

DESET LET GEOTECHNICKÝCH STUDIÍ V DOLE JERONÝM

DECADE OF GEOTECHNICAL STUDIES IN JERONÝM MINE

Zdeněk Kaláb¹, Markéta Lednická², Jaromír Knejzlík³, Tomáš Kaláb⁴

Abstrakt

Důl Jeroným v Čisté (u Sokolova) je významnou památkou středověkého cínového hornictví. V rámci příprav ke zpřístupnění tohoto dolu veřejnosti byly v roce 2001 zahájeny mj. studie k posouzení stability podzemních prostor. K tomu byl od uvedeného roku zřízen kvartální geotechnický monitoring (pohyb hladin akumulovaných vod, konvergometrická měření a sledování pohybu horninových bloků podél puklin). První část distribuovaného měřicího systému v Dole Jeroným byla uvedena do provozu v roce 2006. V současné době má systém zapojeno téměř 30 čidel a jeho perioda odečtu aktuálních hodnot je nastavena na 1 hodinu. V příspěvku jsou shrnuty některé poznatky z desetiletého provozu kontinuálního sledování vybraných parametrů.

Abstract

Jeroným Mine in Cista (near Sokolov city, Czech Republic) is significant heritage site of medieval tin mining. Studies for evaluation of underground spaces stability were started in 2001 among others in frame of open this mine for public. In that year, quarterly geotechnical monitoring (e.g. variations of accumulated mining water, distance measurements and observing of rock blocks movements) was started. First part of distributed measurement network in the Jeroným Mine was realized in 2006. Almost 30 different sensors are used in the DMN at present time and monitoring period is set to 1 hour. Some knowledge from decade of continuous observing of selected parameters is summarised in this contribution.

Klíčová slova

Distribuovaný měřicí systém, geotechnické parametry, kontinuální měření, Důl Jeroným

Keywords

Distributed measurement network, geotechnical parameters, continual measurement, Jeroným Mine

1. Úvod

Česká republika se mimo jiné může pochlubit bohatou hornickou tradicí. Středověké cínové hornictví lze dodnes obdivovat v podzemních prostorách Dolu Jeroným v Čisté, okr. Sokolov (např. Beran et al., 1995, Kaláb et al., 2006, Tvrký et al., 2013). Zpřístupnění podzemí veřejnosti (od podzimu roku 2013 je částí dolu veden prohlídkový okruh) předcházela řada historických, hornických a geotechnických studií, a to v obou dnes oddělených částech dolu. V části nazývané Opuštěná důlní díla (ODD) je od roku 2001 realizován geotechnický monitoring. Zpočátku zahrnoval kvartální vizuální odečty úrovně hladiny akumulovaných vod, sledování pohybu horninových bloků podél puklin (sádrové a skleněné terčiky) a konvergometrická měření v liniových i prostorových dílech. Monografie (např. Žůrek et al., 2008) a monotematické číslo časopisu EGRSE (International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment 1/2011) představily hlavní výsledky výzkumné práce realizované do roku 2010.

Při obnově dědičné štoly byly používány trhací práce jako jedna z razících technologií. Proto vyvstala diskuze k seismickému zatížení důlního díla a možnému poškození historických částí dolu. Seismická aparatura (Knejzlík a Kaláb, 2002), která je stejně jako seismometry umístěna v důlním díle, byla uvedena do provozu v roce 2004 (Kaláb a Lednická, 2006). Na jednodeskový počítač této aparatury byl od roku 2006 implementován distribuovaný měřicí systém. Jeho cílem bylo monitorovat vybrané geotechnické parametry, aby bylo možno posoudit dynamiku případné změny sledované veličiny.

2. Distribuovaný měřicí systém

Díky finanční podpoře Grantové agentury ČR (2006-2008, 2009-2013) byl postupně v Dole Jeroným v části ODD vybudován distribuovaný měřicí systém (dále jen DMS). Nedílnou součástí realizace této sítě bylo metodicky připravit monitorování potřebných parametrů pro posuzování stability důlního díla během razících prací při úpravách dolu a pro následné trvalé monitorování kritických míst důlního díla během plánovaného provozu muzejní expozice v podzemí.

