s	0.172mm/s	1328GB
☒ LES	G	A	P	04.04.2012 06:15:27	0.149s			ACTIVE				1328GB
☒ MV2	G	A	P	04.04.2012 06:17:21	0.107s			ACTIVE				1082GB
☒ PAL	G	A	P	04.04.2012 06:18:33	-0.086s	0.000	0.000	ACTIVE	0.244mm/s	0.139mm/s	-0.105mm/s	1339GB
☐												
☐												

seisBoard, Short Text Message Processor for Seismology Copyright (c) 2011 Jaroslav Strunc

Tab. 2 představuje obrazovku software pro sledování stavu stanic a koincidence seismických jevů, které se přenášejí prostřednictvím SMS. Hodnoty maxim jednotlivých složek tzv. triggerů detekovaných seismických jevů jsou uváděny v pravé části. Na obrázcích, obr. 3, 4 a 5 jsou fotografie technologie stanice Háje.

4 Příklady zaznamenaných zemětřesení seismických jevů v roce 2014 – 2016

Do sestavy seismické monitorovací sítě PZP Háje byly z důvodu zpřesnění lokalizace ve vertikálním směru instalovány dva snímače do 150 m vrtů (MV1 a MV2). Tyto snímače sice zaznamenávají menší seismické amplitudy rychlostí sledovaných jevů ale úroveň jejich šumového pozadí je mnohem menší. Tato skutečnost je znázorněna na následných obrázcích, obr. 6 a obr. 7. Na následných vyobrazeních, obr. 8 – obr. 15, jsou uvedeny seismogramy zaznamenaných seismických jevů, které dostatečně charakterizují vlastnosti této seismické sítě. Jedná se jak o záznamy vzdálených zemětřesení, tak i blízká zemětřesení a projevy indukované seismicity.

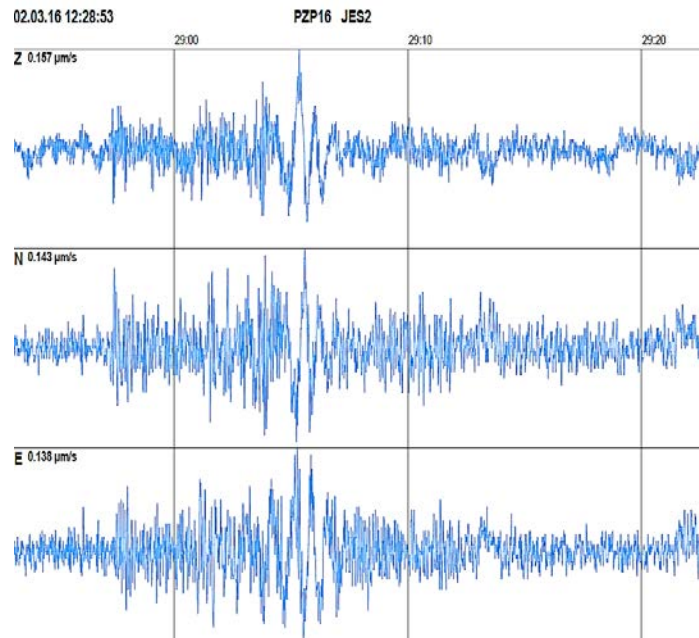
V příspěvku jsou lokální seismické jevy, které vznikly v prostoru zásobníku a jeho ochranného pásma prezentovány jen statisticky. V letech 2014 až 2016 bylo takovýchto jevů s magnitudy od $M = 0,6$ až $M = 1,6$ zaregistrováno 8.

