

PRÁCE PROBÍHAJÍCÍ NA VZOROVÉM PROJEKTU MONITORINGU PRO MIKROSEISMICKÉ STUDIE V PŘEDPOKLÁDANÝCH LOKALITÁCH ÚLOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU – LOKALITA ČERTOVKA

PILOT PROJECT OF MICROSEISMIC STUDY IN ANTICIPATED LOCALITY FOR UNDERGROUND RADIOACTIVE WASTE STORAGE „ČERTOVKA“

Milan Brož¹, Oldřich Levý², Jaroslav Štrunc³

Abstrakt

V tomto příspěvku je popisována metodika, kterou je řešeno provádění mikroseismického monitoringu vybrané oblasti pro průzkum přirozených i indukovaných seismických jevů podle zadání Správy úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) ČR. Postup řešení vychází jednak z teoretických znalostí této problematiky a zejména z praktických zkušeností z provozu takovýchto seismických sítí v České republice i na Slovensku. Hlavní důraz při realizaci byl zaměřen na spolehlivou identifikaci seismických projevů v dané oblasti a to s citlivostí od magnituda $M = -1$ ve frekvenčním pásmu od 0,5 Hz do 80 Hz. Dalšími základními požadavky, které souvisí s lokalizací seismických jevů, jsou sestava minimalizované seismické sítě ze 4 stanic, jejichž synchronní provoz je zajištěn jednotnou časovou základnou danou příjmem GPS časového signálu na všech stanicích, vysoká dynamika měření, a to min 140 dB, která byla zajištěna použitím 28 bitových převodníků a zároveň vysoká až 99 % spolehlivost registračních systémů. Vzhledem k problematice pokrytí uvedené lokality GSM signálem jsou možnosti internetového on-line připojení seismických stanic nevyhovující. Proto byla zvolena metodika zajištění informací o provozu stanic a jejich záznamech formou odesílání denních hlášení formou SMS zpráv. Na základě výsledků seismického monitoringu byly dosud průběžně identifikovány seismické jevy ze vzdálených evropských zemětřesení (Itálie), přirozené jevy z oblasti západočeských zemětřesení a záznamy indukovaných seismických jevů jak vzdálených (důlní otřesy - Polsko) tak i lomových odpalů v oblasti západních a severních Čech. Celkové zpracování zaměřené na lokální mikrozemětřesení bude provedeno v závěru vyhodnocení. V dosavadních seismických studiích je uvedená oblast z hlediska seismické aktivity už historicky považována za stabilní, neboť nejsou známy žádné makroseismické projevy v období posledních 50 let.

Abstract

This article describes micro-seismic monitoring methodology of natural and induced seismic events in the Čertovka site as an area of interest specified by Radioactive Waste Repository Authority (SÚRAO). The presented solution is based on know-how gained from similar monitoring networks across Czech Republic and Slovakia. The main focus was on reliable seismic events identification with sensitivity from magnitude $M = -1$ in the frequency between 0.5 and 80 Hz. The network was designed as minimal, i.e. consisting of 4 stations, using

high reliable apparatus (99 %) with GPS time synchronization. The high dynamic measuring range (>140 dB) was reached using 28-bit ADCs. The stations are generally operated as off-line – the only communication is daily status SMS sent by each station. During current period no local events detected, but the model is whole area was improved using distant and far earthquakes (from Italy, Poland, Western Bohemia). The examined area is historically considered and highly stable with no macroscopic phenomenon within last 50 years.

Klíčová slova

zemětřesení, seizmické sítě, indukovaná seismická, seizmické aparatury

Keywords

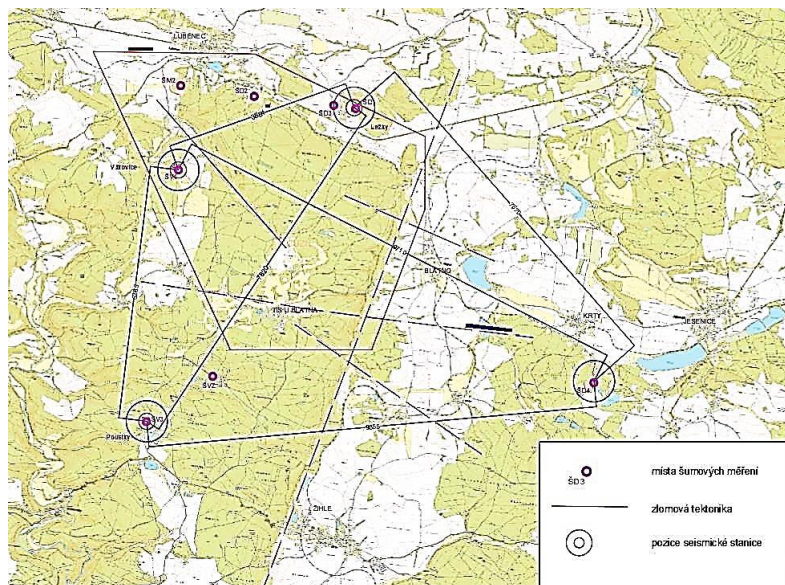
earthquake, seismic network, induced seismicity, seismograph

