

SEISMICKÁ MONITOROVACÍ SÍŤ PRO GEOTERMÁLNÍ VRTY V LITOMĚŘICÍCH

SEISMOLOGICAL MONITORING NETWORK AROUND GEOTHERMAL BOREHOLES IN LITOMĚŘICE

Milan Brož¹, Jaroslav Štrunc², Jiří Málek³, Antonín Tým⁴

Abstrakt

Výstavou a provozem geotermálních zdrojů získávajících technologickou teplou vodu z horninového masivu vrty v hloubkách 3 až 5 km mohou vznikat indukovaná zemětřesení s lokálním magnitudem až $M_l = 3,5$. Jelikož jsou zdroje zpravidla budovány v blízkosti měst, mohou se svými makroseismickými účinky projevit nepříznivě na stavby v nejbližším okolí a tedy i na psychice obyvatelstva, což může vést až k ukončení provozu zdroje. Tyto zkušenosti jsou známy z realizovaných geotermálních vrtů např. Soultz (Francie), Basilej a St. Gallen (Švýcarsko), Landau (Německo). V současné době je v lokalitě Litoměřic připravována realizace geotermálního zdroje pro provoz teplovodní výtopny města, která v první etapě vyvrcholila v roce 2007 provedením zkušebního vrtu do hloubky 2111 m. Tento příspěvek se věnuje realizaci seismické monitorovací sítě v okolí tří projektovaných geotermálních pětikilometrových vrtů pro stanovení charakteru přirozené i indukované seismicity v okolí v době, kdy není tato ovlivňována novým geotermálním zdrojem.

Abstract

Geothermal energy sources gaining high-temperature water from deep rock massif by the underground heat exchanger with several boreholes deep from 3 to 5 km are known as emerging causes of induced seismicity depending on local geology with magnitude up to 3.5. These geothermal facilities are often built near the cities and may affect civil buildings. Such situation always moves the public verdict against the project and may lead to its cancellation. There are many significant examples – Soultz (France), Basel and St. Gallen (Swiss), Landau (Germany). A geothermal project by the city of Litoměřice is being currently prepared. The first stage was successfully finished in the year 2007 by reaching the depth of 2111 m by a reference borehole facility. This article is dealing with preparation of seismological monitoring network around the planned area of geothermal facility. Its aim is to describe the local seismicity – natural and induced – before the geothermal facility will be started to build and operating.

Klíčová slova

geotermální energie, indukovaná seismicita, přirozená seismicita, seismická stanice, vrt

Keywords

energy, geothermal, induced seismicity, natural seismicity, seismic station, borehole

1 Administrativní postup pro realizaci geotermálního zdroje

Základním technickým předpokladem pro realizaci takového díla je provedení geologické studie dané lokality, která obsahuje i základní geofyzikální průzkum zahrnující jak studium teplotního režimu svrchní vrstvy zemské kůry, tak zejména ověření složení geologických vrstev 3D seismickým průzkumem. Nedílnou součástí je pak zjištění přirozené seismické aktivity oblasti alespoň ročním monitoringem před započatím vrtání. Tato seismická síť bude v době vrtání a následně v době vytváření podzemního horninového výměníku doplněna o hustou vysokofrekvenční (seismoakustickou) lokální síť pro přesnou lokaci jevů charakterizujících porušování masivu v prostoru výměníku. Kromě těchto technických předpokladů je nutné se věnovat i potřebné administrativě pro provedení díla a v nemalé míře i osvětě související s otevřenou informovaností o připravovaném podzemním zdroji se všemi jeho případnými důsledky na stávající osídlení.

