

DLOUHODOBÝ MONITORING ZMĚN TENZORU NAPJATOSTI V MASIVU

LONG TERM MONITORING OF THE STRESS TENSOR CHANGES IN ROCK MASSIF

Zdeněk Kaláb¹, Jaromír Knejzlík¹, Zdeněk Rambouský¹

Abstrakt

Tento příspěvek popisuje výsledky experimentálního dlouhodobého monitoringu změn tenzoru napjatosti v masivu v Dole Jeroným metodou CCBM (metoda odlehčeného jádra typu „doorstoper“ v nové kuželové geometrii). Cílem experimentálních měření je především ověření možnosti dlouhodobého použití měřicích sond CCBM v distribuovaném měřicím systému s telemetrickým přenosem dat a ověření způsobu jejich instalace, spolehlivosti a stability parametrů v náročných klimatických podmínkách dolu. V Dole Jeroným byly v roce 2007 instalovány 2 sondy CCBM, jejichž data jsou dosud registrována. Data ze sondy CCBM1 jsou analyzována z hlediska metodiky měření, tj. analýza správné ochrany zařízení proti bleskům, realizace uzemnění měřicí části, ... Pro vybrané časové období je proveden také experimentální přepočet naměřených dat na změnu napjatosti masivu.

Abstract

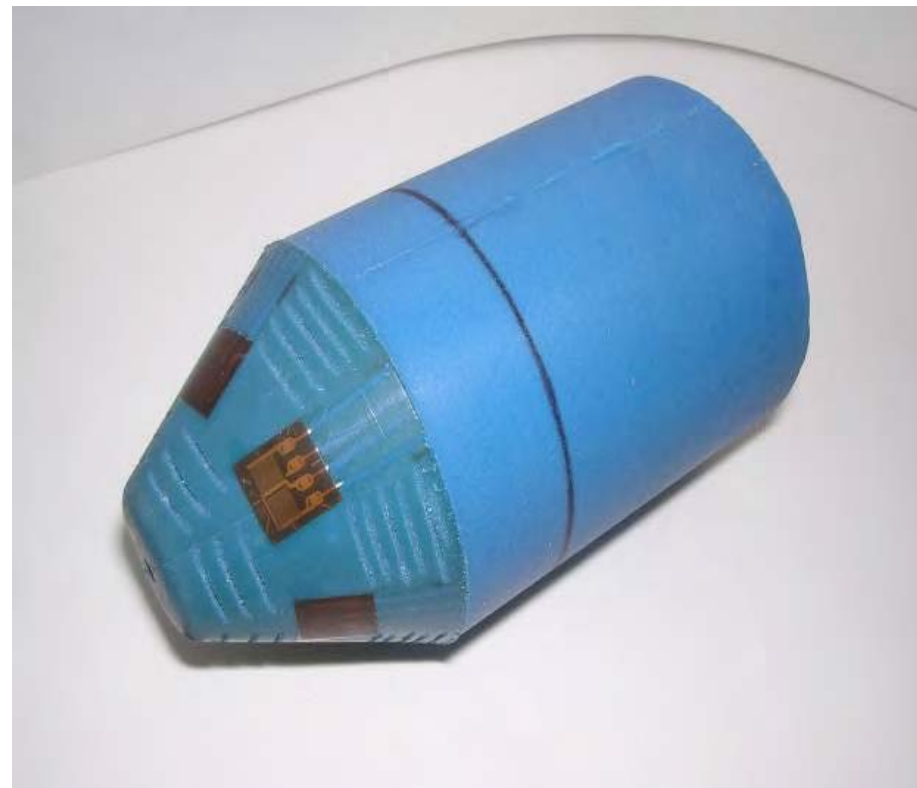
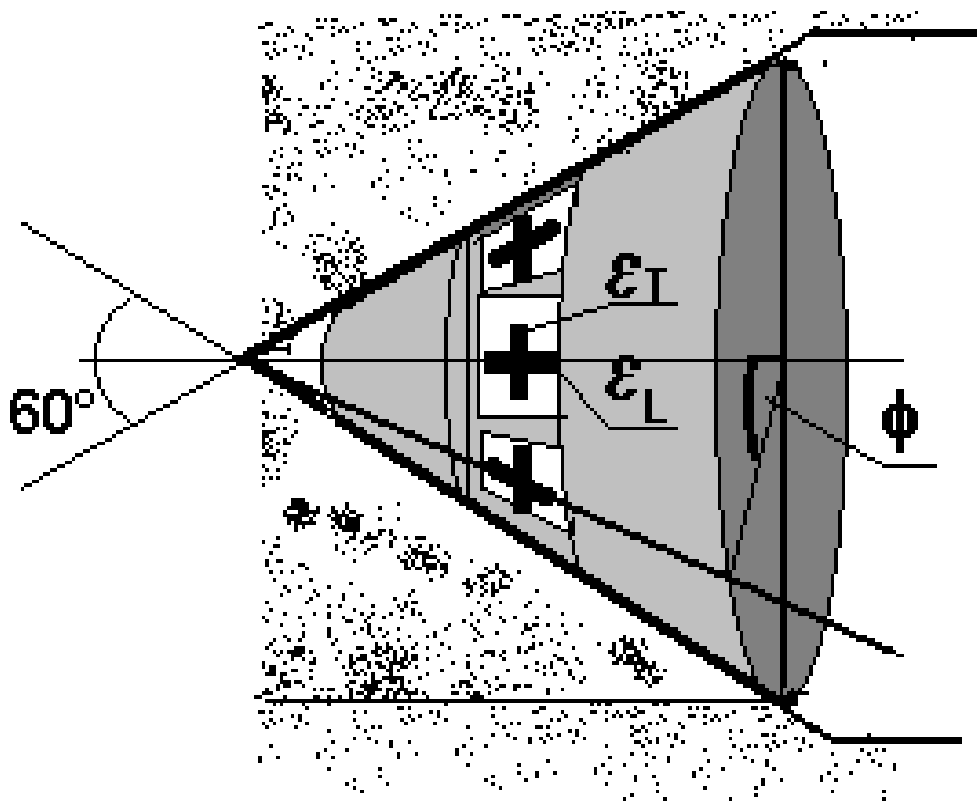
This contribution describes technique of implementation of special sensors in Jeroným Mine, i.e. probe for measurement of rock massif stress changes signed as CCBM (so called “doorstopper” methodology with new conical geometry). The main task of experimental measurement using CCBM probe is to check possibility of their implementation in distributed control network including test of reliability of operation and stability of parameters in heavy mining environment. Two CCBM probes which data are still recorded were installed in underground spaces in the year 2007. Data recorded from CCBM1 probe are analyzed in term of methodology of measurement, i.e. analysis of probe and recording instrumentation against lightning, design of ground connection of measured parts ... Conversion of data to define changes of rock massif stress tensor is made for selected time interval.