1 Úvod

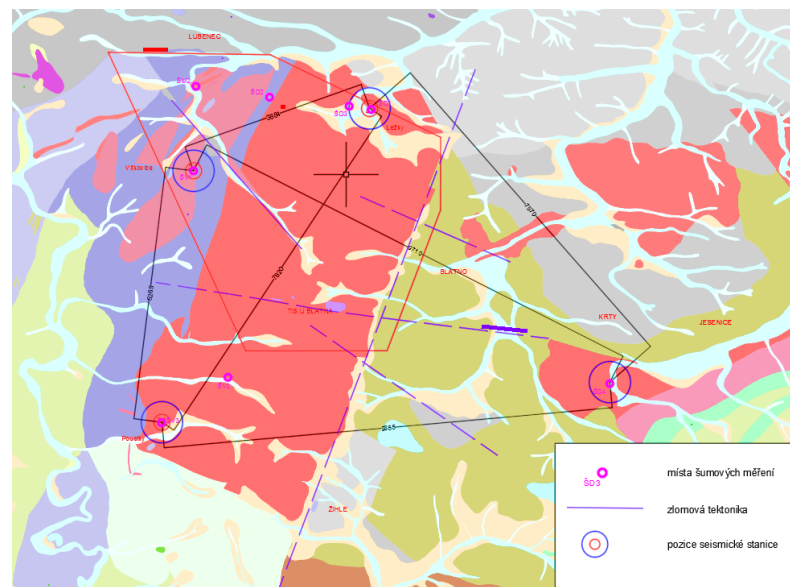
V současné době stále narůstají požadavky na měření přirozené i indukované seismicity v oblasti speciálních inženýrských staveb, mezi které patří i podzemní úložiště radioaktivních odpadů. Na základě výběrového řízení státní organizace SÚRAO bylo sdružení společností INSET s.r.o. a ARENAL,s.r.o. pověřeno k řešení úlohy seismologického průzkumu oblasti Čertovka. Ukládání radioaktivních odpadů by mělo být v tektonicky nepostiženém geologickém prostředí granitů a to v předpokládaných hloubkách kolem 500 m. Kromě jiných technických požadavků je kladen velký důraz na dlouhodobou stabilitu tohoto skalního masivu. Jednou ze základních geologických vlastností granitů je jejich puklinová struktura, která se může vyskytovat jednak jako velká zlomová v celé geologické oblasti, tak jako krátké tektonické zlomy uvnitř sledovaného granitového bloku. Z hlediska požadavků na vhodnost lokality je podstatné, zda se jedná o zlomy, které jsou aktivní, anebo o zlomy stabilní, tak zvaně již vyhojené. Úkolem seismického monitoringu je poznání, zda se jedná o zlomy aktivní, které v průběhu času mění své rozměry a vlastnosti nebo zda se jedná již o pasivní zlomy, které nevyzařují žádné seismické vlnění, vznikající při jejich porušování. Vzhledem k uvažovaným rozměrům podzemního díla se jedná o oblasti s rozměry granitových jednotek v řádech až několika čtverečních kilometrů a to do hloubky větší než 1 km.

2 Geologická struktura lokality „Čertovka“ a rozmístění seismických stanic

Pro rozmístění seismických stanic v uvažované lokalitě, bylo kromě požadavků na řešení úlohy detekce seismických jevů a tektoniky oblasti nutné vyhledat místa podle úrovně a skladby seismického šumu. Jelikož je tato oblast velmi málo osídlena a ani se tam nenachází velké průmyslové podniky, byl tento požadavek poměrně snadno řešitelný a to i s přihlédnutím na možnosti technické realizace umístění seismických stanic v blízkosti objektů s přívodem elektrické energie. Celkem bylo proměřeno formou dlouhodobého seismického snímkování aparaturami BRS32 8 lokalit, z nichž byly pro umístění stanic vybrány 4, BROŽ, M. a kol. (2015). Výsledné řešení umístění stanic je uvedeno na následném obr. 1 – Rozmístění seismických stanic s vykreslením identifikovaných tektonických zlomů je uvedeno dále na obr.2, který obsahuje i podklad geologické mapy.



Obr. 1 Rozmístění seismických stanic oblasti Čertovka



Obr. 2 Rozmístění seismických stanic oblasti Čertovka na podkladu geologické mapy

První stanice seismické sítě byla uvedena do zkušebního provozu 11. srpna 2016, celá síť byla uvedena do zkušebního (kalibračního) provozu 19. 8. 2016 a již v prvních dnech zaznamenala na třech stanicích seismické účinky devastujícího silného zemětřesení ve střední Itálii dne 25. 8. 2016 v 02:06:03 hod. Od startu registrace na všech 4 stanicích od 1. 9. 2016 jsou následně zaznamenány i další seismické účinky následných italských zemětřesení.

V rámci sítě pracují v celém období stanice, viz tab. 1:

- Krty – KRTC (východ);
- Poustky – PSTC (jih);
- Vítkovice – VTKC (západ);
- Ležky – LEZC (severo-západ).