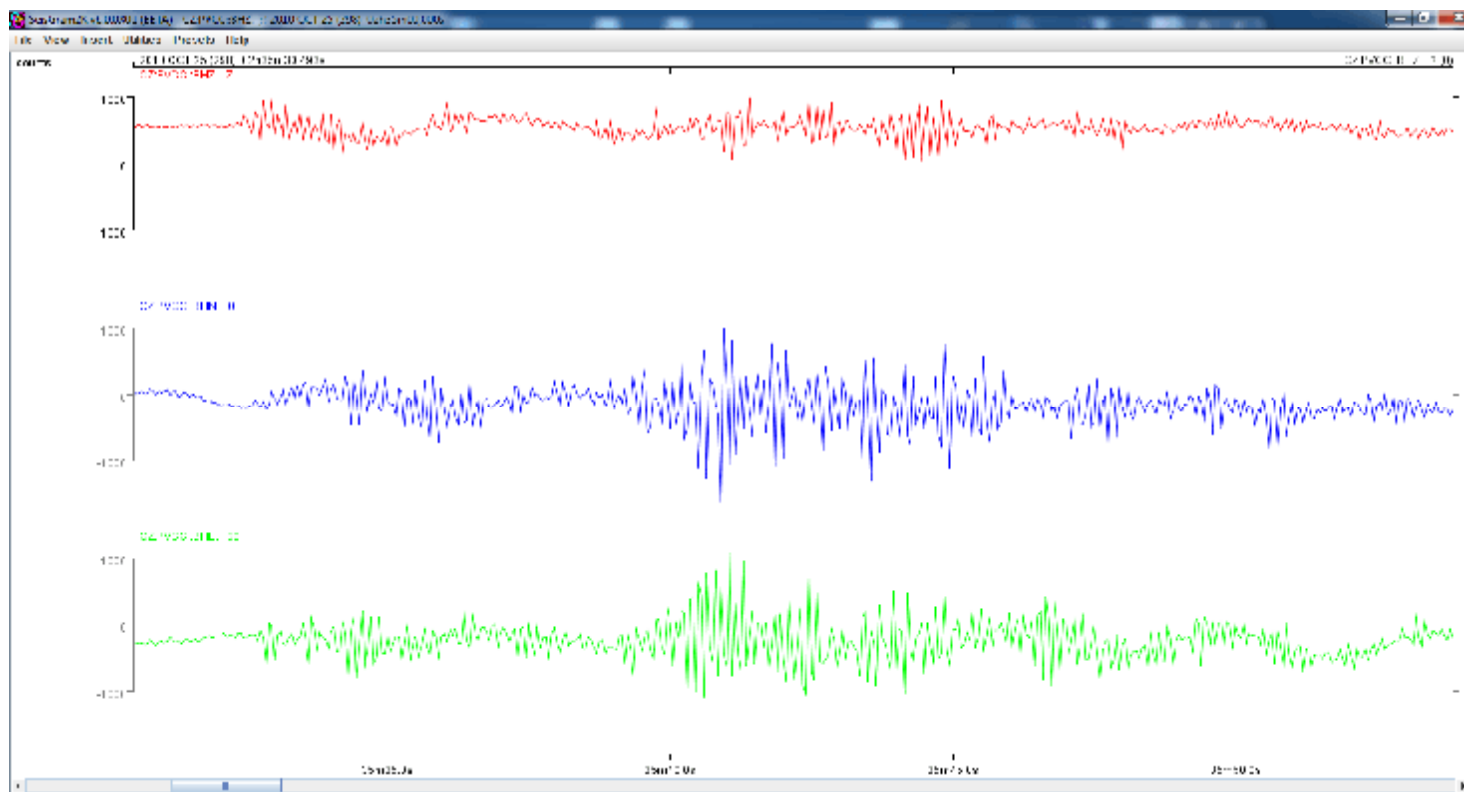
Jelikož se v tomto jedná o první realizaci v ČR, je nutné získat zásadní stanoviska státních orgánů pro provádění stavby. Tyto stanoviska spočívají v rozhodnutí Min. životního prostředí k „Stanovení chráněného ložiskového území pro zvláštní zásah do zemské kůry“ a rozhodnutí Českého báňského úřadu k „Povolení zvláštního zásahu do zemské kůry“.

Součástí těchto řízení je i předložení projektu řešení seismické problematiky, která vyžaduje jednak základní charakteristiku seismicity oblasti zejména pak i podrobný tektonicko-geologický průzkum území se zmapováním vzniku možných doprovodných seismických jevů a jejich dopadů na území města Litoměřice. Zejména musí být zmapovány možné vlivy na majetek osob na tomto území včetně nástinu možných řešení při vzniku škod. Dále se vyžaduje aktuální zhodnocení úrovně přirozené seismicity a indukovaných seismických jevů. Pro realizaci těchto průzkumů je třeba doporučit odpovídající měřicí systém a dobu seismického monitoringu před počátkem výstavby a následně i v průběhu výstavby. Jedná se o časový harmonogram rozmístění sítě stanic seismického monitoringu a odpovídající územní určení jednotlivých stanic seismického monitoringu, včetně hodnocení a analýzy výsledků z prováděných měření.

Tyto úkoly realizace je možné shrnout do úkolu jak zjistit a určit seismicitu v oblasti a jak monitorovat seismicitu při vrtání a injektáži. K tomu je nutné posoudit, zda lze zabránit vzniku pocítěných zemětřesení a stanovit jak velká lze předpokládat max. magnituda a zda je možné minimalizovat riziko zastavení projektu kvůli vyvolání zemětřesení.