Klíčová slova

Důl Jeroným v Čistě, CCBM sonda, dlouhodobý monitoring, tenzorové změny tlaku

1 Úvod

Jednou ze základních metod studia stability podzemních důlních prostor Dolu Jeroným (detailní informace o studovaném objektu je v úvodním článku tohoto časopisu) je numerické modelování napěťových polí (např. Hrubešová et al., 2007, 2010, Kaláb et al., 2008). Ověření správnosti numerického modelu je možné porovnáním s výsledky měření napětí a deformací in-situ.



Obr. 1 Schematické rozmístění tenzometrů na povrchu kuželové hlavice, vpravo fotografie celé sondy (foto Lednická)

Pracovníci Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i., se řadu let zabývají problematikou zjišťování napěťového stavu masivu in-situ. Převážná většina tohoto výzkumu je realizována v uhelných dolech české části hornoslezské pánve. Využívána je metoda vycházející z teorie hydraulického štěpení stěn vrtu. Tato metoda má mnoho výhod i omezení (Stáš et al., 2005a, b). Dále je rozvíjena metoda měření napětí pomocí metody odlehčeného jádra typu „doorstoper“, avšak v nové kuželové geometrii CCBO - Compact Conical-ended Borehole Overcoring, navržené K. Sugawarou a Y. Obarou (Nakamura et al., 1999; Kang, 2000). Ta na rozdíl od dřívější klasické metody umožňuje stanovit najednou kompletní tenzor napětí. Kuželový tvar plochy má samostředící účinek a vyžaduje poměrně krátký kompaktní úsek k obvrtání pro úplné odlehčení. Metoda CCBO byla v Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i., modifikována pro monitorování změn tenzoru napjatosti horninového masivu CCBM - Compact Conical-ended Borehole Monitoring a byly pro ni vyvinuty měřicí sondy. Metodika byla úspěšně ověřena na lokalitách Dolu Lazy a Dolu ČSM v OKR, kde byla aplikována na sledování charakteru změn napětí indukovaných postupem porubní fronty v předem vybraných polohách v okolí dobývané sloje (Stáš et al., 2007a, b, 2008a, b). Při dlouhodobém sledování deformací vrtů byla indikována také složka reologické plouživé deformace horninového materiálu. Měřené hodnoty ze sond CCBM jsou

v tomto případě odečítány do počítače při periodických návštěvách. Doba trvání experimentu je omezena postupem porubu na několik měsíců.

Protože Důl Jeroným slouží mj. také jako terénní laboratoř pro vývoj nových metod měření, byl vybrán pro ověření možnosti dlouhodobého monitoringu změn tenzoru napjatosti v masívu metodou CCBM. Cílem těchto experimentálních měření je především ověření možnosti použití měřicích sond CCBM v distribuovaném měřicím systému (DMS) s telemetrickým přenosem dat a ověření jejich instalace, spolehlivosti a stability parametrů v náročných důlních klimatických podmínkách.