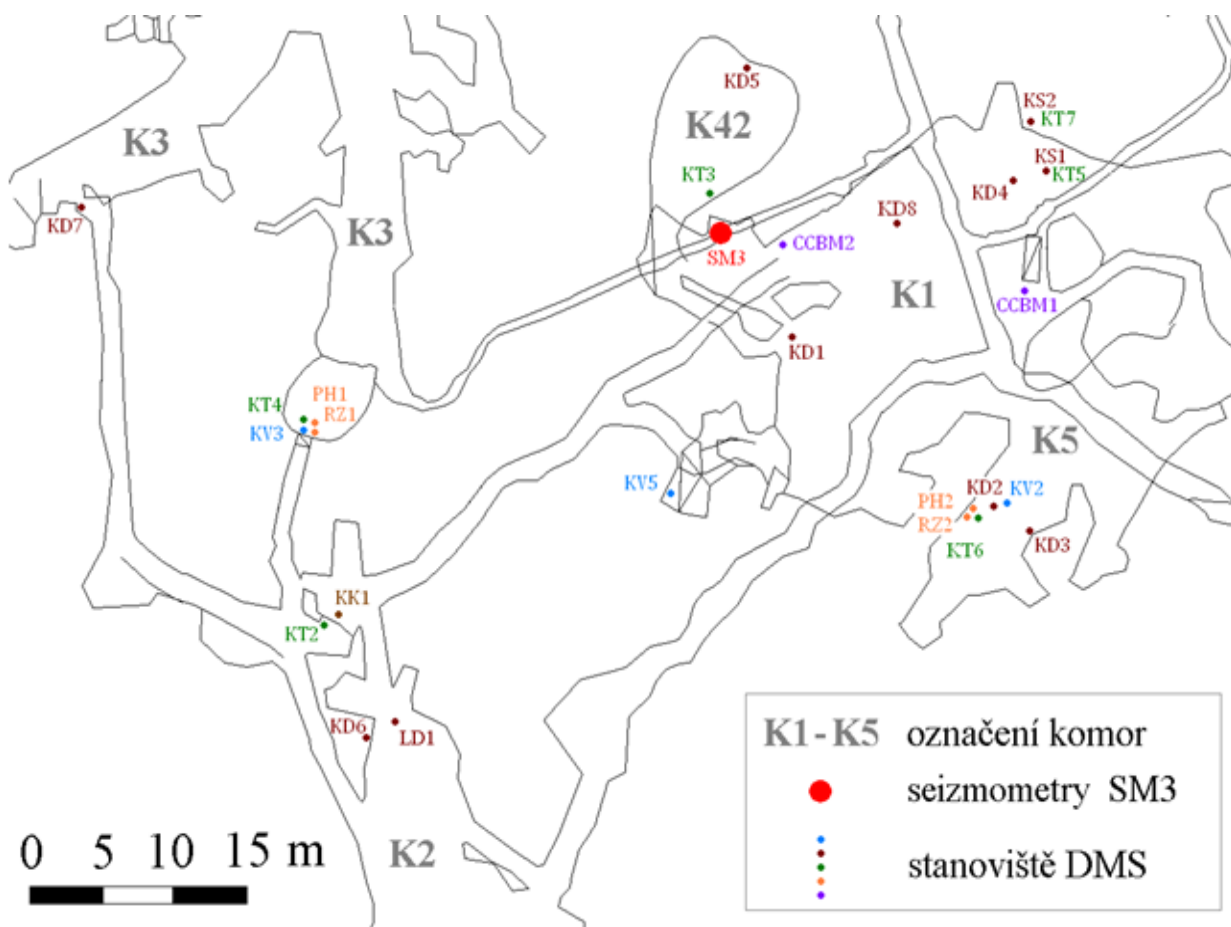
Požadavky na DMS pro danou lokalitu byly stanoveny následovně:

- Automatická registrace vybraných, dosud manuálně kvartálně odečítaných, veličin.
- Možnost začlenění různých běžných metod měření a ve výzkumném režimu ověřit využití moderních metod, např. měření změn tenzoru napjatosti horninového masivu kuželovou sondou.
- Modulární architektura umožňující postupné rozšiřování systému.
- Rozmístění snímačů měřených veličin ve vzdálenostech až stovek metrů od centrální registrační jednotky. Instalace snímačů a kabeláže nesmí viditelně poškodit historické důlní dílo.
- Zařízení musí dlouhodobě pracovat v důlní atmosféře s téměř 100% relativní vlhkostí.
- Automatická funkce bez obsluhy. Telemetrický přístup k zaznamenaným datům.

DMS (Kaláb et al., 2008, Knejzlík a Rambouský, 2008, Knejzlík et al., 2011, Lednická et al., 2011) je koncipován jako autonomní měřicí systém s telemetrickým přenosem dat, který pracuje v bezobslužném režimu. Jsou v něm převážně využity standardní měřicí

jednotky MICROUNIT s komunikačním protokolem AiBus2 (Tedia a.s.). Speciální měřicí jednotka, komunikující stejným datovým protokolem, byla v rámci řešení projektu vyvinuta pro implementaci komerčních čidel pro geomechanická měření sil a deformací (např. Maihack a Geokon), která jsou založena na principu strunových tenzometrů. Dále byly vyvinuty měřicí jednotky pro laserové měření konvergence, pro měření fyzikálních parametrů důlních vod, sledování objemové radioaktivity radonu a pro dlouhodobé experimentální monitorování změn tenzoru napjatosti horninového masivu pomocí tenzometrických sond CCBM. Jednotlivá čidla, kabeláž a elektronické vybavení jsou ve vodotěsném provedení, významná je také ochrana systému proti účinkům blesků.