5 Závěr

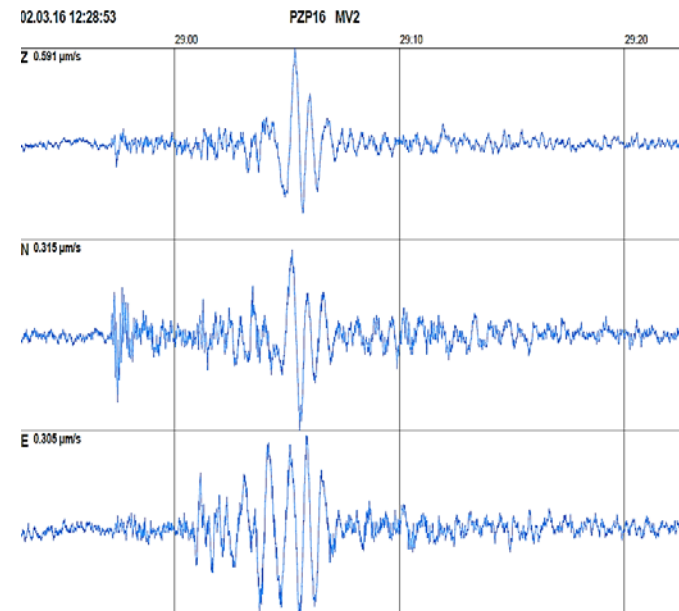
Seismická monitorovací síť, která byla vybudována za účelem kontroly stability podzemního zásobníku plynu, prokázala jednak vysokou úroveň seismického sledování a zejména velmi přispěla k unikátnímu hodnocení geotechnické problematiky tohoto podzemního inženýrského důlního díla. Ta je u takovýchto zásobníků velmi závažným ukazatelem pro posouzení, jak se ve skalním masivu projevují

tlakové změny při tlakování zásobníku a jeho vypouštění. Tyto tlakové impakty působí přímo na granitový masiv, který byl při vlastním budování zásobníku již prioritně porušen trhačími pracemi.

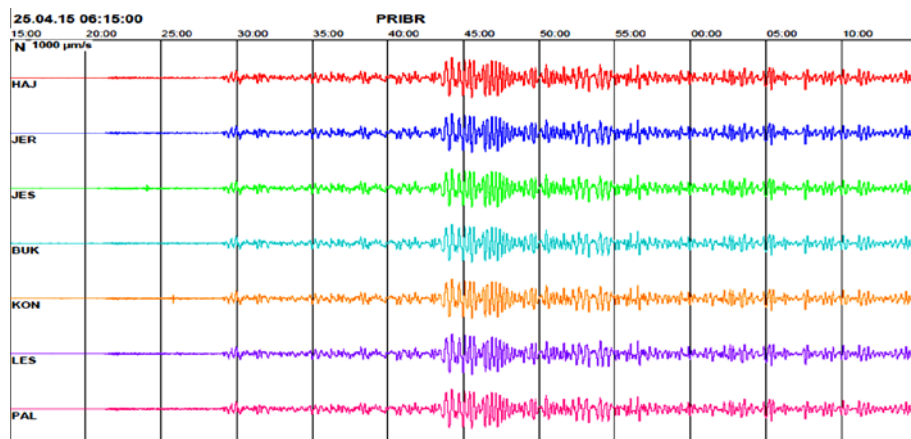
Seismologický monitoring, který sleduje vznik křehkého porušování horniny, prokázal, že za dobu provozu zásobníku nevznikly jak v prostoru zásobníku, tak v jeho ochranném pásmu takové seismické jevy, které by ohrozily stabilitu tohoto díla. Je třeba vzít na vědomí, že velmi podstatným výsledkem seismického monitoringu je i skutečnost, že jsou vyhodnocovány i vnější seismické jevy, které se projevují v okolních vesnicích makroseismicky, a pokud by nebyla provedena jejich přesná lokalizace, mohly by být vztahovány k provozu zásobníku. Těmito jevy jsou jednak indukované důlní otřesy z již ukončené těžby uranového ložiska, poměrně častá a makroseismicky se projevující zemětřesení z oblasti Vltavského zlomu kolem přehrady Orlík a Slapy a další jevy, např. z lokality Jince, které mohou souviset i s provozem vojenského prostoru. Praktické zkušenosti popsané v příspěvku i v následných citacích literatury jsou příkladem seismologického monitoringu, který může být aplikován i na dalších projektech podzemního ukládání fluid i radioaktivních odpadů.