2 Princip měření metodou CCBM

Pro instalaci sondy CCBM je nutno vyvrtat vrt, jehož čelo je upraveno do stejného kuželového tvaru jako sonda. Z místa instalace sondy je nutno získat jádro použitelné pro stanovení Youngova modulu E a Poissonova čísla horniny μ . Čelo vrtu je před vlepením sondy přesně vybroušeno a prohlédnuto karotážní kamerou, aby nedošlo k vlepení sondy do rozpukané horniny a tím ke znehodnocení výsledku měření. Těleso sondy je vytvořeno odlitkem ze silikonové zalévací hmoty. Na povrchu sondy jsou instalovány měřicí elementy se dvěma kolmými tenzometry (obr. 1), kterými se měří podélné (ϵ_L) a příčné (ϵ_T) deformace. Na základě znalosti dostatečného počtu deformací na kuželovém povrchu sondy a mechanických parametrů horniny lze numericky vypočítat prostorovou změnu tenzoru napětí.

Pro začlenění do distribuovaných měřicích systémů byla vyvinuta 2. generace sond CCBM. Sondy jsou osazeny 6 měřicími elementy se dvěma kolmými tenzometry, z nichž podélné jsou označeny jako T1L – T6L a příčné jako T1T – T6T. Kompenzační tenzometr TC je volně zalit uvnitř v blízkosti vrcholu sondy. V sondách jsou instalovány elektronické obvody pro měření deformací všech tenzometrů, digitalizaci naměřených dat a sériovou komunikaci se systémem sběru a ukládání dat. V DMS se chovají jako adresovatelné měřicí jednotky, které s řídicí jednotkou komunikují zabezpečeným protokolem AiBus2, stejně jako ostatní použité měřicí jednotky série MicroUnit výrobce Tedia® spol. s r.o. (www.tedia.cz). Technická realizace a programové vybavení sond je podrobně popsáno v článku a technické zprávě Knejzlíka et al. (2008a, b).

Pro připojení sond CCBM k DMS byl vyvinut interface pro galvanické oddělení datových a napájecích obvodů sondy CCBM od sběrnice DMS, který garantuje minimální průnik elektrického rušení ze sběrnice DMS do citlivých vstupních okruhů sond. Neméně významné je i zabezpečení elektroniky sond proti vysokým rozdílům zemních potenciálů, které vznikají v relativně malé hloubce v různých místech horninovém masívu při úderech blesků do povrchu terénu v okolí dolu.

3 Instalace sond CCBM v Dole Jeroným

Na podzim roku 2007 byla k testování metody zvolena největší komora (nazývaná K1) v hloubce cca 30 – 40 m pod povrchem. Podle vizuálního posouzení byla vybrána dvě místa, která neležela v poruchách či poruchových zónách. Vybrána byla taková místa, kde bylo možno realizovat vrt v důlním díle, v němž není žádné technologické a dopravní zázemí. Z metodického hlediska jsme předpokládali, že sondy budou instalovány ve stabilním masívu bez významných změn napjatosti.



Obr. 2 Fotografie sondy ve vrtu (foto Knežlík)

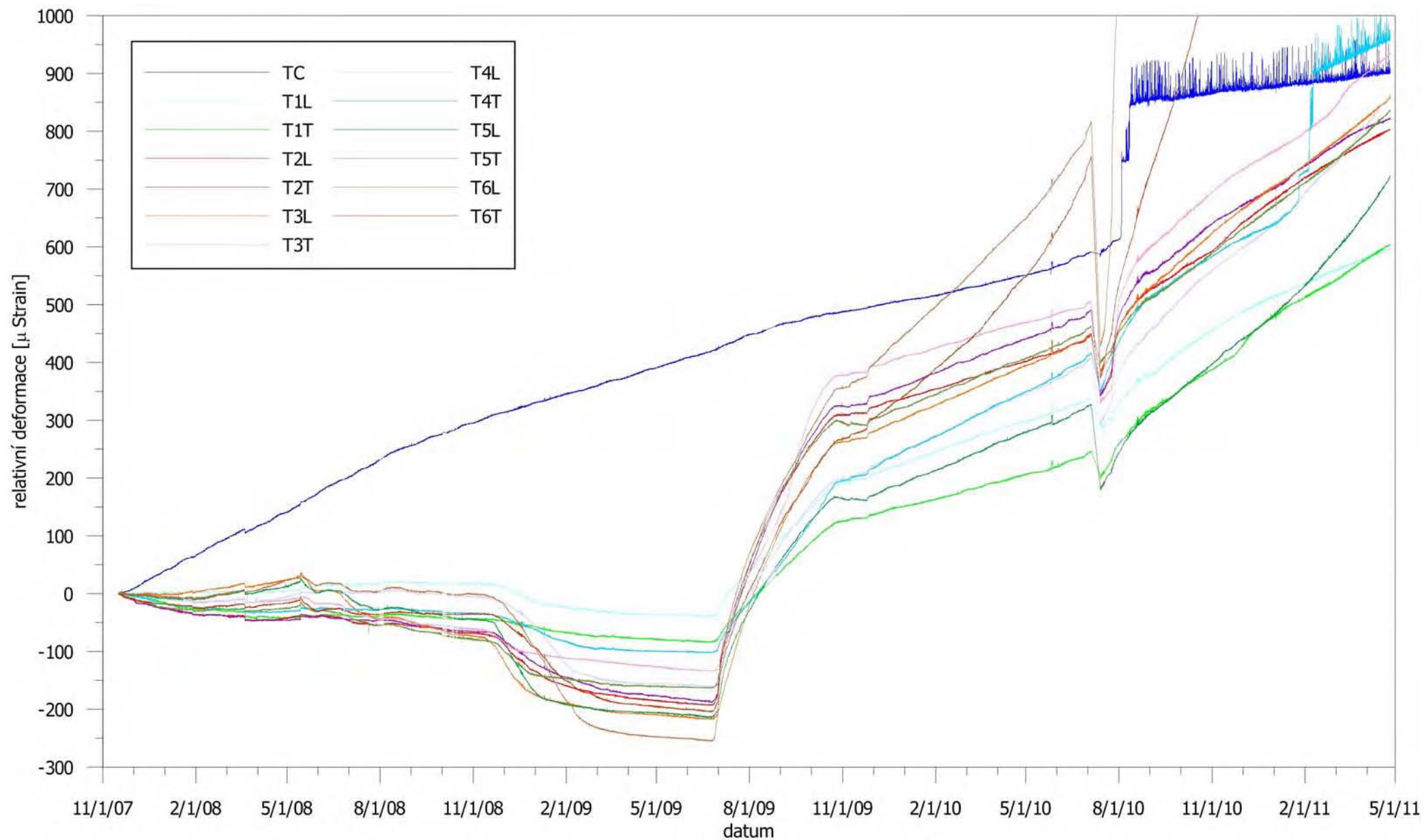
Vrt pro sondu CCBM1 (obr. 2) se nachází u paty fárací jámy Jeroným, která ústí do komory K1. Jeho orientace v systému NESW je 111° . Vrt je ve vzdálenosti cca 1,5 m od historické fárací jámy, je mírně skloněn od vodorovné roviny, aby se na jeho dně nekumulovala voda. Druhý vrt pro sondu CCBM2 (orientace 262°) je ve spodní části komory u liniového díla, které vede na štolové patro. V masivu ve výšce cca 5 m nad tímto vrtem byl později nalezen zával navazující na komoru K4. Oba vrty jsou dlouhé cca 3 m, jejich průměr je 76 mm a byly odvrtány na jádro, aby byl získán horninový materiál pro laboratorní stanovení E a μ horniny. Odvrtání vrtů v historickém díle muselo být provedeno s největší opatrností, aby nedošlo k poškození jeho historických částí. Sondy byly vlepeny do vrtů v extrémních klimatických podmínkách, tj. při nízké teplotě (okolo 8°C) a téměř stoprocentní vlhkosti důlní atmosféry. Nízká teplota a vysoká vlhkost působí negativně na tuhnutí použitého lepidla.