Na počátku roku 2014 DMS zahrnoval tato čidla (Obr. 1): kontinuální měření změny úrovně hladiny důlních vod (3 měřená místa, KV), kontinuální měření rozevírání (svírání) puklin v horninovém masivu (indukční a strunová čidla – 9 míst, KD, KS), měření svislého směru konvergence (mechanické a laserové čidlo – 2 místa, KK, LD), měření teploty důlní atmosféry (4 místa, KT), měření teploty důlní vody (2 místa, KT), měření fyzikálních parametrů vody (pH a zdánlivý měrný odpor – 2 místa, PH, RZ), měření změn tenzoru napjatosti horninového masivu (2 místa, CCBM), měření objemové radioaktivity radonu (1 místo, RA) a spouštěné měření vibrací v důlním díle (třísložková registrace, SM3).



měření svislého směru konvergence (mechanické a laserové čidlo – 2 místa, KK, LD), měření teploty důlní atmosféry (4 místa, KT), měření teploty důlní vody (2 místa, KT), měření fyzikálních parametrů vody (pH a zdánlivý měrný odpor – 2 místa, PH, RZ), měření změn tenzoru napjatosti horninového masivu (2 místa, CCBM), měření objemové radioaktivity radonu (1 místo, RA) a spouštěné měření vibrací v důlním díle (třísložková registrace, SM3).

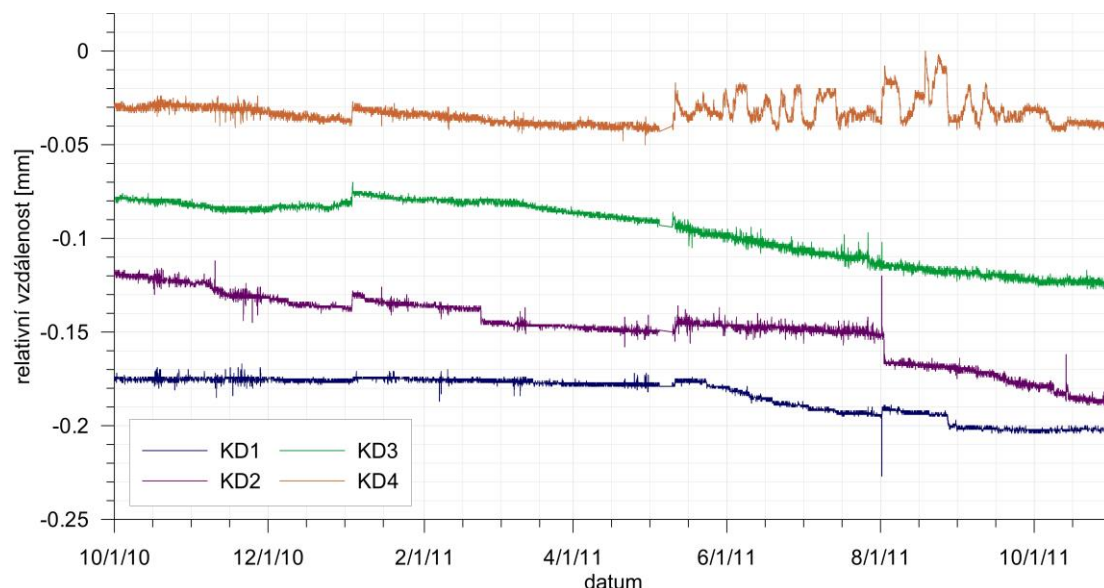
Stavebnicová koncepce DMS umožňuje jeho rozšiřování podle potřeby. Část systému je realizována coby užitný vzor (přidělen 2010, č.z. 20486, Mechanický snímač konvergence). Protože nedošlo k projektovaným stavebním úpravám v části ODD (mělo být realizováno v garanci DIAMO, s.p. a Okresního muzea v Sokolově), nebylo realizováno plánované rozmístění čidel pro potřeby sledování stability rekonstruovaného důlního díla. Z tohoto hlediska je význam naměřených hodnot především metodický. Přesto však lze oprávněně tvrdit, že naměřená data poskytla řadu informací, které jsou zásadní pro posouzení stability podzemních prostor a zpřístupnění dolu veřejnosti.