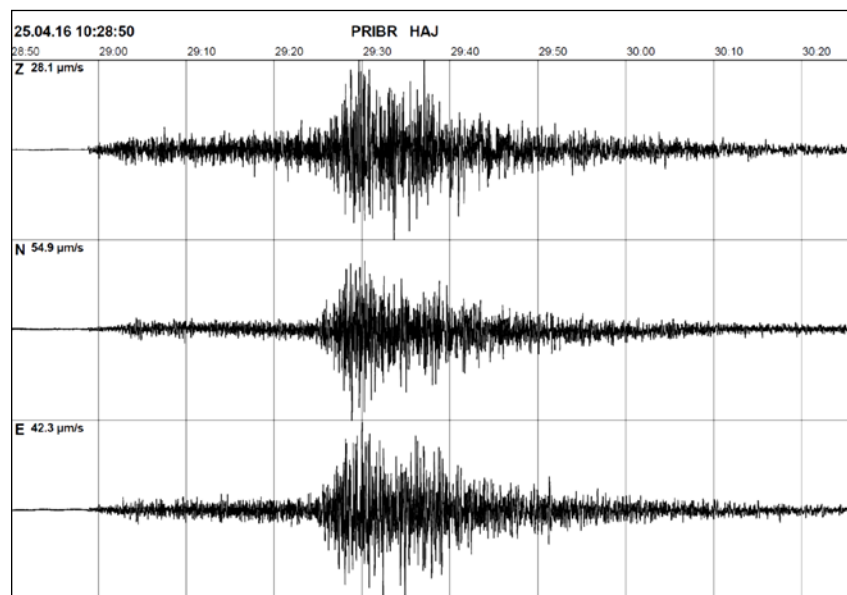
**Obr. 6. Seismická stanice JES (Jesenice);
snímač LE3 na povrchu:
Z=0,157mm/s,
N=0,143mm/s,
E=0,138mm/s**



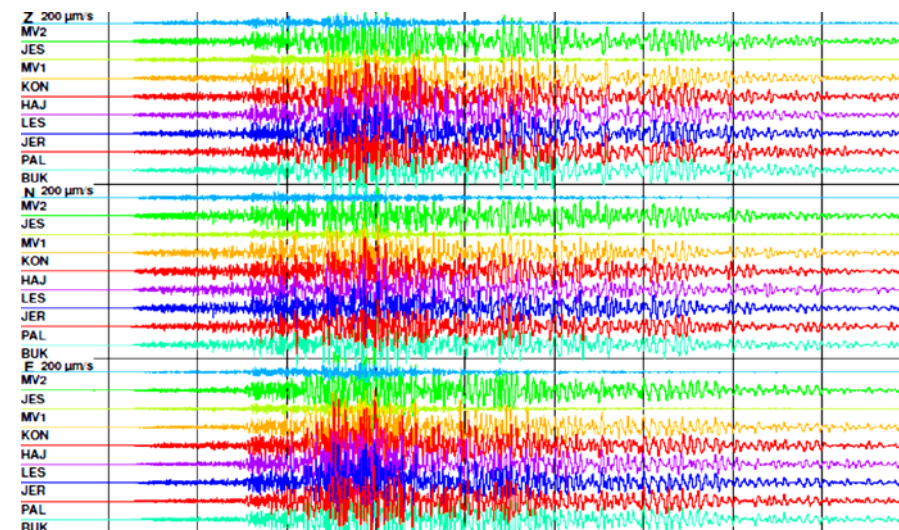
**Obr. 7. Seismická stanice MV2 (Jesenice);
snímač LE3D ve vrtu:
Z= 0,147mm/s,
N= 0,079mm/s,
E= 0,076mm/s**