Perioda opakování měření sondami CCBM, stejně jako celým DMS, je 1 hodina. Data z obou sond jsou ukládána do samostatných souborů. Každý záznam (v daném čase) tvoří jeden řádek s údaji o poměrných deformacích ze všech 12 měřicích tenzometrů, hodnotu poměrné deformace kompenzačního tenzometru TC a kontrolní hodnotu CAL pro automatickou kalibraci rozsahu měření. Jmenovitý rozsah měření obou použitých sond je $2500 \mu\text{Strain}$.

4 Zhodnocení získaných dat z hlediska metodiky měření

Monitoring byl zahájen 14. 11. 2007. Sonda CCBM1 byla nainstalována a úspěšně poskytuje interpretovatelná data. Vrt sondy CCBM2 je situován v blízkosti poruchy v horninovém masivu a po instalaci došlo pravděpodobně ke vzniku trhliny na jeho kuželové měřicí ploše. Tomu nasvědčuje porušení několika tenzometrů krátce po zahájení měření. Z omezeného počtu zbylých naměřených hodnot nelze změny tenzoru napjatosti vyhodnocovat.

Graf naměřených poměrných deformací ze sondy CCBM1 je na obr. 3. Sonda dodávala spojitá data od počátku měření až do července 2010, kdy došlo k vyřazení celého DMS z provozu při úderu blesku. Při této události se po sběrnici DMS šířilo impulsní přepětí, čímž došlo pravděpodobně k průrazu izolace měřicích tenzometrů sondy CCBM1 na horninu (a též k závažnému poškození interface sondy CCBM2). Krátce po opravě DMS došlo k anomálnímu skokovému nárůstu měřených hodnot z tenzometrů T6L a T6T. Křivka kompenzačního tenzometru TC však zachovává monotónní trend, což ukazuje na správnou funkci elektronických obvodů. Registrovaná data po této události není vhodné geomechanicky interpretovat.