Z technického hlediska je dále třeba stanovit způsob realizace stanic seismické sítě a určit počet vrtů pro monitorování indukované mikroseismicity v blízkém okolí díla včetně přípravy potřebného SW pro on-line lokaci seismických ohnisek. V úvahu je třeba vzít současnou legislativu pro seismické účinky způsobené technickou seismicitou, do které náleží i indukované seismické jevy uvažovaného geotermálního díla. Jedná se jednak o doporučení normy ČSN 730040 a jednak respektování evropské seismické normy Eurocode 8 – EN 1998:2004 Design of structures for earthquake registering. Přílohou uvedené normy je i mapa seismických oblastí ČR, která vymezuje oblasti podle návrhového zrychlení základové půdy. Pro oblast „Litoměřice“ je tato hodnota návrhového zrychlení základové půdy v hodnotě do $a = 0,06$ g.

Z dosavadního studia aktuální přirozené seismicity oblasti za posledních pět let můžeme uvést lokální zemětřesení o magnitudu $M = 2,2$ okolí Jablonce nad Nisou, které je od lokality vrtů v Litoměřicích vzdálené 74 km. Záznam tohoto zemětřesení je uveden na obr. 1. Jedná o seismogram zaregistrovaný na seismické stanici Panská ves (PVCC) české seismické sítě (GFÚ AVČR).



Obr. 1 Seismogram zemětřesení v Jablonci nad Nisou, 25. 10. 2010

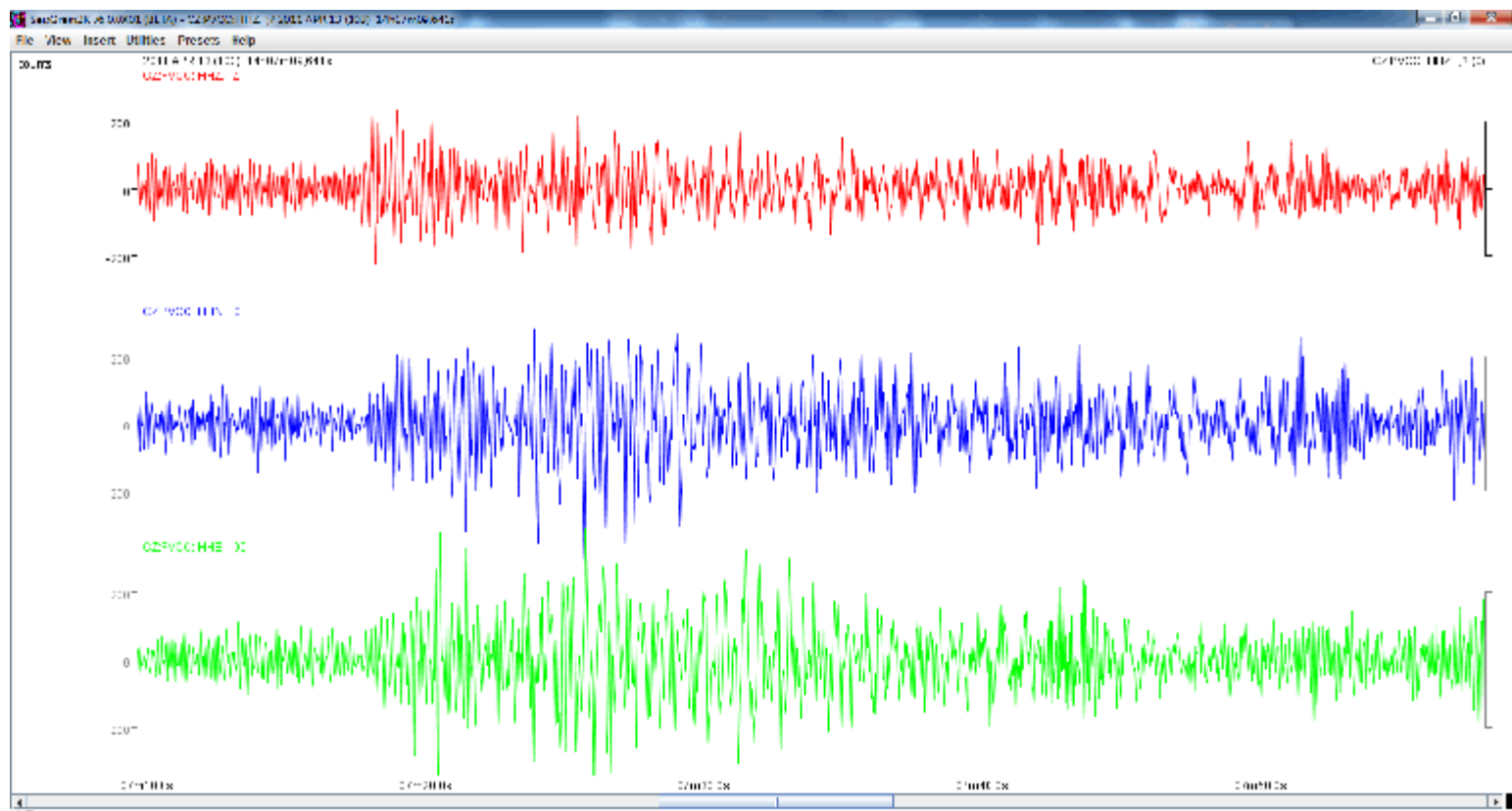
Jako druhý příklad uvádíme záznam seismických účinků velkého komorového odpalu v kamenolomu Dobkovičky, obr. 2, který je od vrtů vzdálen 10 km. Záznam tohoto odpalu byl zaregistrovaný na stanici PVCC vzdálené od odpalu 39 km a měl amplitudu posunutí $L = 1,02$ mm.