Výběr stanovišť pro seismický monitoring vycházel z několika zásad, které byly postupně prověřovány v první etapě prací. Tyto zásady zahrnovaly:

- umístění stanic při okrajích zájmové oblasti (S-V-J-Z) tak, aby prostorově mohly být zachyceny seismické jevy vzniklé v zájmovém území.
- respektování geologických poměrů lokality Čertovka, ohrazení granitových těles a výskyt tektonických zlomových linií v tomto masivu.

Tab. 1 Souřadnice stanic v Křovákových souřadnicích JTSK

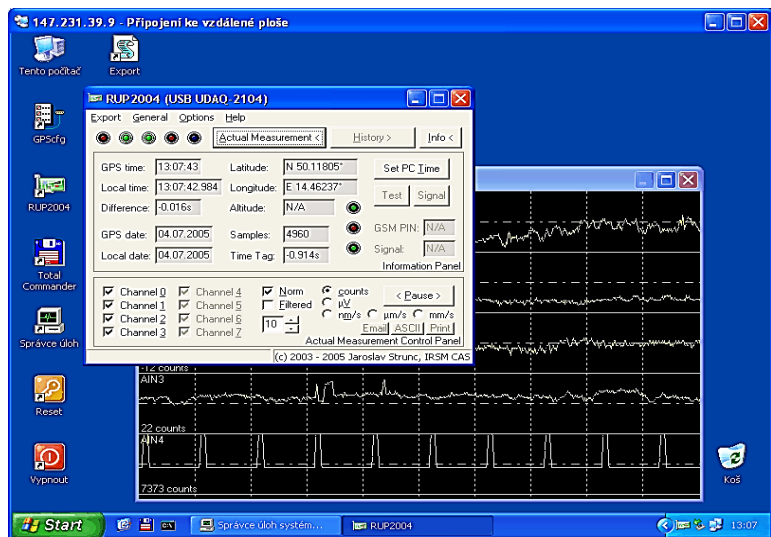
Pozice	Zkratky	Y [m]	X [m]	Z [m n. m.]
Ležky	LEZC	817394	1027954	480
Vítkovice	VTKC	821015	1029254	502
Poustky	PSTC	821695	1034487	562
Krty	KRTC	812367	1033706	487

- vyhledání míst s nízkým (přijatelným) seismickým šumem umožňujícím zachytit seismické jevy uvnitř oblasti od magnitudy $M = -1$.
- zajištění objektů pro seismické stanice u nekonfliktních vlastníků s možným napojením na elektrické napájení měřicí aparatury.

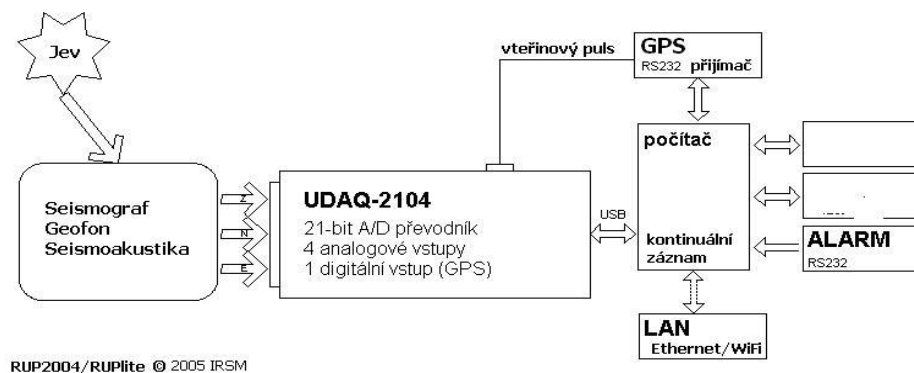
Realizace uvedené seismické monitorovací sítě se v zásadě řídí obecně známými pravidly podle doporučení pro výstavbu seismických sítí pro detekci blízkých zemětřesení. Podle LEE, W. H. K. a STEWARTA, S. W., (1981) má být vzdálenost nejbližší stanice od epicentra nejvýše rovna předpokládané hloubce hypocentra. Z toho vyplývá, že minimální vzdálenost mezi dvěma nejbližšími stanicemi odpovídá asi dvojnásobku hloubky hypocentra.

Z předpokládaného výskytu ohnisek při realizaci hlubinného úložiště RAO v hloubce 0,5 – 2 km lze uvažovat, že rozmístění stanic sítě by mělo být řádově ve vzdálenostech 2 – 8 km. Z důvodů řešení úlohy kinetické lokace ohnisek pak není vhodné, aby stanice ležely přesně ve stejných vzdálenostech od epicentra jevů. Pro úspěšné řešení lokace je v případě, že neznáme přesný seismický rychlostní model, nutné sestavit síť minimálně ze 4 stanic. Pro přesnější lokalizaci se doporučuje rozšíření na 5 – 7 stanic, kdy je vhodné, aby minimálně jedna z nich byla pro přesnější určení „Z“ souřadnice umístěna ve vrtu 150 – 200 m. V první fázi studií seismicity, je pro detekci nebo pro získání prvotních poznatků o seismické aktivitě postačující registrace čtyř seismických stanic.