Obr. 1 Schéma podzemí ODD s lokalizací senzorů DMS

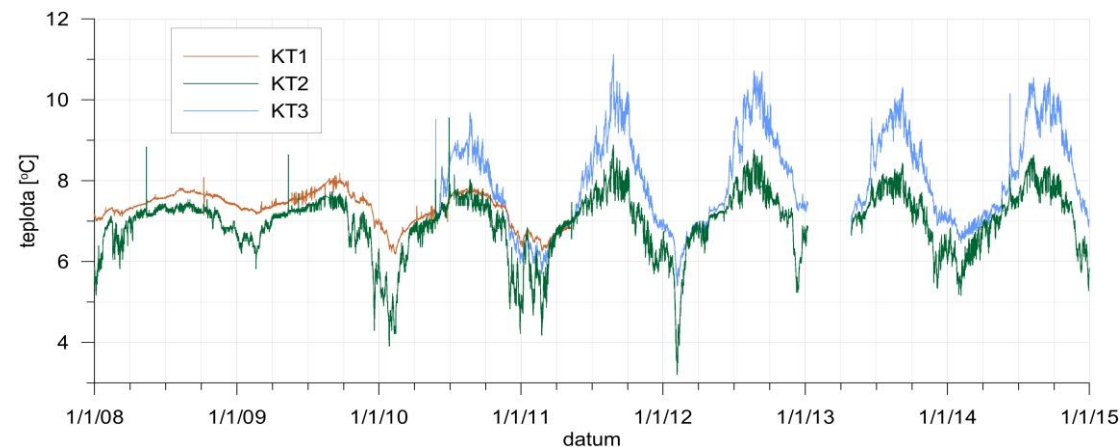
3. Zásadní výsledky sledování puklin a hladin důlních vod

Hlavní poznatky pro správné hodnocení stability podzemních prostor poskytla sledování rozevírání (svírání) puklin a sledování pohybu úrovně hladiny akumulovaných důlních vod. Na Obr. 2 jsou jako příklad vyneseny 4 křivky představující cca jednoroční řadu monitorování vzájemných pohybů bloků podél puklin. Tato čidla jsou osazena v komoře K1, do níž ústí svislá fárová jáma z povrchu (délka cca 27 m). Změny měřených hodnot jsou zanedbatelné a pohybují se téměř na úrovni chyby. Na čidle s označením KD4, které se nachází na puklině v místě hlavního směru větracího proudu a je tudíž nejvíce ovlivňováno teplotou vzduchu procházejícího napříč dolem, jsou detekovatelné rychlé změny teplot po otevření dveří v dědičné štole a volném větrání podzemí (od května 2011). Efekt změny charakteru větrání v důlním díle a jeho vliv na velikost teplot důlní atmosféry dokladují měření představená na Obr. 3. Na křivkách jsou dobře rozeznatelné sezónní vlivy, rozmezí naměřených teplot na těchto stanovištích je 3 – 11°C. Stručně lze konstatovat, že žádné měřené hodnoty pohybu horninových bloků po puklinách nevykazují významné pohyby bloků masivu, i když na některých křivkách již lze pozorovat náznak změny vzájemné polohy bloků.