1.1 Do studia seismicity oblasti jsou zahrnuty tyto seismické zdroje:

- Lokální šum na stanici, je způsoben především pohybem motorových vozidel a vlaků a osob blízkosti stanice.
- Dlouhoperiodický šum, je tvořen mikroseismy s periodou přibližně 6 s.
- Těžební odstřely v blízkých kamenolomech, do vzdálenosti 10 km (Dobkovičky, Prackovice, Libochovany).
- Regionální zemětřesení, z oblastí Polska, a západních Čech.
- Blízká evropská zemětřesení, z okolních oblastí – Rakousko, Slovensko, Maďarsko, Itálie, Německo, Švýcarsko, Holandsko.
- Silná vzdálená zemětřesení.

K uvažovaným přirozeným a indukovaným seismickým jevům je nutné přiřadit i poměrně málo se vyskytující jevy se značnou nebezpečností. Jsou to zejména pády letadel a v dané oblasti i exploze cisteren v technologiích blízkých chemických provozů nebo i přepravních vlakových, popř. silničních, cisteren včetně havárie skladových nádrží paliv v okolí Kralup nad Vltavou.

Určitým vodítkem pro posuzování seismicity pro první geotermální zdroj může být i předpis používaný od r. 2012 v USA „Protocol for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems” DOE/EE-0662 – Geothermal Technologies Program USA – January 2012.



Obr. 2 Seismogram komorového odpalu $Q = 30$ t v kamenolomu Dobkovičky, 13. 4. 2011 (stanice PVCC)

2 Podmínky návrhu seismické monitorovací sítě GTE Litoměřice

Při návrhu seismické sítě se v prvním přiblížení řídíme doporučením pro výstavbu seismických sítí pro detekci blízkých zemětřesení. Podle Lee a Srewarta, 1981 má být vzdálenost nejbližší stanice od epicentra nejvýše rovna předpokládané hloubce hypocentra. Z toho vyplývá, že vzdálenost mezi dvěma nejbližšími stanicemi odpovídá asi dvojnásobku hloubky hypocentra. Z předpokládaného výskytu ohnisek při vytváření tepelného výměníku v hloubkách 4 až 5 km lze uvažovat, že rozmístění stanic sítě by mělo být řádově ve vzdálenostech 8 až 10 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, v některých pramenech se doporučuje jako optimální sestava ze šesti až sedmi stanic.

V první fázi studií seismicity je pro detekci nebo pro získání prvotních poznatků o seismické aktivitě postačující registrace dvou seismických stanic. Pro následnou lokaci ohnisek v rovině pak z matematické formulace vyplývá minimální požadavek 3 resp. 4 stanic, pro prostorové lokalizace se počet stanic zvyšuje na 6 až 8. V tomto případě je již nutné brát v úvahu i reálné schopnosti jednotlivých registrací a zejména možnosti multiplexního programového zpracování dat z těchto stanic.

Pro lokalitu jsou uvažovány klasické metody lokalizace seismických ohnisek, které následně budou zdokonaleny typovou analýzou. Základním předpokladem úspěšné lokalizace je pokud možno širokopásmový záznam celého vlnového obrazu seismického jevu na všech stanicích seismické sítě. Nejvíce užívané jsou kinematické metody lokace, které jsou založeny na předpokladu, že známe např. časy příchodu t_p nebo t_s seismických vln P a S a že je s dostatečnou přesností i znám rychlostní profil horninového prostředí (v_p nebo v_s). Potom pro každou stanicí sítě je možné spočítat vzdálenost l od ohniska takto:

$$l = v_i \times (t_i - t_0), \quad (1)$$

l - vzdálenost od ohniska [km],

v_i - rychlost seismické vlny [km/s],

t_i - čas příchodu seismické vlny k místu registrace [s],

t_0 - čas vzniku jevu [s].

Pro síť minimálně 4 stanic pak dostáváme soustavu rovnic, po jejichž výpočtu stanovíme jak prostorové souřadnice ohniska, tak i originální čas vzniku jevu. Při větším počtu stanic je již využívají i statistické metody výpočtu. Vzdálenost mezi seismickou stanicí a ohniskem se stanoví výpočtem:

$$l = v(S - P) \times t(S - P), \quad (2)$$

$v(S-P)$ – rychlost fiktivní seismické vlny S-P [km/s],

$t(S-P)$ – rozdíl časů příchodu P a S vln na stanici [s].