Závažným parametrem pro úspěšnou lokalizaci seismických jevů pomocí této sítě je charakter horninového prostředí a rovněž uvažování vzdálenosti sítě od známých zemětřesných oblastí. V tomto případě se jedná o sledování přirozené seismicity v oblasti západočeských zemětřesných rojů, kde ve vzdálenosti cca 70 km se nachází nejvýznamnější seismická ohniska (Nový Kostel). V této oblasti se vyskytly v roce 1985 zemětřesení o magnitudu $M = 4,9$ a v roce 2014 o magnitudu $M = 4,2$. Podstatná je skutečnost, že tato silná



Obr. 3 Obrazovka seismické stanice s SWRUP 2015

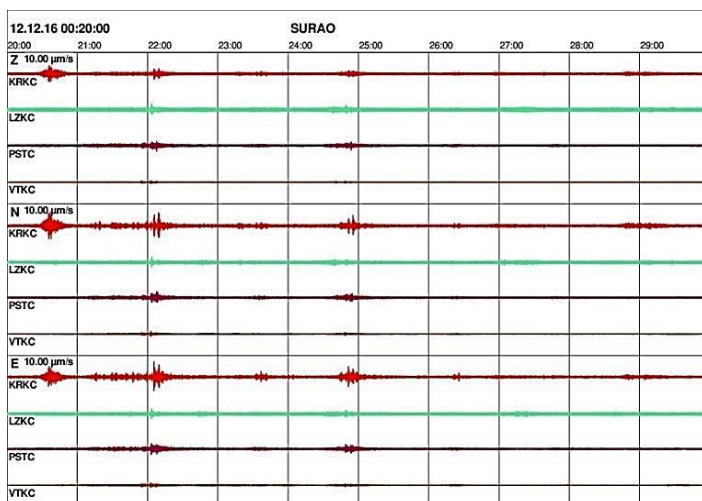


Obr. 4. Blokové schéma lokální seismické stanice pro monitoring indukované seismicity

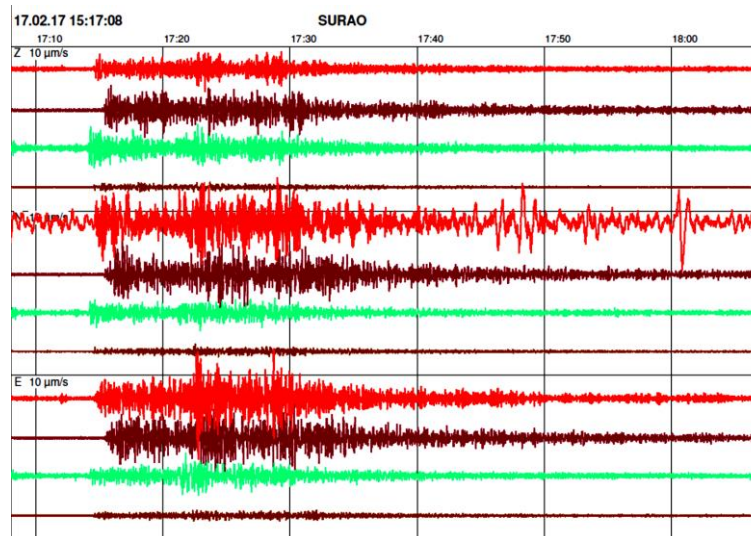
zemětřesení doprovází velké množství malých zemětřesení charakterizovaných jako „západočeské zemětřesné roje“, ve kterých vznikají jevy už od lokálního magnitudy $M = -2$. Tato přirozená zemětřesení v oblasti západních Čech jsou dlouhodobě monitorována seismickou sítí WEBNET, kterou provozují ústavy GFÚ a ÚSMH

Akademie věd ČR. Online zpracování zemětřesných jevů v seismickém bulletinu s lokalizací ohnisek umožňuje zpracování těchto jevů i v síti Čertovka. Provoz sítě WEBNET je veřejně dostupný na www.ig.cas.cz a metody zpracování jsou uvedeny např. v ŠTRUNC, J. a BROŽ, M., (2011).

3 Popis základní sestavy seismické sítě a jejích komponent



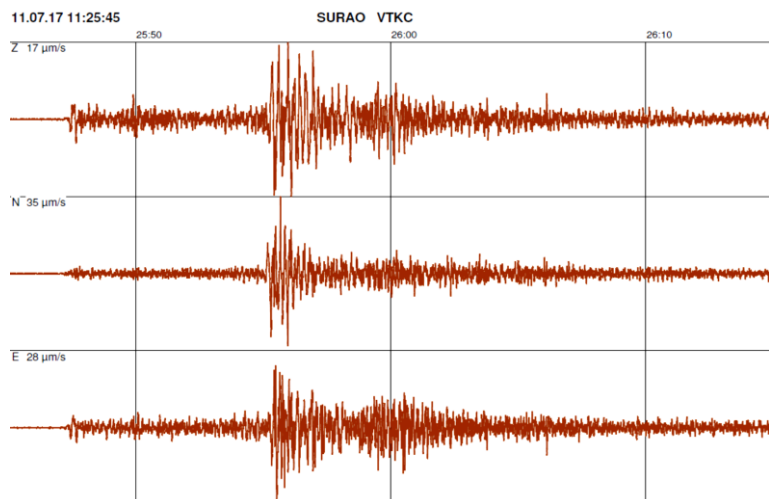
Obr. 5. Seismogram zemětřesení dne 12. 12. 2016 z oblasti Kraslic v západních Čechách