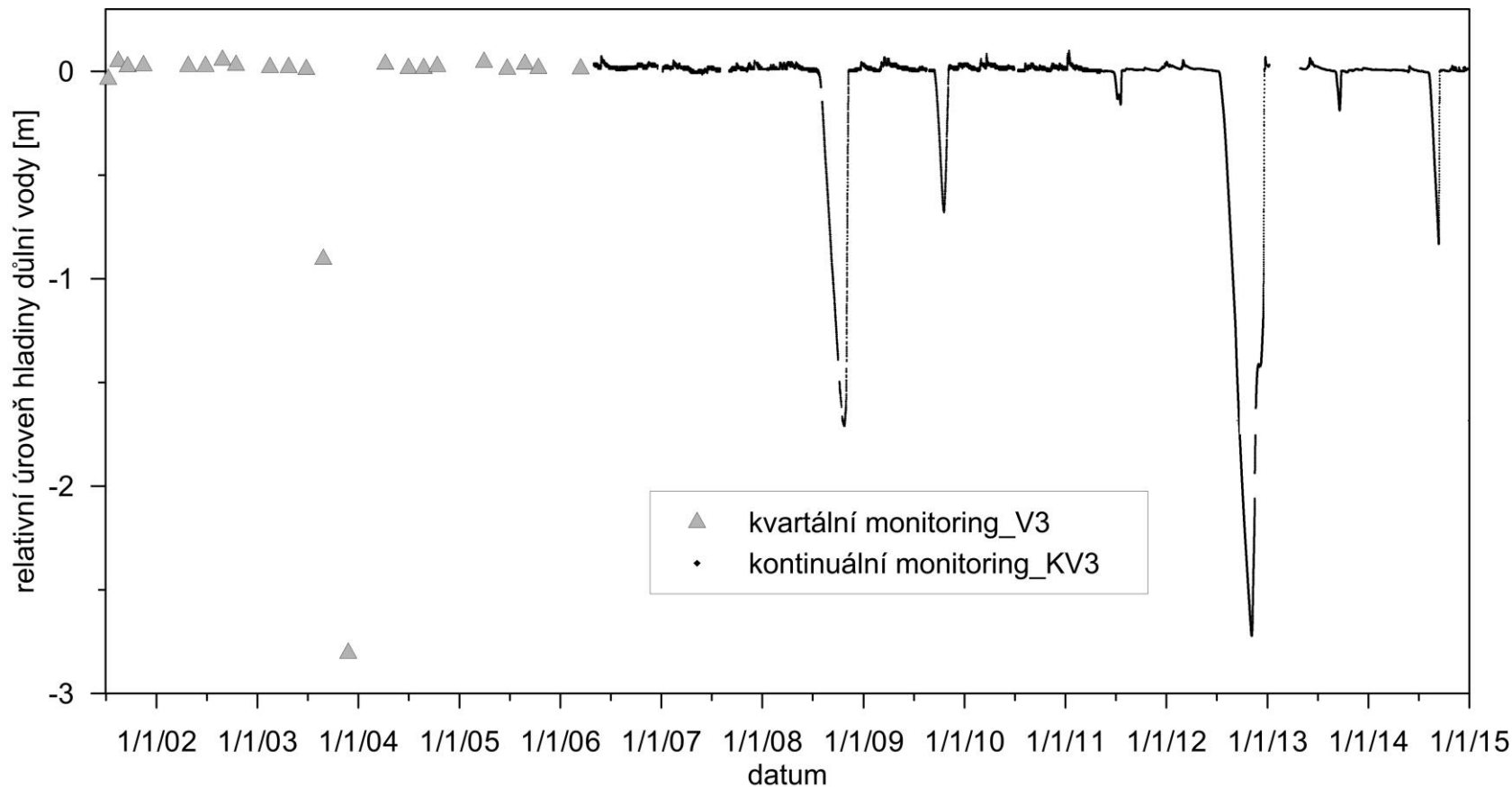
Jako příklad ukázky kolísání úrovně hladiny akumulovaných důlních vod je vybráno stanoviště na nejnižší hloubkové úrovni, z níž je možné pouze gravitační odvodnění dolů (přes dědičnou štolu). Křivka představuje prakticky celé sledované období, tj. 2001 - 2014. Na stanovišti KV3 lze pozorovat kolísání hladiny v rozmezí do 10 cm, přestože stanoviště má trvalý přetok do navazující chodby (Obr. 4). Toto kolísání je následek vydatných dešťových srážek, případně tání sněhu. Navíc jsou dokladovány významné poklesy hladiny pod úroveň štolového patra, což podle posledních poznatků úzce souvisí s poklesem podzemních vod v okolí dolu (Lednická et al., 2012). Největší pokles, který dosáhl téměř 3 m, byl pozorován ještě v období kvartálního monitoringu v roce 2003. Další pokles s hodnotou



Obr. 2 Křivky monitorování vzájemných pohybů bloků podél puklin v komoře K1 v období 1.10.2010 – 31.10.2011



Obr. 3 Teploty důlní atmosféry v období 1.1.2010 – 1.5.2012



Obr. 4 Křivka úrovně hladiny důlní vody [m] na stanovišti KV3 v období 2001 – 2013