Další metody, které je možné využívat, jsou:

- azimutální metoda
- amplitudová metoda
- metody typové analýzy

Výhodné je využít vhodné kombinace některých těchto metod. Pro objektivní aplikace lokačních metod je nutné vzít úvahu tyto faktory ovlivňující úspěšnost lokalizace seismických jevů:

- množství a optimální rozmístění stanic;
- znalost rychlostní charakteristiky prostředí;
- přesnost časových údajů;
- úroveň seismického neklidu;
- rozměry ohnisek.

Pro provoz sítě je důležité stanovení lokalizační přesnosti – tato sice vychází z lokalizačního modelu ale až na základě praktických výsledků je možné stanovit horizontální složku lokační chyby, chybu hloubky a chybu času vzniku jevu.

3 Problematika umístění jednotlivých stanic sítě

Základním parametrem pro umístění stanice je úroveň seismického šumu. Pro stanovení tohoto parametru je třeba odpovědně provést šumová měření. Tato měření byla na vybraných stanovištích prováděna speciálními monitorovacími aparaturami se širokopásmovým snímačem Guralp CMG-40T s kontinuálním několikadenním záznamem seismického neklidu minimálně po dobu 2 -3 dní na každém stanovišti. Používané metodiky následného vyhodnocení těchto měření jsou založeny na výpočtu amplitudových a frekvenčních spektrálních poměrů na jednotlivých stanovištích. Základním ukazatelem vhodnosti daného stanoviště je problematika odhadu minimálního registrovaného magnituda. Toto kritérium se stanoví podle základní definice Richtera lokální magnituda (Richter, 1935). K tomuto výpočtu je třeba znát hodnotu kalibrační funkce uvedené oblasti. Jelikož tyto nejsou současně k dispozici, je možné využít kalibrační funkce nejbližší seismické stanice sítě ČR v Panské Vsi. Pro odhad hodnoty minimálního registrovaného magnituda je nutné stanovit následující předpoklady:

Poměr detekovaného signálu k denní (resp. noční) hodnotě úrovně šumu (např. 8:1), uvažované hodnoty epicentrálních vzdáleností (např. 3, 4, 6 km), uvažované hloubky seismických ohnisek (např. 5 km), převládající frekvence uvažovaného signálu (15–25–40 Hz), tato veličina bude mít různou velikost při budování podzemního kolektoru – spíše lze očekávat vyšší frekvence oproti indukovaným otřesům vyvolaným při provozu tepelního výměníku které by mohly být v rozsahu do 10Hz.