Obr. 6 Seismogram zaznamenaného clonového odpalu v lokalitě povrchových dolů Bílina dne 17. 2. 2017

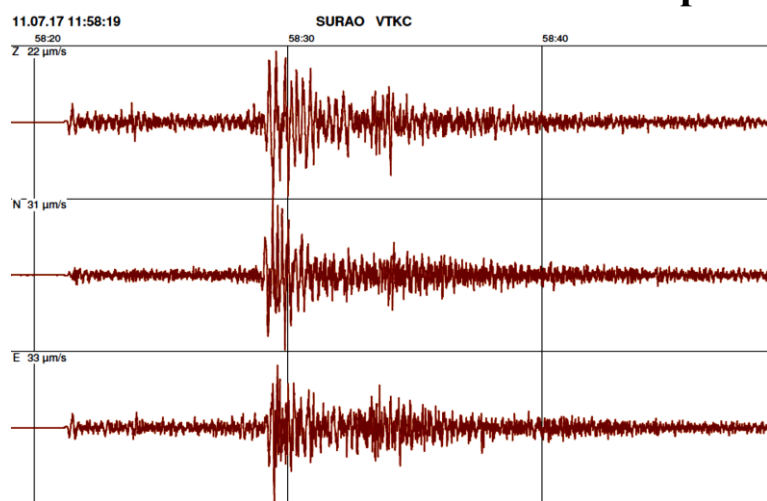
Pro řešení projektu sítě Čertovka byla zvolena hvězdicová struktura seismické sítě, kterou by bylo možné ve všech směrech průběžně doplnit dalšími stanicemi. Na straně seismických stanic byly použity standardní automatické stanice s 1 Hz snímači rychlosti kmitání LE3D (Lennartz Electronic). Jelikož zadání projektu nepožaduje přímé online připojení seismických stanic do interpretačního centra, byl zvolen režim správy seismických registrací formou zasílání SMS zpráv GSM modemy.

Pro síť Čertovka byly použity automatické seismické aparatury RUP2015 ; ŠTRUNC, J. a BROŽ, M., (2007). Toto technické řešení je původním systémovým návrhem firmy ARENAL s.r.o. ve spolupráci s firmou Tedia s.r.o. a s využitím interpretačních programů zpracovaných oddělením seismologie ÚSMH AV ČR. Tento seismologický monitorovací systém je ověřen více než čtyřmi desítkami jejich instalací v Čechách a na Slovensku. Srdcem záznamníku je průmyslový mikropočítač osazený originálním procesorem Intel s operačním systémem Microsoft Windows 10, který je dále vybavený přesným 4 kanálovým 28 bitovým AD převodníkem TEDIA UDAQ 2804, k němuž je připojený tříšložkový seismometr LE3D. Jedná se o středně periodický systém s vlastní frekvencí 1 Hz, pracující ve



Obr. 7 Zemětřesení v oblasti Luby v západních Čechách dne 11. 7. 2017 v 11h 25min – $M_l = 3,2$. Stanice VTKC (Vítkovice)

3.1 Metodika seismického měření a zpracování dat



Obr. 8. Zemětřesení v oblasti Luby v západních Čechách dne 11. 7. 2017 v 11h 58m – $M_l = 3,4$. Stanice Vítkovice

frekvenčním pásmu 0,5 Hz – 80 Hz s citlivostí $K = 400$ mV/mm/s (Lennartz Electronic SRN). Na obr. 3 je uvedena obrazovka registračního systému s průběhem seismického signálu. Blokové schéma aparatury je uvedeno na následujícím obr. 4. Další informace a demonstrační programy jsou k dispozici na adrese www.arenal.cz. Stanice je dodávána jako celek včetně seismického snímače, optimalizovaného operačního systému a registračního SW typu RUP 2015. Součástí seismické stanice je pak GPS přijímač Garmin GPS 18x LVC, GSM modem Siemens M1 a záložní zdroj s integrovaným akumulátorem 12 V – 12 Ah.

Každá složka tříložkového seismického snímače je připojena vždy k jednomu samostatnému kanálu AD převodníku přes operační zesilovač s volitelným zesílením. V základní variantě je použito vstupní napětí převodníku $\pm 2,5$ V, což při dané citlivosti snímače umožňuje záznam seismických rychlostí až $V = 6,25$ mm/s. Každá seismická registrační aparatura typu RUP 2015 může obsluhovat až 4 tyto převodníky, kdy tento systém je možné realizovat jako tzv. „malou seismickou síť“ pro přesnou lokalizaci v ohniskových oblastech, ŠTRUNC, J. a BROŽ, M., (2011).