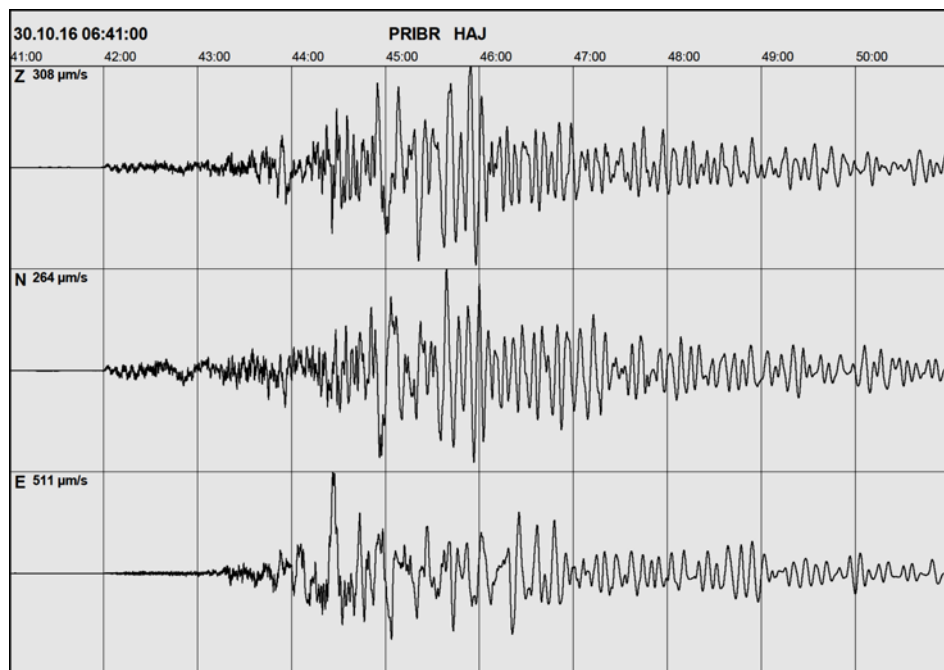
Obr. 8. Seismogramy Nepálského zemětřesení $MI = 7,9$ bylo zaznamenáno na všech seismických stanicích PZP Háj; znázorněna N složka seismických rychlostí v jednotkách ($\mu\text{m/s}$) dne 25. 04. 2015 v 06: 15: 00



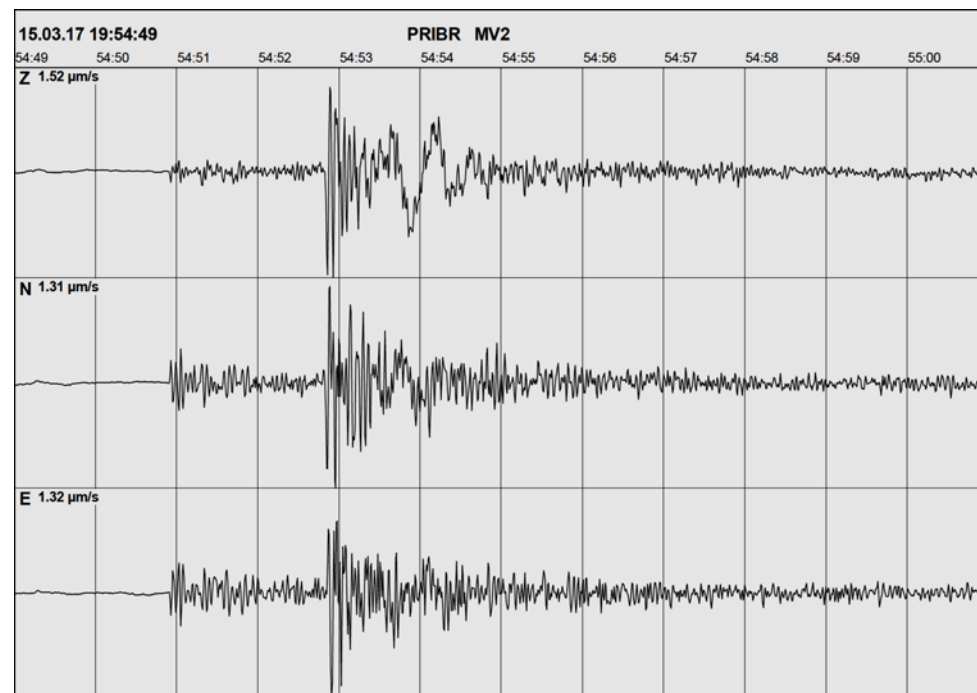
Obr. 9. Významné nejbližší evropské zemětřesení ve Vídeňské pánvi v Rakousku dne 25. 4. 2016 – $MI = 4,1$; záznam ze stanice Háj