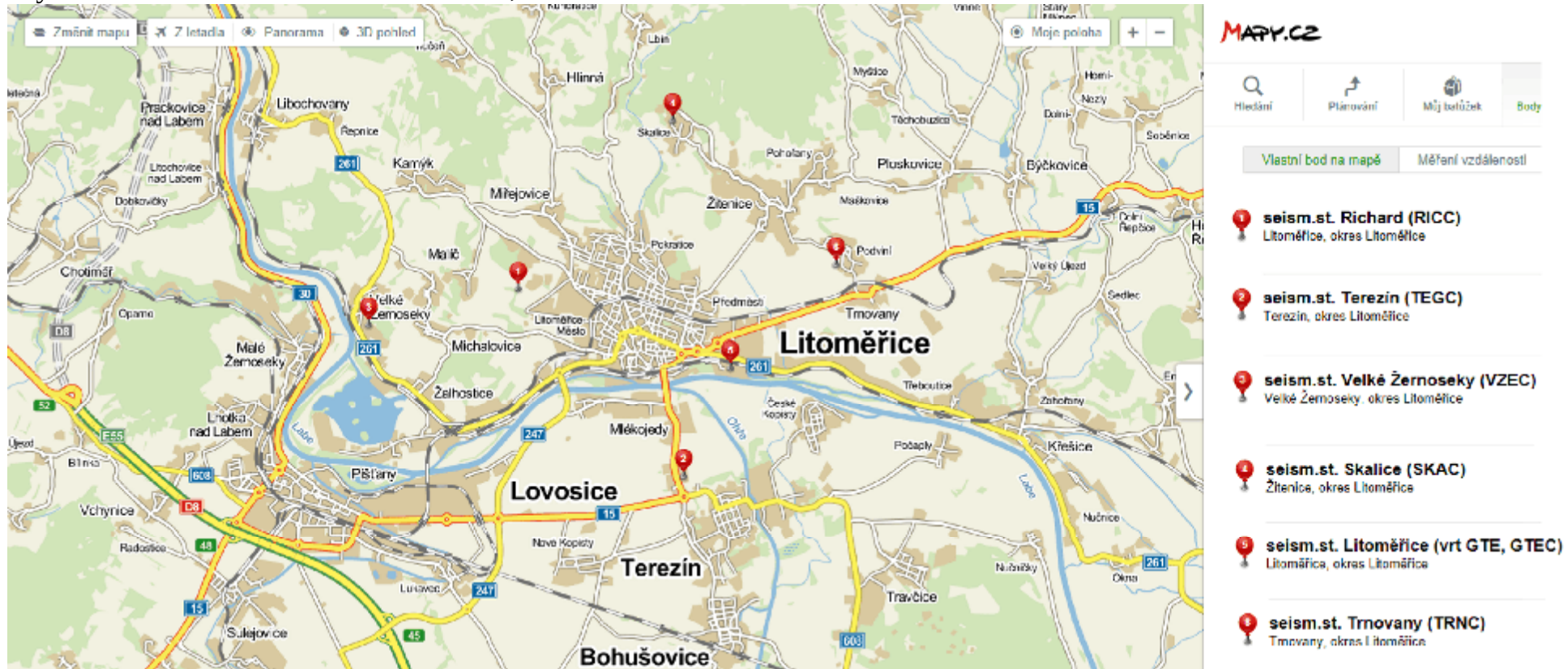
4 Topologie seismické sítě GEBSNET1

Na základě uvedených kritérií a v souladu s konkrétními možnostmi geografickými a civilizačními podmínkami bylo sestaveno základní umístění šesti stanic seismické monitorovací sítě, pro kterou je navržen název „GEBSNET1“ (GEothermal Bohemia Seismic NETwork 1), obr. 3.

Na pracovišti oddělení seismotektoniky ÚSMH AV ČR byla stanovena koncepce HW a SW vybavení seismických stanic, které budou tvořit homogenní seismickou síť s automatickým provozem a on-line přenosem dat do vyhodnocovacího centra které bude zřízeno realizátorem projektu na vybraném stanovišti. V následné etapě realizace geotermálních vrtů bude toto datové centrum převedeno do řídicího centra technologie vrtání. HW vybavení seismických stanic je tvořeno třísložkovými širokopásmové seismografy Guralp CMG-40T, který je připojen na 28bitový převodník do monitorovací stanice typu RUP 2012 a synchronizován GPS časovým signálem. Kontinuální automatický provoz stanice zajišťuje přes internet přenos dat a dále je průběžně prováděno 24hodinové automatické vyhodnocení seismických tremorů odesílaných emailem k operátorům sítě. Požadovaná 99% spolehlivost provozu je zajištěna generováním kontrolních SMS zpráv.

V řídicím centru bude spuštěn SW automatické detekce jevů překračujících stanovenou amplitudu rychlosti seismického kmitání. Průběžné zpracování seismických záznamů dále obsahuje archivaci všech datových souborů a vyhodnocení průběžných seismických záznamů na všech činných stanicích s vytvořením seismického bulletinu lokálních jevů jejich lokalizací grafickým výstupem významných

seismogramů. Současně jsou vyhodnocovány i vzdálenější seismické jevy (odpaly, průlety letadel a pod), které budou konfrontovány se záznamy České seismické sítě – stanice PVCC, Panská Ves.



Obr. 3 Umístění stanic seismické monitorovací sítě „GEBSNET1“ (dle mapy.cz)

5 Realizované a projektované seismické stanice a jejich technické parametry

5.1 Seismická stanice SKAC, Skalice

Tato stanice byla vybudována MÚ Litoměřice v květnu 2013 v osadě Skalici. Seismický snímač je umístěn v cca 4m hluboké seismické studni v zahradním domku. Sestava je tvořena snímačem Guralp CMG-40T a seismickým záznamníkem RUP2012, který pracuje pod OS Windows. (Obr. 4). Automatický provoz je zajištěn záložním zdrojem a on-line přenosem dat na internet do datového centra odd. seismotektoniky (adresář GTE Litoměřice). V roce 2013 byla zpracována dílčí zpráva o seismickém monitoringu stanice SKAC.

5.2 Seismická stanice RICC, štola Richard

Instalace stanice byla realizována na základě objednávky s. p. SURAO v prosinci 2013 přímo v úložišti RAO Richard a to v zadní části křížové chodby. Tato stanice je osazena shodným technickým vybavením jako stanice SKAC se seismometrem Guralp 40T. Kromě obvyklé lokální sestavy (seismometr a záznamník) obsahuje i hydrogeologický monitoring dané lokality. Data jsou zatím ukládána na lokální HD a připravuje se internetové připojení stanice do datového centra sítě GEB-NET1.(Obr. 5).