Obr. 3 Graf naměřených změn poměrných deformací ze sondy CCBM1

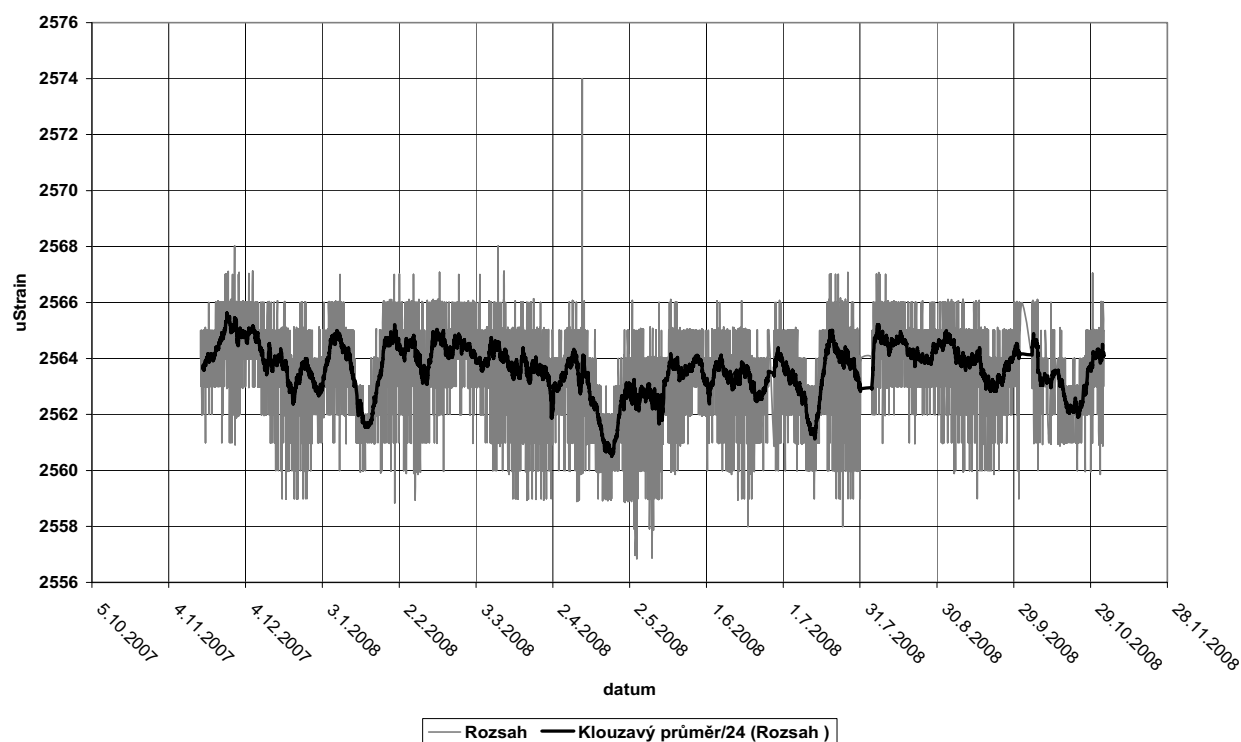
Předpokládali jsme, že po úderu blesku byla zničena i sonda CCBM2. Po výměně poškozeného interface v lednu 2011 bylo zjištěno, že elektronické obvody sondy CCBM2 jsou nadále funkční. Sonda CCBM2 byla v DMS ponechána a její data jsou dále používána jen z hlediska posouzení funkce elektronických obvodů.

Na obr. 3 lze pozorovat překvapivý jev, že hodnota poměrné deformace kompenzačního tenzometru TC, která by měla být prakticky stabilní, monotónně roste. Stejná tendence se projevuje i v datech sondy CCBM2. Je to způsobeno tím, že volně zalitý kompenzační tenzometr TC je mechanicky namáhán zalévací hmotou, která se ve vlhku dlouhodobě rozpíná. Tato skutečnost již byla ověřena při laboratorních testech a konstrukce dalších sond byla upravena.

Při dlouhodobém měření sondami CCBM proto nejsou splněny základní předpoklady pro číslicovou korekci nevyvážení kanálů měřicích tenzometrů. Tento poznatek, se potvrdil i u sond CCBM, které byly použity v OKR, kde je však tato nestabilita mnohem méně pozorovatelná vzhledem k menší vlhkosti ve vrtech, kratší době měření a mnohem větším poměrným změnám deformací. Rozpínání zalévací hmoty bylo následně ověřeno laboratorním experimentem (byla naměřena změna poměrné deformace cca 1 $\mu\text{Strain}/\text{den}$). Strmost

nárůstu závisí na konkrétním umístění TC v kuželové špičce. Na základě toho poznatku bylo pro další série sond CCBM navržena konstrukční změna spočívající v zapouzdrění TC v ochranné komůrce. Stabilitu měřicích obvodů v sondách bylo možno také posoudit podle stability hodnoty CAL, jejíž graf je na obr. 4.

Jmenovitá hodnota $CAL = 2500 \mu\text{Strain}$ má být stabilní po celou dobu měření. Podle poměru $CAL/2500 \mu\text{Strain}$ se opravují naměřené hodnoty poměrných deformací jednotlivých tenzometrů. Stabilita a minimální rozptyl střední hodnoty CAL nás opravňuje k závěru, že měřicí obvody v sondě CCBM1 jsou dostatečně stabilní a data z měřicích kanálů z období do července 2010 lze použít k interpretaci změn tenzoru napjatosti masivu.