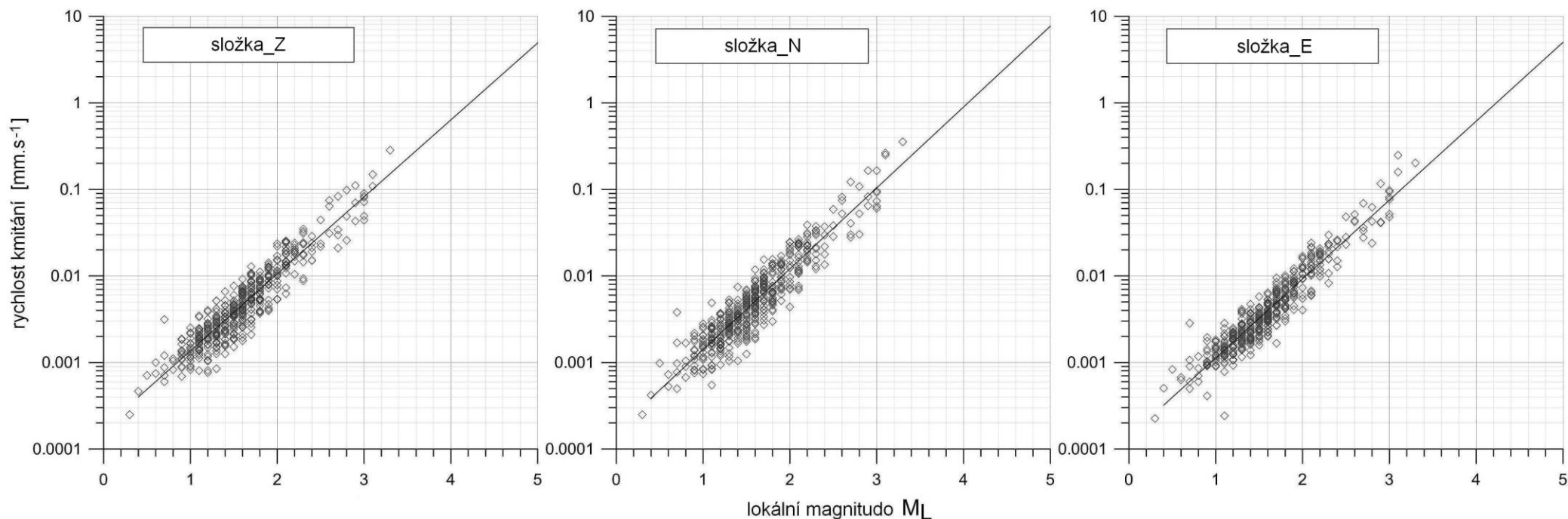
zená seismicita (části vzdálených a velmi vzdálených intenzivních zemětřesení; regionální evropské seismické jevy; zemětřesení z oblasti Nového Kostela) a technická seismicita (vibrace vyvolané při odstřelu trhavin v nedalekých lomech - Krásno, Vítkov a další; vibrace vyvolané automobilovou dopravou na cestě nad důlním dílem). Po dobu rekonstrukce dědičné štoly byly ještě vyčleňovány projevy odstřelů při ražbě. Seismologický monitoring umožňuje nejen průběžně sledovat možný negativní dopad vibrací na historické části dolu, ale především správně stanovit kritické hodnoty zatížení při provádění rekonstrukčních prací v dole a jeho okolí.

Okolí obce Nový Kostel (severozápadní Čechy) je nejbližší zemětřesný region a nachází se asi 25 - 30 km severozápadně od dolu (Lednická a Kaláb, 2013). Mladé tektonické pohyby během třetihor, doprovázené sopečnou činností, ovlivnily geologickou stavbu regionu. Tato oblast je dnes charakteristická mj. opakovaným výskytem zemětřesných rojů s lokálním magnitudem $ML \leq 5$ (např. Fischer et al., 2014).

cca 3 m byl registrován až v roce 2012. Na stanovišti KV2 v komoře K1 (horní patro) lze pozorovat kolísání hladiny v rozmezí cca 20 cm v důsledku meteorologických událostí, na ostatních měřených stanovištích ke kolísání hladiny nedochází.

4. Seismologický monitoring

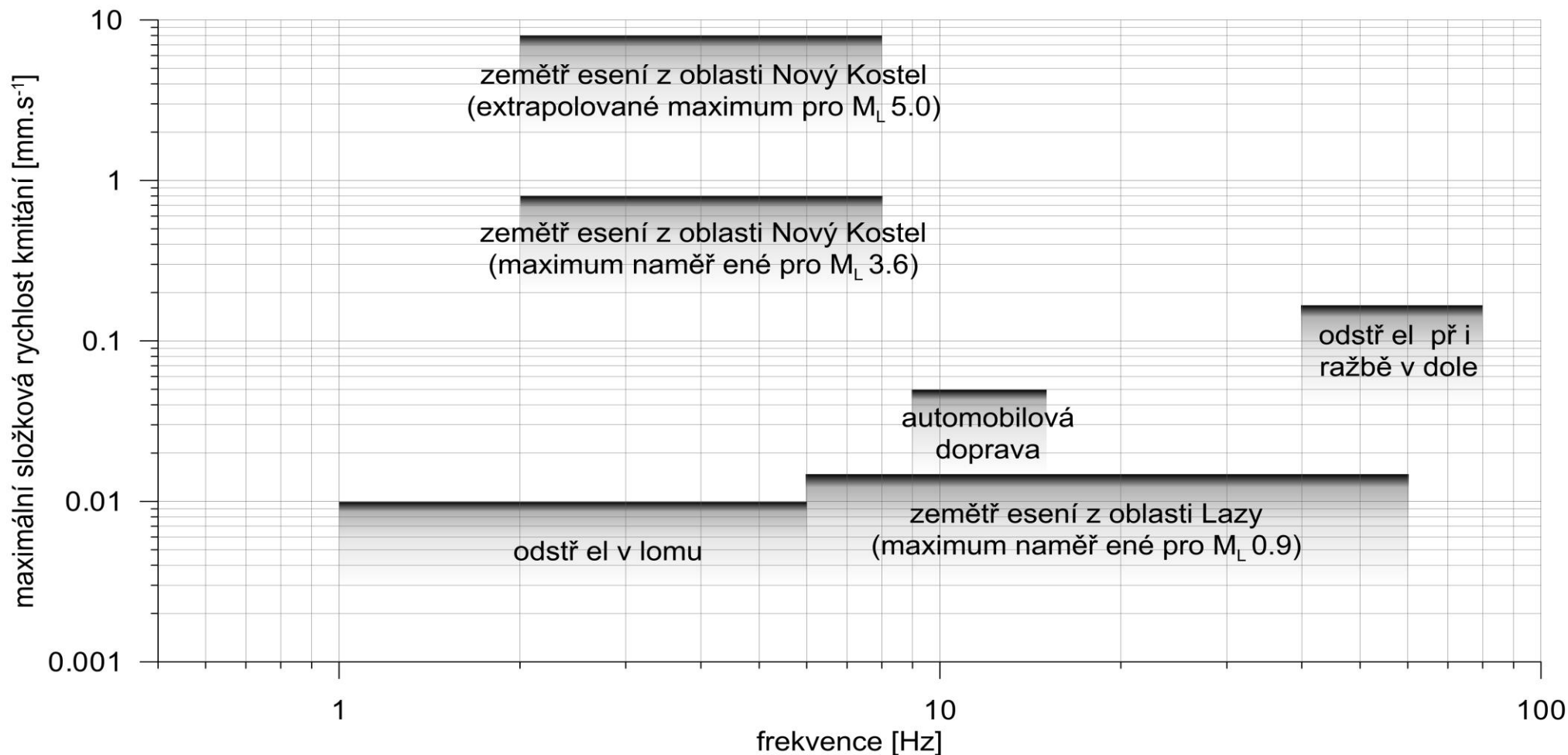
Posouzení seismického zatížení Dolu Jeronym vychází ze seismologického monitoringu vlastní aparaturou se spouštěným záznamem dat. Záznamy ze stanice JER1 jsou rozdělovány do následujících typů: přiro-