Obr. 5 Seismická stanice RICC – štola RICHARD

lokální disk a přenášena při měsíční kontrole stanice. Následně jsou data předána do datového centra GTE pro společné vyhodnocení se daty stanic SKAC a RICC. (Obr. 6).

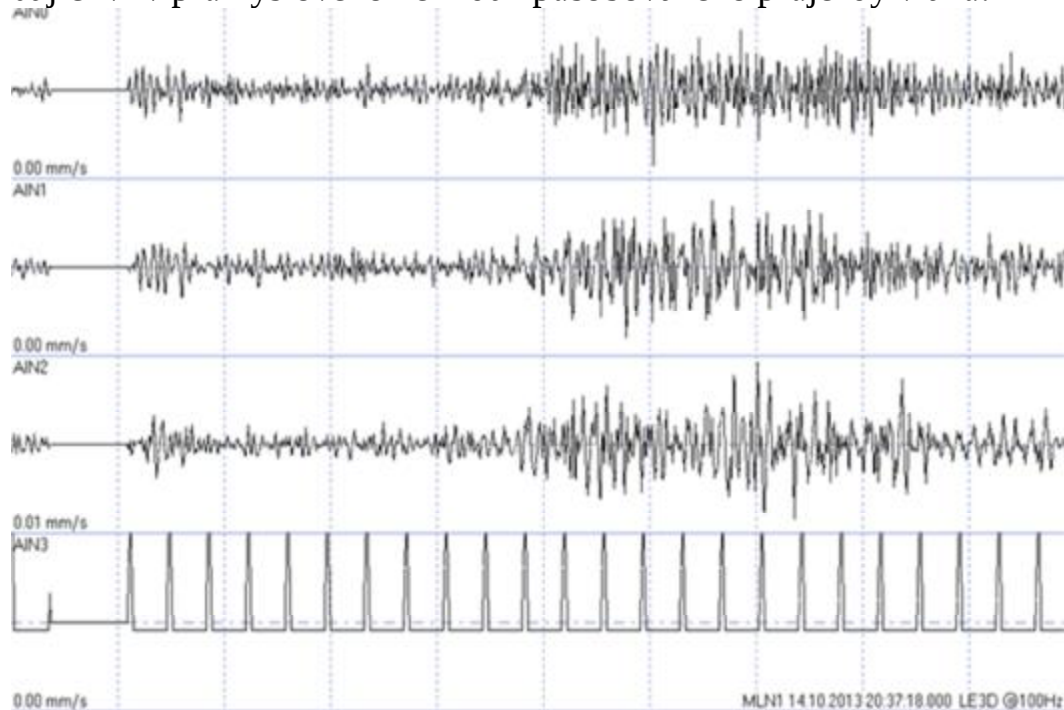


Obr. 4 Seismický pilíř stanice SKAC

5.3 Seismická stanice VZC, Velké Žernoseky

Tato stanice byla vybudována firmou ARENAL, s.r.o. dubnu 2013 v zahrádkářské kolonii obce Velké Žernoseky. Seismický snímač je umístěn ve vinném sklípku zapuštěném do strážné s čedičovými výchozy. Sestava je tvořena snímačem Lennartz LE3D a shodným seismickým záznamníkem RUP2012 který pracuje pod OS Windows. Automatický provoz je zajištěn záložním zdrojem a on-line přenosem informací o provozu stanice SMS zprávami. Data jsou ukládána na

Pro následné tři seismické stanice – Terezín, Trnovany a Vrt1 jsou vypracovány prováděcí projekty a jejich realizace bude v průběhu roku 2014. Na těchto stanicích byly stanoveny podmínky instalace a provedeno základní měření seismického neklidu. Pro potřeby hydrogeologického monitoringu je navržen i cca 200 m průzkumný vrt v lokalitě Velké Žernoseky, který by mohl být současně využit jako seismická stanice potlačující vliv průmyslového neklidu způsobovaného průjezdy vlaků.



Obr. 7 Seismogram slabého zemětřesení u Domažlic, $M = 2,3$, zaznamenaného na stanici VZC dne 14. 10. 2013

tech ze zahraničí zajistit objektivní seismické sledování zájmové oblasti. Zkušenosti z předchozích realizací ze zahraničí jsou se zemětřeseními o magnitudu, M_L , 2 až 3. Tyto jevy jsou však, vzhledem k malým vzdálenostem od hypocenter (2 až 6 km) doprovázeny i makroseismickými účinky a jsou i fyzicky pociťovány občany. Z těchto důvodů je třeba kromě základní registrace zajistit i přesnou identifikaci a lokalizaci seismických jevů, kterou se zajistí i průběžná informovanost obyvatelstva. Další podmínkou je koordinace řízení spojená s výstupy dat seismické sítě a vysoká technologická kázeň provozu GTE.