Aparaturami RUP 2015, určenými pro dlouhodobý nepřetržitý seismický monitoring, jsou seismická data měsíčně snímána na externí HD, a to vždy v několika formátech pro jejich další vyhodnocení. Současně jsou tato data archivována do záložních měsíčních adresářů včetně kompletní časové informace vztahující se ke každému seismickému jevu.

Pro základní zpracování dat je používán program seismické vizualizace KUK 2015, pomocí kterého je možné zobrazit libovolně dlouhé časové úseky seismického záznamu současně všech 12-ti seismických kanálů. Dále se provádí výběr užitečných seismických jevů systémem korelační analýzy a jejich ukládání pro následnou frekvenční analýzu. Příklad tohoto zpracování dat je uveden na následném obr. 5. kde je uveden záznam slabých zemětřesení z oblasti Kraslicka dne 12. 12. 2016 v 00:20 hod. Na obr.6. je seismogram zaznamenaného clonového odpalu v lokalitě povrchových dolů Bílina dne 17. 2. 2017. Na následném obr. 7 a obr. 8. jsou seismogramy zemětřesení z lokality Luby dne 11. 7. 2017 zaznamenané na seismické stanici Vítkovice.

Seismická data jsou v registračním programu RUP 2015 zaznamenávány online ve dvou typech formátů. Struktura ukládání je vždy shodná, a to ve stromových adresářích: TYP DAT – ROK – MĚSÍC – DEN – ČAS. Po provedení odečtu dat – formou přepisu na externí HD, jsou data automaticky ukládána do adresáře: backup. Při stahování dat je automaticky vygenerován informační adresář s údaji: *Název stanice, Datum a Čas*. V tomto adresáři jsou kompletní soubory s podrobnými údaji o provozu stanice.

Každá seismická stanice posílá automaticky dva typy SMS zpráv:

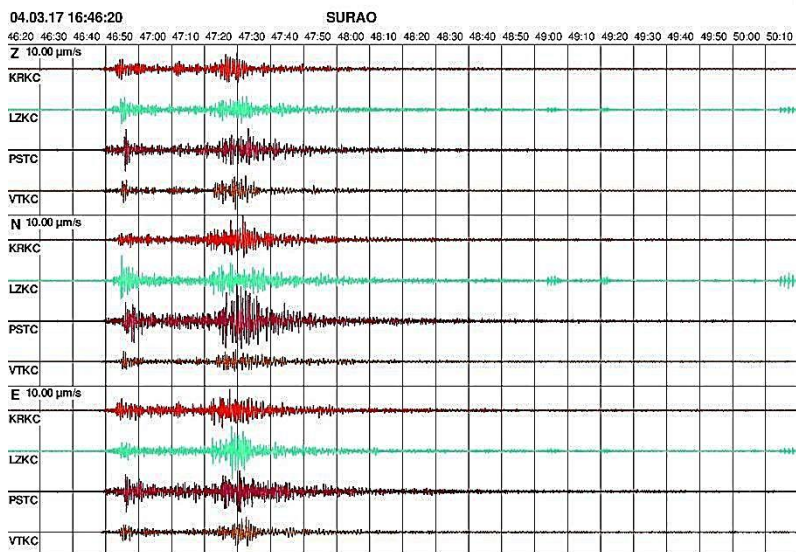
- Pravidelné SMS zprávy vysílané každý den ve stejném čase v 08:30 hod až 08:45 hod SEČ.
- Nepravidelné SMS - Trigger - jsou ze stanice odeslány, vždy pokud je překročena nastavená hodnota amplitudy rychlosti kmitání, a to ve specifických parametrech udávajících délku časového okna, ve kterém se signál vyhodnocuje - tzv. kritérium LTA/STA – překročení dlouhodobého šumu krátkodobým jevem.

Ukázka obsahu denní SMS zprávy ze seismické stanice síť Čertovka - VTKC active GAP 422GB 31.08.2016 06:44:29 -0.044s. Pro aktuální seismicitu lokality Čertovka mají význam především lokální mikrozemětřesení. Proto je podrobnější zpracování seismických dat zaměřeno na tyto lokální jevy. Pokud se ve sledovaném období vyskytnou, jsou pak přesně odečteny časy příchodu přímých podélných vln P a příčných vln S. Pokud to kvalita seismogramů umožňuje, tak se provede i 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 všech čtyřech seismických stanicích. Pokud je lokální mikrozemětřesení příliš slabé, nebo v případě velkého šumu, není možné přesnou lokalizaci provést. V tom případě je možné maximálně uvést alespoň nejbližší stanici k hypocentru, na kterou přijdou seismické vlny nejdříve, a na které je obvykle naměřena největší amplituda. Velikost mikrozemětřesení je charakterizována lokálním magnitudem. U silných jevů je možné určit i mechanismus ohniska.