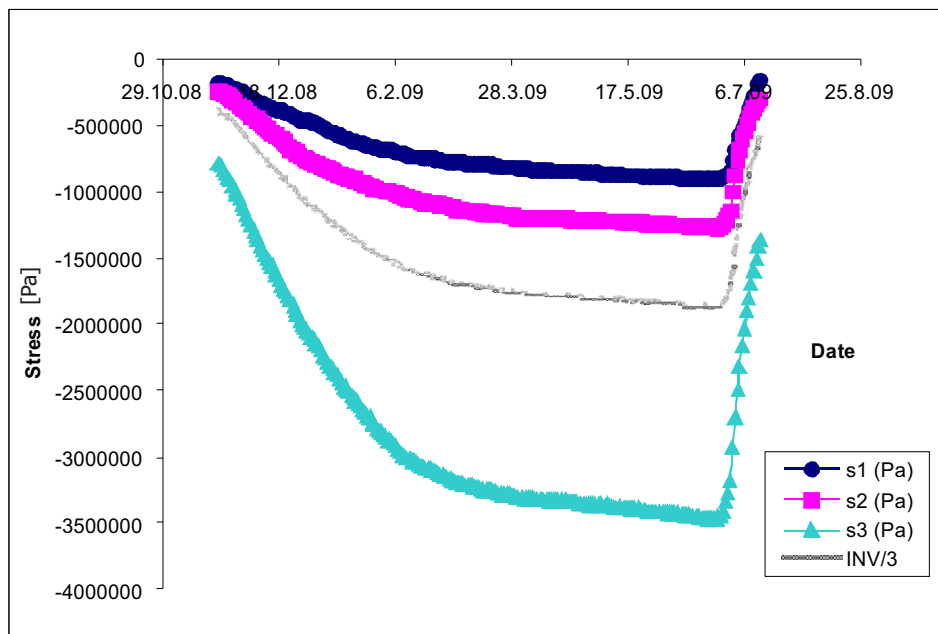


Obr. 4 Grafické znázornění hodnot CAL sondy CCBM1

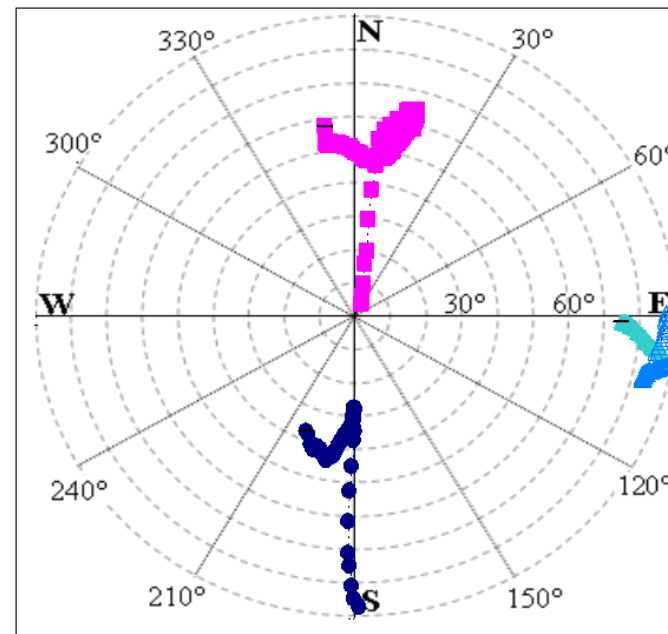
5 Geomechanická interpretace dat sondy CCBM1

V datech ze sondy CCBM1 na obr. 3 lze před červencem 2010 najít systematické anomálie, které ukazují na změny napěťového stavu. Globálně lze naměřená data rozdělit do následujících časových úseků:

- 1. období – od zahájení registrace v listopadu 2007 do listopadu 2008: V tomto období je charakter dat víceméně monotónní, ustálený na počátečních hodnotách. V období do konce ledna 2008 dochází zřejmě k pomalému vytvrzování lepidla v prostředí s nízkou teplotou cca 8°C. V období od března do května 2008 došlo k výměně registrační aparatury DMS a k úpravám programu pro registraci dat (pozorovatelná odchylka cca - 8 μ Strain). Naměřené hodnoty pod 50 μ Strain považujeme za klidový stav v rámci očekávané chyby měření.
- 2. období – od listopadu 2008 do února 2009: Došlo k rychlé monotónní záporné změně všech měřených hodnot poměrných deformací, odpovídající deformacím tlakem.



Obr. 5 Grafické znázornění průběhu složek hlavních napětí (převzato z Knejzlík et al., 2011)



Obr. 6 Projekce složek hlavních napětí (převzato z Knejzlík et al., 2011). (S1-kolečka, S2-čtverce, S3-trojúhelníky; horní hemisféra-prázdné značky, dolní hemisféra-plné značky) (převzato z Knejzlík et al., 2011)

- 3. období – od února 2009 do července 2009: Změny deformací na všech tenzometrech jsou minimální a charakterem odpovídají prvnímu období.
- 4. období – od července 2009 – listopad 2009: Hodnoty deformací se vrací k nule a přechází relativně rychle do tahové oblasti.
- 5. období – od listopadu 2009 do července 2010: Po krátké době minimálních změn nastalo období pomalého růstu tahových deformací. Výjimku tvoří dvě hodnoty, jejich nárůst byl prudký.
- V červenci 2010 došlo při úderu blesku k poškození celého DMS a též sondy CCBM1.