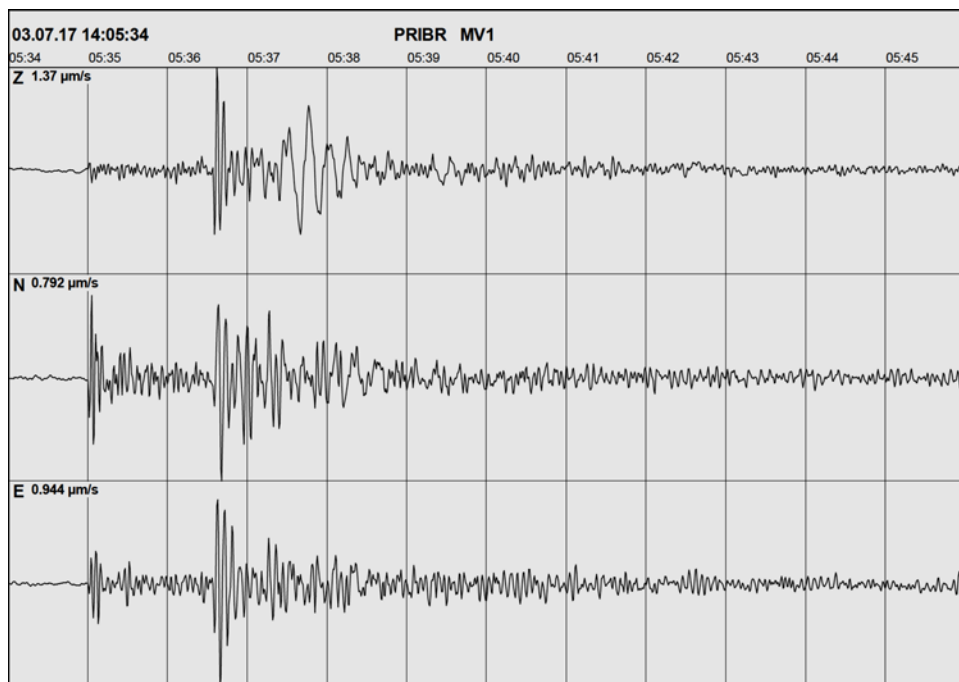
Obr. 10 Seismogramy zemětřesení v Itálii 24. 8. 2016 v 01:38:06 hod - $MI = 6,2$; třísložkový záznam všech 9 stanic PZP Háj