Obr. 6 Seismická stanice VZC – Velké Žernoseky

6 Závěr

Realizace seismické monitorovací sítě v lokalitě budoucího geotermálního zdroje je v této první fázi přípravy výstavby zaměřena na on-line sledování přirozené seismicity a technické seismicity. Vzhledem k tomu, že dosud neexistuje metodika jak zabránit vzniku indukovaných seismických jevů, je vhodné po zkušenos-

References

- BROŽ M., STRUNC J., TEŠITEL M. Monitoring of seismic Effects of Blast at Quarries and Mines, *Blasting Technic and Pyrotechnic*, 2006, Czech Association of Scientific and Pyrotechnic, Association for Blasting Technology and Pyrotechnic, Prague – ISBN 80–0103547-6.
- BROŽ M., MÁLEK J., ŽANDA L. Characteristics of the Seismic Waves Generated by Quarry Blasts. *XXVII Gen. As. ESC Lisbon Book of Abstracts and Papers*, SSB-1-08-0, 2000, p. 64
- BROŽ M., ČÍŽ R., MÁLEK J., ŽANDA L. Seismic Stations With GSM Telemetry for Registration of quarry blasts, *Acta Montana*, Publ.Inst. of Rock Struc. And Mech., Czech. Acad. Sc. Series A, No. 16 (118), 2000, p. 25–32.
- BROŽ M. Detection of the Origin Time and Seismic Ground Motion of Quarry Blasts, *Acta Montana*, Publ.Inst. of Rock Struc. And Mech., Czech. Acad. Sc. Series A, No. 16 (118), 2000, p. 17–24.
- BROŽ M., ŠTRUNC J. AND BUBEN J. Stability Monitoring of Unique Historical Buildings in the Czech Republic – S43A-15. *2008 AGU Join Assembly Meeting*, 2008, Florida, USA
- BROŽ M., ŠTRUNC J., SVATOŠ J. Monitoring of seismic impact on historical buildings and their damage during building the tunnel Blanka – especially influence on the stability of historical buildings in the Prague Castle area. Publ.: *2nd.Traditional International Colloquium Geomechanics and Geophysics*, 2008, ISBN 978–80-86407–36-4
- HORÁLEK J., BROŽ M., NOVOTNÝ O., ŠVANCARA J. AND WEBNET GROUP Complex Geophysical Research of the Seismogenic Western Part of The Bohemian Massif, Grant project of the Grant Agency of the Czech Republic No. 205/02/0381, *Acta Research Reports*, 2006, No. 15, s. 57–67, Prague, IRSM ASCR, ISSN 1211–1576
- LOCKNER, D. A., BYERLEE, J. D., KUKSENKO, V., PONOMAREV, A. AND SIROTIN, A. Observations of quastistatic fault growth from acoustic emissions, in Fault mechanics and transport Properties of Rocks, pp. 3–31, eds Švand B. and Wong t. -F., *Academic Press*, 1992, London
- MÁLEK J. BROŽ M., STEJSKAL V., AND ŠTRUNC J. Local Seismicity and the Hronov-Poříčí Fault, *Acta Geodyn. et Geomat.*, 2008, Vol. 5, No2 (150), S. 171-175. IRSM CAS, ISSN 1214-9705
- MOGI K. Earthquakes and fractures, *Tectonophysics*, 1967, No 5., Amsterdam 1967, p. 35 - 55.
- RUDAJEV V., BUBEN J., BROŽ M., MÁLEK J., ŠTRUNC J., ŽANDA L., ŽIVOR R. Experimental Determination of Acceleration Decay of Seismic Vibrations in the Bohemian Masif, *Acta Geodyn. et Geomat.*, 2006, AB No. 15, pp. 49-56. IRSM CAS Prague
- VINCIGUERRA, S. AND DRESEN, G. Ultrasonic velocities, acoustic emission characteristics and crack damage of basalt and granite, *Pure Appl. Geophys.*, 2006, 163, 974- 993

Autoři

- ¹ Ing. Milan Brož, Ph.D., Institute of Rock Structure and Mechanics ASCR, v.v.i., V Holešovičkách 41, Praha 8; Arenal s.r.o., Gabinova 2, Praha 5, Czech Republic, mbroz@irmsm.cas.cz
- ² Ing. Jaroslav Štrunc, Ph.D., Institute of Rock Structure and Mechanics ASCR, v.v.i., V Holešovičkách 41, Praha 8, Czech Republic, strunc@irmsm.cas.cz
- ³ RNDr. Jiří Málek, Ph.D., Institute of Rock Structure and Mechanics ASCR, v.v.i., V Holešovičkách 41, Praha 8, Czech Republic, malek@irmsm.cas.cz
- ⁴ Mgr. Antonín Tým, 1. Geotermální Litoměřice, a.s., Plzeň, Czech Republic, tym@prvnigeotermalni.cz