Pro období listopadu 2008 do července 2009 byl proveden výpočet změn hlavních napětíových směrů (Knejzlík et al., 2011). Mechanické vlastnosti granitu získaného z vrtných jader, byly stanoveny na základě laboratorní zkoušek v ÚGN, v.v.i. Rozptýl naměřených hodnot E a μ je velký ($8,6 \text{ GPa} \leq E \leq 16,5 \text{ GPa}$; $0,11 \leq \mu \leq 0,26$). Pro experimentální výpočet byly použity střední hodnoty $E = 13 \text{ GPa}$ a $\mu = 0,16$. Grafické znázornění průběhu složek hlavních napětí (S_1 , S_2 a S_3) je uvedeno na obr. 5. Dosažené hodnoty jsou velmi nízké, menší než $3,5 \text{ MPa}$. Avšak průběh změn napětí je zajímavý, zejména návrat směrem k tahu v červnu 2009. Projekce hlavních směrů napětí na dolní nebo horní polokouli je znázorněna na obr. 6. Největší tlaková složka napětí S_3 je výrazně orientována horizontálně ve směru východ-západ. Naopak orientace složek S_1 a S_2 , jejichž hodnoty jsou podobné, není výrazná (Knejzlík et al., 2011).

6 Závěr

V článku je popsáno první použití nově vyvinuté sondy CCBM pro dlouhodobé měření změn tenzoru napětí v masívu. Dosavadní výsledky experimentálního měření pomocí sond CCBM v Dole Jeroným, které probíhá od roku 2007, ukazují, že tato metoda měření umožňuje získat data nejen pro kvalitativní posouzení vývoje tahových a tlakových napětí v okolí vrtu, ale též kvantitativní data hodnocení průběhu hlavních složek napětí. Z metodického hlediska tento zkušební provoz také odhalil drobné nedostatky současného konstrukčního řešení sond. Nejvýznamnějším nedostatkem je dlouhodobá změna vyvážení kompenzačního tenzometru způsobená rozpínáním zalévací hmoty. Tento poznatek již vyústil v konstrukční změnu nově vyráběných sond. Výzkum bude dále zaměřen na výběr vhodného lepidla a jeho tuhnutí za nízkých teplot při vysoké vlhkosti. Komunikace sond CCBM zabezpečeným protokolem v DMS zajišťuje spolehlivý přenos naměřených dat. Z důvodu zlepšení ochrany proti účinkům úderu blesku bude nutno sondy CCBM důsledně uzemňovat v blízkosti vrtu, což v Dole Jeroným nebylo dodrženo.

Význam prvního výsledku experimentální interpretace změny napětíového stavu masívu nelze přeceňovat, naznačuje však, že napětíové pole v okolí komory K1 nemusí být zcela stabilní. Příčiny těchto změn nelze z krátké časové řady získaných dat interpretovat. Je zajímavé, i když zatím jde jen o úvahy, že některé popsané změny na křivkách souvisí s externími projevy. Jako příklad lze uvést výskyt seizmického roje na podzim roku 2008, po kterém se vyskytly výše uvedené změny v měřených datech. Obdobně lze vysledovat částečnou korelaci naměřených změn poměrnou deformací s regionálními změnami úrovně hladiny podzemních vod v širším okolí dolu.

Metodu CCBM bude možno v případě potřeby aplikovat v Dole Jeroným pro kontrolu změn napjatosti také na dalších vybraných místech důlního díla v průběhu plánované ražby propojovací štoly.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za částečné finanční podpory GAČR, projekt č. 105/09/0089 „Prognóza časoprostorových změn stability důlních prostor technické památky Důl Jeroným v Čistě“.