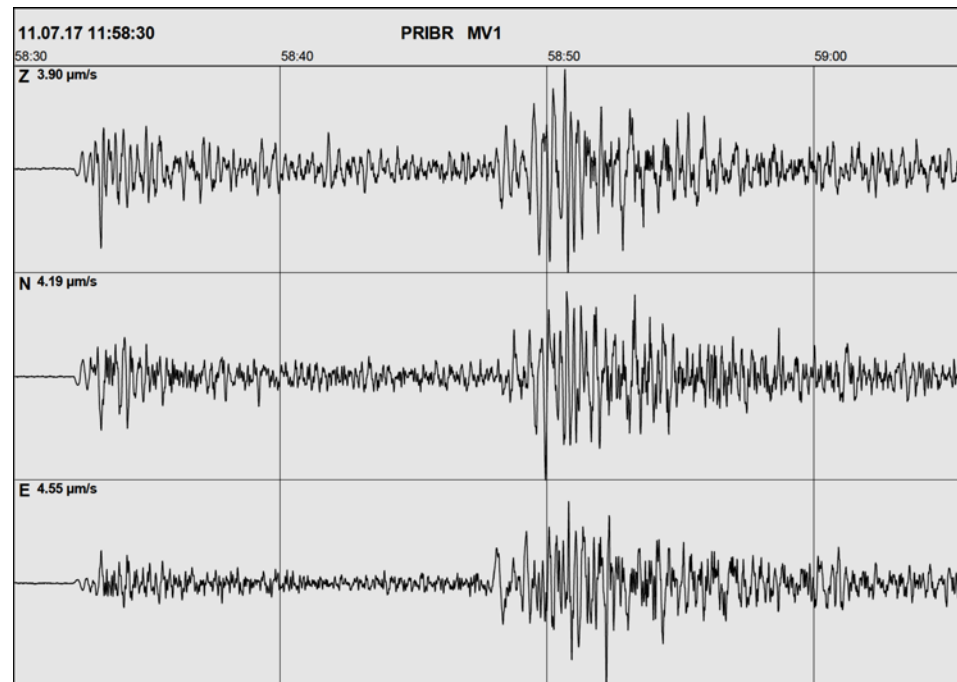
Obr. 11 *Následné katastrofické zemětřesení ve střední Itálii dne 30. 10. 2016 v 06:41:00 hod; magnitudo MI = 6,6 – záznam seismické stanice Háj*



Obr. 12 *Blízké tektonické mikrozemětřesení u Orlické přehrady, MI = 1,2*



Obr. 13 Lomový odstřel ve vzdálenosti přibližně 12 km na podzemní stanici MV1



Obr. 14 Regionální zemětřesení v západních Čechách s magnitudem 3,1 dne 11. 7. 2017 v 11:58:30 v podzemní stanici ve vrtu MV1