Dále je prováděno základní statistické zpracování zaznamenaných jevů a srovnání s bulletiny České regionální seismické sítě, které jsou dostupné na webových stránkách Geofyzikálního ústavu AV ČR na adrese <https://www.czechgeo.cz/bulletin>. Z interpretačního hlediska je nutné znát i historický vývoj seismicity této oblasti z hlediska předpokládaného výskytu přirozených seismických jevů. Aktuální pohled na historickou seismicitu širšího okolí oblasti poskytuje stanovisko uvedené ve zprávě KALÁB, Z. a kol., (2015). O lokalitě je známo, že nebyla nikdy seismologicky studována, což je zdůvodnitelné tím, že nejsou ani historicky známy makroseismické účinky lokálních zemětřesení. Ve výše uvedené studii je např. uváděno, že kromě lomových trhacích prací se nejbližší seismická ohniska přirozených jevů od r. 1993 až do r. 2005 nacházela severovýchodně od této lokality ve vzdálenostech 25 km – 40 km.

Metoda lokalizace je podrobně popsána např. 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. V této fázi byl zvolen homogenní model s rychlostmi seismických vln, který byl upřesněn na základě měření rychlostí od odpalů na okolních kamenolomech a porovnán se záznamy na seismické stanici Průhonice.

V této fázi byl zvolen homogenní model s rychlostmi seismických vln $V_p = 5,320$ km/s a $V_s = 3,205$ km/s. Upřesnění těchto hodnot je možné provést optimalizací a to tak, aby časová residua pro většinu seismických jevů byla minimální. Podrobný rozbor přesnosti lokalizace je proveden v článku MÁLEK, J. a BROKEŠOVÁ, J. (2003). Pravděpodobná přesnost určení epicentra pro silnější jevy uvnitř



Obr. 9 Záznam indukovaného zemětřesení z podzemního měděného dolu v Lubinu (Polsko); 04. 03. 2017 16: 46: 20 hod

zaregistrovat s danou instrumentací. Jak již bylo uvedené výše, jsou to jak vzdálená i blízká evropská zemětřesení (Řecko, Itálie, Rakousko, Slovensko), silná indukovaná zemětřesení a důlní otřesy (Polsko, Ostravsko karvinský revír) a dále pak vzdálené seismické účinky těžebních odpalů v oblasti Čech. Dále je možné identifikovat zaregistrované přirozená zemětřesení z oblasti západočeských zemětřesných rojů (Chebsko) a velmi málo četná zemětřesení i z celé oblasti Čech, pokud vzhledem k vzdálenostem jejich amplitudy převýší lokální šum na stanicích (Orlík, Náchodsko). Jako příklad uvádíme seismogram zaregistrovaného důlního otřesu v lokalitě podzemních dolů na měď v Polském Lubinu, viz obr. 9. Na obr. 10. je uveden seismogram jevu, který se nepodařilo identifikovat podle regionálních seismických bulletinů i když byl poměrně prokazatelně zaznamenán na všech stanicích této seismické sítě.

5 Závěr

Z dosavadních vyhodnocení seismické sítě Čertovka je možné prokazatelně konstatovat, že tato síť pracuje v souladu s projektovanými parametry, a to jednak po stránce bezporuchového kontinuálního provozu, který je sledován online denními SMS zprávami a dále detailně popisován v provozních souborech „rup-seis.log“ každé stanice. Dále je možné konstatovat, že byly prokazatelně ověřeny citlivostní charakteristiky této sítě, a to na základě vyhodnocení záznamů jak zemětřesení blízkých i vzdálených, tak i na záznamech od těžebních odpalů z kamenolomů. Ve vysoké kvalitě byly zaznamenány seismické průběhy na 12 kanálech z Italských

sítě, které jsou zaznamenány na všech čtyřech stanicích, může být přibližně kolem 300 - 400 m. Chyba v určení hloubky je výrazně větší. Pro slabé jevy, případně pro jevy vně sítě, je tato přesnost podstatně horší. Chyba v určení hloubky je výrazně větší. Pro slabé jevy, případně pro jevy vně sítě, je tato přesnost podstatně horší.

Lokální magnitudo charakterizuje velikost otřesu. Vzorec pro jeho výpočet byl odvozen tak, aby byl napojen na systém výpočtu magnituda, které používá Česká národní seismická síť, podle stanice Průhonice:

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

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 nezkrácený seismogram. Nakonec je prováděno základní statistické zpracování zaznamenaných jevů.

4 Příklady indukovaných a lokálních seismických jevů zaznamenaných na seismické síti Čertovka

Seismická registrace na 4 stanicích sítě Čertovka poskytuje po dobu registrace úplný přehled o všech seismických jevech, které je možné v této oblasti