Literatura

- HRUBEŠOVÁ E., KALÁB Z., KOŘÍNEK R., ŽŮREK P.: Geotechnical Monitoring and Mathematical Modelling in Medieval Mine Jeroným (Czech Republic). *Górnictwo i Geoinżynieria*, Vol. 31, Zeszyt 3, 2007, p. 183-190.
- HRUBEŠOVÁ E., KALÁB Z., LEDNICKÁ M.: The Assessment of Stability of Cavities of Medieval Mine Jeroným. In *From Research to Design in European Practice*, 2-4 June 2010, Bratislava, Slovak Republic, Proc. of the XIVth Danube-European conference on Geotechnical Engineering [CD ROM], p. 1-9.
- KANG S. S.: Measurement and interpretation of stress history of limestone deposit. *A dissertation for Degree of Doctor of Philosophy Kumamoto*. 2000, Kumamoto University.
- KALÁB Z., LEDNICKÁ M., HRUBEŠOVÁ E.: Mining History and Present State of Medieval Mine Jeroným. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Ser. Górnictwo* z. 283, Nr. 1781, 2008, p. 61-70.
- KNEJZLÍK J., KALÁB Z., LEDNICKÁ M., STAŠ L.: Investigation of the Medieval Jeroným Mine Stability: Present Results from a Distributed Measurement Network. *Geophysics in mining and environmental protection*. Springer, Ser. Geoplanet: Earth and Planetary Sciences. In print, 2011.
- KNEJZLÍK J., RAMBOUSKÝ Z., MAKOVSKÝ J.: Sondy CCBO a CCBM 2. generace. *Interní technická zpráva k úkolu GAČR 105/06/1768. ÚGN AV ČR, v.v.i. Ostrava*, 2008a.
- NAKAMURA N., OHKUBO R., OBARA Y., KANG S. S., SUGAWARA K., KANEKO K.: Rock stress measurement for limestone open pit mine. In: *Proc. of 5th Int. Symp. on Field Measurements In Geomechanics*, Singapore, Rotterdam: Balkema, 1999, p. 375-380.
- STAŠ L., KNEJZLÍK J., RAMBOUSKÝ Z.: Conical strain gauge probe for stress measurements. *Eurock 2005 – Impact of Human Activity on the Geological Environment – Konečný (ed.)*, London: Balkema, 2005a, p. 587-592.
- STAŠ L., KNEJZLÍK J., RAMBOUSKÝ Z.: Měření tenzoru napjatosti horninového masivu pomocí kuželové sondy. *Transactions (Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební)*, roč. V, č.2/2005, p. 179-191.
- STAŠ L., SOUČEK K., KNEJZLÍK J., PALLA L., WACLAWIK, P.: First experiences of rock stress changes measurement by conical gauge probe. *Nowoczesne metody eksploatacji węgla i skał związanych*. Monografia. Kraków : AGH, 2007. p. 143-154.
- STAŠ L., SOUČEK K., KNEJZLÍK J., WACLAWIK, P. PALLA L.: Measurement of stress change tensor by conical gauge probe. *International Conference of IACMAG/12.* Bombay : Indian Institute of Technology Bombay, 2008 - (Singh, D.) p. 1397-1404.
- STAŠ L., SOUČEK K., KNEJZLÍK J.: Using of conical gauges probe for measurement of stress changes induced by progress of long wall. *SGEM 2008. International Scientific Conference /8. / Sofia* : SGEM, 2008. p. 307-314.
- STAŠ L., SOUČEK K., KNEJZLÍK J.: Conical borehole strain gauge probe applied to induced rock stress changes measurement. *12th International Congress on Energy and Mineral Resources. Proceedings*. Oviedo: Consejo superior de estudios de ingenieros de minas, 2007. p. 507-516.

Summary

This contribution describes technique of implementation of special sensors in Jeroným Mine, i.e. probe for measurement of rock mass stress changes signed as CCBM (so called “doorstopper” methodology with new conical geometry).

Compact conical strain gauge probe for borehole over coring rock massif stress measurement (CCBO), based on experiences of K. Sugavara and Y. Obara, has been developed in Institute of Geonics ASCR, v.v.i. from 2004. First generation of CCBO is equipped by simple electronic circuit which requires continuous communication with control computer in the course of measurement. Second generation of CCBO was equipped by microprocessor and internal data logger. Simplified modification of CCBO is developed as a probe for long-term monitoring of rock massif stress changes (Compact Conical Ended Borehole Monitoring - CCBM). The sensing probes CCBM are used as intelligent ARU (Addressed Remote Unit) with implementation of AIBus2 protocol. Signal ground CCBM is connected with locally earthed LGND in the place of the sensing probes installation. Quite new is possibility of long-term stress tensor changes monitoring with long distance telemetric data transmission and/or possibility of implementation of CCBM probes to the geotechnical distributed measurement system.

Two CCBM probes which data are still recorded were installed in Jeroným Mine in the year 2007. Data recorded from CCBM1 probe are analyzed in term of methodology of measurement, i.e. analysis of probe and recording instrumentation against lightning, design of ground connection of measured parts ... Conversion of data to define changes of rock massif stress tensor is made for selected time interval. Using data from CCBM1 from November 2007 to July 2010, it is possible to define systematic anomalies that document changes of stress conditions. Time series are possible to divide into five periods with different pattern of data.

Current obtained results are not significant and it is not possible to use this information for detailed analysis of stress condition in surroundings of K1 chamber in the Jeroným Mine. However, analyses of this time series document that stress fields around this underground space is not quite stabile. Also, some of detected changes are possible to correlate with extreme effects outside of mine. For example, changes on curves in autumn 2008 turn up occurring of intensive seismic swarm in Kraslice area (about 30 km).

Figures:

Fig. 1 Sketch of strain gauges placement on the surface of conical probe; photo of the CCBM probe (photo author: Lednická)

Fig. 2 The CCBM1 probe installed in borehole (photo author: Knejzlík)

Fig. 3 Plot of measured relative strain changes from CCBM1 probe (scale factor on Y axis: μStrain).

Fig. 4 Graph of CAL value from the CCBM1 probe for automatic calibration of data

Fig. 5 Plot of principal stress components (according Knejzlík et al., 2011)

Fig. 6 Projection of principal stress components; (according Knejzlík et al., 2011). Symbols: component S1-circlet, S2-square, S3-triangle; the upper hemisphere-void markers, lower hemisphere – full marks

¹ Authors

prof. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, kalab@ugn.cas.cz

Ing. Jaromír Knejzlík, CSc. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, knejzlik@ugn.cas.cz

Ing. Zdeněk Rambouský – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, rambousk@ugan.cs.cz