Obr. 5 Extrapolace maximálních rychlostí kmitání v důlním díle z dat roje v roce 2011, 500 záznamů (převzato z Lednická a Kaláb. 2013)

Po dobu seismologického monitoringu v Dole Jeroným vznikly tři intenzivní roje: říjen 2008 ($ML \leq 3,8$), srpen 2011 ($ML \leq 3,7$), a květen 2014 ($ML \leq 4,4$). Během deseti let bylo zaznamenáno na stanici JER1 více než 2000 zemětřesení (např. Kaláb a Lednická, 2011, Kaláb et al., 2015). Maximální naměřená hodnota dosáhla rychlosti až $0,8 \text{ mm.s}^{-1}$ pro zemětřesení s magnitudem o hodnotě 3,6. Poškození podzemních prostor (tj. praskání pilířů, pohyby bloků, výraznější odlupování hornin ze stropů a stěn) nebyly pozorovány. Z toho je možné vyvodit, že tyto vibrace neovlivňují stabilitu podzemních prostor. Zemětřesení nevyvolala ani změny v měřených hodnotách z DMS.

Významným počinem z pohledu zatížení díla vibracemi je i sestavení závislosti očekávaného maximálního efektu těchto zemětřesení při prognózovaném maximálním lokálním magnitudu (podle historických dat z oblasti Nového Kostela). Výsledky byly publikovány Lednickou a Kalábem (2013). Analýza prokázala, že při zemětřesení s maximálním očekávaným lokálním magnitudem 5,0 nedojde k vyvolání takových vibrací, které by poškodily důlní dílo (Obr. 5) – maximální extrapolovaná složková hodnota rychlosti kmitání je 8 mm.s^{-1} . Souhrn výsledků seismologického monitorování na stanici JER1 pro jednotlivé zdroje vibrací je uveden na Obr. 6 (podle Kaláb et al., 2015).



Obr. 6 Souhrn výsledků seismologického monitorování na stanici JER1

5. Závěr

Desetiletí provozu distribuovaného měřicího systému v Dole Jeroným v Čisté prokázalo z technického hlediska správný přístup při jeho koncepci. K DMS lze připojit většinu známých komerčních čidel, k dané verzi celkem až 255 měřicích míst. Provoz DMS byl spolehlivý, výpadky registrace vznikly pouze po úderu blesku do blízkosti dolu (ochrana DMS byla poté upravena) a po přerušení dodávky proudu v důsledku vandalismu. Významným prvkem systému je i jeho správa prostřednictvím GSM sítě. Za zmínku stojí i skutečnost, že realizace DMS musela být provedena s minimálními finančními náklady a bez poškození historických částí díla.

Výstupy kontinuálního monitoringu patří k základním poznatkům pro správné hodnocení stability podzemních prostor. Získaná data umožňují nejen posoudit současný stav stability důlních prostor, ale výsledky významně přispějí také ke sledování stavu podzemních děl v době jejich předpokládaných úprav (především propojení komplexů starých a opuštěných důlních děl překopem). Již při rekonstrukci dědičné štoly se ukázal velký význam využití našich dat stavební firmou. Důlní dílo lze po analýze všech poznatků pokládat za stabilní, pro muzejní provoz bude nutné v některých kritických místech provést zajištění.