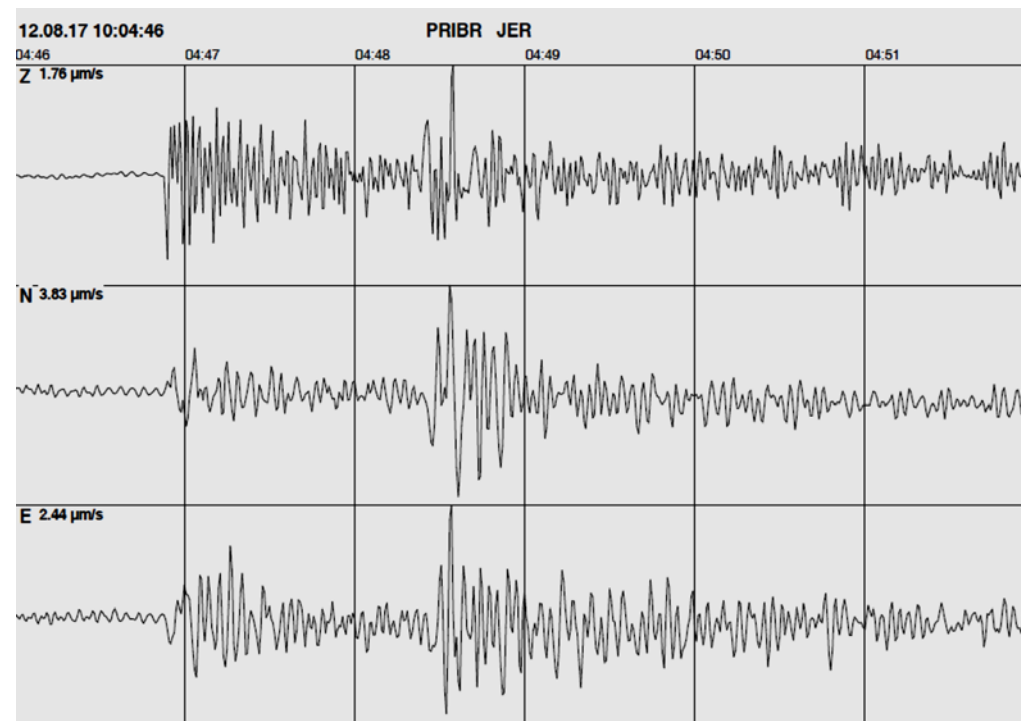
Literatura

- BENETATOS, C., MÁLEK, J., VERGA F. Moment tensor inversion for two micro-earthquakes occurred inside the Hájek gas storage facilities, Czech Republic, *Journal of Seismology*, 2007, DOI 10.1007/s10950-012-9337-0.
- BROŽ, M., MÁLEK, J., RŮŽEK, B. and HORÁČEK, M. Seismic events at the underground gas storage Hájek-Příbram (Czech Republic), *Rock Mechanics, a challenge for society*, Ed. P. Sarkka & P. Eloranta, Proceedings of the ISRM regional symposium Eurock, 2001, p. 665-670, A. A. Balkema publishers.
- BROŽ M., ŠTRUNC J., LINDA M., *Seismický záznamník - Užitečný vzor č. 28* 283 (9. 6. 2015), 2015
- BROŽ, M., MÁLEK, J. and ŠTRUNC, J. *Seismic activity in the vicinity of Hájek underground storage*, Technical report, RWE Praha, 2007- 2016
- MÁLEK, J., BROŽ, M. and ČÍŽ, R. Localization Method of the Seismic Induced Events at Příbram Seismic Network. *Acta Montana* 16 (118), 2000, p.117-124
- MÁLEK, J., BROŽ, M. and ČÍŽ, R. Localization Method of the Seismic Induced Events at Příbram Seismic Network, *Acta Montana IRSM CAS CR*, No.16 (118), 2000, p.117-124
- MÁLEK, J., BROKEŠOVÁ, J. Seismic event location in the vicinity of the underground gas storage Hájek-Příbram, *Acta Montana* 22 (129), 2003 p. 65-73
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., MÁLEK, J., LINDA, M. New Generation Seismological Datalogger BRS32-USB and its Application in induced Seismicity Monitoring, *International Journal EGERSE XXI*, 1, 2014, s. 35-46, ISSN 1803-1447
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., MÁLEK, J., TYM, A. Seismological Monitoring Network around Geothermal Boreholes in Litoměřice, *International Journal EGERSE XXI.1*, 2014, str. 46 -58, ISSN 1803-1447.
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., MÁLEK, J., LINDA, M. Measuring of Induced and Technical seismicity using Portable Apparatus BRS32, *Conference proceedings-Blasting Techniques*, ISBN 978-80-970265-6-1, 2014, str.120-132
- ŠTRUNC, J., BROŽ, M. Seismické přístroje pro lokální měření a monitorovací síť, *Trhací technika a pyrotechnika - zpravodaj 3/2007*, ČVTS, Společnost pro trhací techniku a pyrotechniku Praha, 2007, s. 9-11
- ŠTRUNC, J., BROŽ, M. A New Generation Of Multichannel Seismic Apparatus And Its Practical Application In Standalone And Array Monitoring, *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol. 8, No. 3 (163), 2011, p.345-352,

Authors

¹ Milan Brož, ARENAL, s.r.o., Praha 5, milanbrogy@seznam.cz

² Jaroslav Štrunc, ARENAL, s.r.o., Praha 5, jaroslav_strunc@seznam.cz



Obr. 15 Lokální mělké zemětřesení u Jinců ve středních Čechách dne 12. 8. 2017 v 10:04:46 hod – záznam na stanici JER (Jeruzalém)