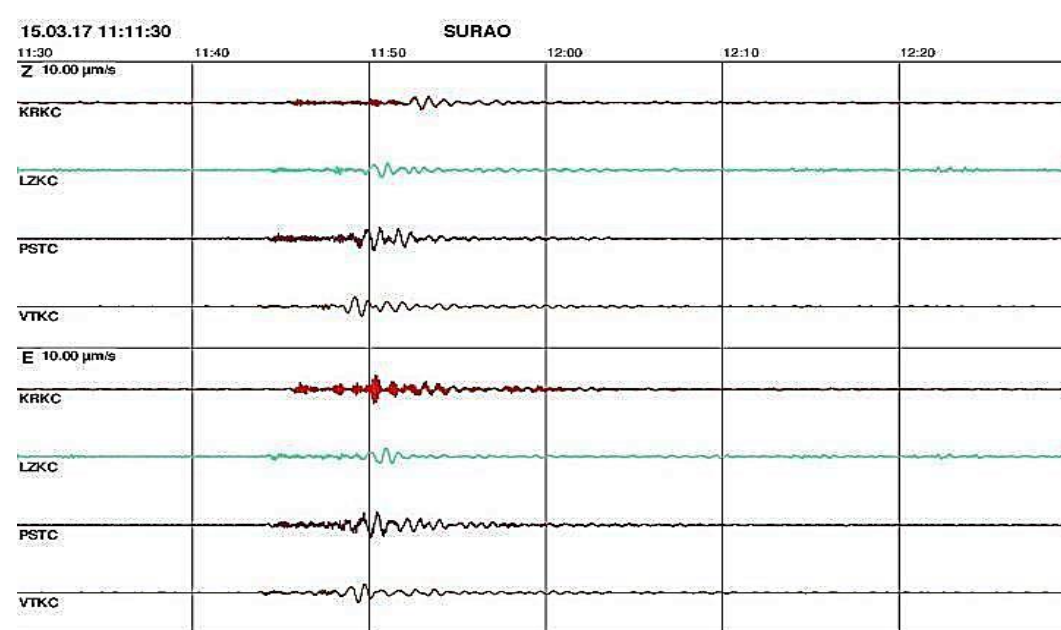
zemětřesení v roce 2016 a Rakouských zemětřesení v roce 2017. Dále byly zaznamenány seismické jevy z oblasti západočeských seismických rojů v západních Čechách a odezvy trhacích prací z oblasti severních a západních Čech.

Vzhledem k osazení stanic seismickými snímači rychlosti kmitání typu LE3D (Lennartz Electronic) je třeba vzít v úvahu, že tyto snímače, které pracují ve frekvenčním rozsahu 1 – 80 Hz, registrují dlouhé seismické vlny od vzdálených zemětřesení s patřičným útlumem zaregistrovaných amplitud seismických rychlostí kmitání. Pro registraci lokálních zemětřesení ale mají optimální parametry, neboť tyto jevy se vyskytují v oblasti frekvencí řádově od 2 do 60 Hz v souvislosti s vyšším útlumem vysokých frekvencí se vzdáleností.

Z dosavadního vyhodnocení zaregistrovaných jevů bylo zjištěno, že na seismických záznamech od těžebních odpalů např. z Bíliny na obr. 6. (severní Čechy) je možné provést zpřesnění charakteristik horninového masivu v těchto profilech. Této skutečnosti bude využito i při dalších záznamech těžebních odpalů (kamenolom Mladotice) kdy budou již zaznamenávány i originální časy v místech odpalů.

Literatura

- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., LINDA, M. Seismický záznamník - *Užitný vzor č. 28 283* (9. 6. 2015), 2015
- ŠTRUNC, J and BROŽ, M. The Detection of Weak Earthquakes in the Western Bohemian Swarm Area through the Deployment of Seismic Arrays, *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol. 8, No. 4 (164), 2011, p. 1–9
- KALÁB, Z. a kolektiv. *Seismická stabilita území*, Technická zpráva SURAO a.s. Praha, Ústav Genomiky AVČR, v.v.i. Ostrava, 2015.
- 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 Háje-Příbram, *Acta Montana* 22 (129), 2003, p.65-73.
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J. 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
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., MÁLEK, J. and LINDA, M. Measuring of Induced and Technical seismicity using Portable Apparatus BRS32, *Conference proceedings-Blasting Techniques 2014*, 2014, p. 120-132, ISBN 978-80-970265-6-1



Obr. 10 Seismogram slabého lokálního seismického jevu ze dne 15. 3. 2017

- 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, 2015, str. 19-30
- BROŽ, M., DUDA, R., ŠTRUNC, J. Zkušenosti s podzemním seismickým monitoringem při ražbě dálničních tunelů ve Višňové u Žiliny (SR), *Conference proceedings- Blasting Techniques*, 2017, str. 13-23, ISBN 978-80-970265-7-8
- ŠTRUNC, J., BROŽ, M. Seismické přístroje pro lokální měření a monitorovací sítě, *Trhací technika a pyrotechnika, Zpravodaj 3/2007*, ČVTS, Společnost pro trhací techniku a pyrotechniku Praha, 2007, str.9-11
- LEE, W.H.K. and STEWART, S.W. *Principles and Applications of Microearthquake Networks Advances in Geophysics U.S Geological Survey*, Menlo Park, California. Academic Press, 1981
-

Authors

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

² Oldřich Levý, INSET s.r.o., Praha 3, levy.oldrich@inset.com

³ Jaroslav Štrunc, ARENAL, s.r.o., Praha 5, jaroslav_strunc@seznam.cz