Poděkování

Príspevek je zpracován s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO: 68145535 a vychází z prací, které byly realizovány za finanční podpory GAČR, projekt č. 105/09/0089.

Literatura

- BERAN, P., JANGL, L., MAJER, J., SUČEK, P., OTFRIED, W. *1000 let hornictví cínu ve Slavkovském lese*, 1. vyd. Okresní muzeum Sokolov, 1995, 195 s.
- FISCHER, T., HORÁLEK, J., HRUBCOVÁ, P., VAVRYČUK, V., BRÄUER, K., KÄMPF, H. Intra-Continental Earthquake Swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review. *Tectonophysics*, Vol. 611, 2014, p. 1–27.
- KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., KOŘÍNEK, R., ŽŮREK, P. Cultural Monument Jeroným Mine, Czech Republic – Contribution to the Geomechanical Stability Assessment. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, 2006, M-29(395), p. 137-146, ISSN 0138-015X, ISBN-83-88765-67-1.
- KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., KOŘÍNEK, R., KUKUTSCH, R., LEDNICKÁ, M., ŽŮREK, P. Contribution to Experimental Geomechanical and Seismological Measurements in the Jeroným Mine. *Acta Geodyn. et Geomater.*, 2008, Vol. 5, No. 2(150), p. 213-223, ISSN 1214-9705.
- KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M. Interpretace seizmických záznamů trhacích prací prováděných ve štole Jeroným v Čisté. *Transactions (Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava), Řada stavební*, roč. VI, č.2/2006, p. 155-160, ISSN 1213-1962.
- KALÁB Z., LEDNICKÁ M. Seismic Loading of Medieval Jeroným Mine During West Bohemia Swarm in 2008. *In Idziak, A.F., Dubiel, R. – editors: Geophysics in Mining and Environmental Protection. Ser. Geoplanet: Earth and Planetary Science*, 2011, Vol. 2, p. 21-30. © Springer-Verlag Berlin. ISSN 2190-5193, DOI 10.1007/978-3-642-19097-1.
- KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., KALÁB, T., KNEJZLÍK, J.: Evaluation of Vibration Effect in Shallow Mine Caused by Natural and Technical Seismicity. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2015, Albena, Bulgaria, Conference proceedings, in print.
- KNEJZLÍK, J., KALÁB, Z. Seismic Recording Apparatus PCM3-EPC. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, 2002, M-24(340), p. 187-194, ISSN 0138-015X.
- KNEJZLÍK, J., RAMBOUSKÝ, Z. Current Solution for Distributed Control and Measurement System in the Jeroným Mine – Modular System. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. Vol. 5, No. 2(150), 2008, p. 205-212.
- KNEJZLÍK, J., KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., STAŠ, L. Investigation of the Medieval Jeroným Mine Stability: Present Results from a Distributed Measurement Network. *In Idziak, A.F., Dubiel, R. – editors: Geophysics in Mining and Environmental Protection. Ser. Geoplanet: Earth and Planetary Science*, 2011, Vol. 2, p. 59-70. © Springer-Verlag Berlin. ISSN 2190-5193, DOI 10.1007/978-3-642-19097-1.
- LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z. Vibration Effect of Earthquakes in Abandoned Medieval Mine. *Acta Geod Geophys*. 2013, Vol. 48, Issue 3, p. 221-234.
- LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J. Kontinuální geomechanický monitoring v Dole Jeroným. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment (EGRSE)*, 2011, Vol. XVIII.1, p. 62-72. CD-ROM ISSN 1803-1447.

- LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J. Monitorování úrovně hladin akumulovaných vod v Dole Jeroným. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment (EGRSE)*, 2012, Vol. XIX.2, p. 54-68.
- TVRDÝ, j., PETEREK, A., MANTEL, M. *Tajemství nitra Země*. Česko-Bavorský geopark, Muzeum Sokolov, 2013, 150 s., ISBN 978-80-86630-22-9.
- ŽŮREK, P., KOŘÍNEK, R., KALÁB, Z., HRUBEŠOVÁ, E., KNEJZLÍK, J., DANĚK, T., KUKUTSCH, R., MICHALÍK, P., LEDNICKÁ, M., RAMBOUSKÝ, Z. *Historický Důl Jeroným v Čisté*. Monografie, VŠB – Technická univerzita Ostrava a Ústav geoniky AVČR, v.v.i. Ostrava, 2008, 82 s., ISBN 978-80-248-1757-6.

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
- ³ Ing. Jaromír Knejzlík, CSc. – důchodce, dříve Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba
- ⁴ Ing. Tomáš Kaláb – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, tomas.kalab@ugn.cas.cz