LABORATORNÍ STUDIUM VZORKŮ HORNIN ZE STŘEDOVĚKÉHO DOLU JERONÝM LABORATORY TESTS OF ROCK SPECIMENS FROM THE MEDIEVAL JERONÝM MINE

Markéta Lednická¹, Zdeněk Kaláb¹, Pavel Konečný¹

Abstrakt

Tento příspěvek popisuje výsledky laboratorního studia horninových vzorků ze středověkého Dolu Jeroným v Čisté. K dispozici byla jádra ze dvou cca 3 m hlubokých vrtů, které byly realizovány pro geomechanická měření v komoře v hloubce cca 30 m. Hlavní metodou bylo ultrazvukové měření, a to jak na neopracovaných válcových kusech jádra, tak i na válcových zkušebních tělesech, které byly následně připraveny. Tato zkušební tělesa byla použita pro stanovení pevnostních a přetvárných vlastností s využitím jednoosého zatížení pod lisem. Při zatěžování byla měřena i akustická emise. Pro testovaný materiál byly získány základní fyzikální a geomechanické parametry.

Abstract

This contribution describes results from laboratory tests of rock samples from medieval Jeroným Mine in Čistá (West Bohemia). Two drill cores from 3 m deep boreholes were at disposal; the boreholes were realized for geomechanical measurements in chamber about 30 m below surface. Ultrasonic measurements were the main method. It was used drilling cores and/or cylindrical test specimens that were produced subsequently. These specimens were used also for evaluation of strength and strain properties using uniaxial loading by press. Acoustic emission was also measured during loading. Basic physical and geomechanical parameters were obtained for tested rock material.

Klíčová slova

Důl Jeroným v Čisté, laboratorní test, ultrazvukové měření

1 Úvod

Důl Jeroným v Čisté (např. Beran et al., 1995, Kaláb et al., 2006 a Žůrek et al., 2008) je památkou na středověké dobývání cínowolframové rudy. Diskuze o zpřístupnění této národní kulturní památky odborné i laické veřejnosti formou muzea či skanzenu vyvolala nutnost detailního studia tohoto dolu, a to jak z pohledu montánně-historického průzkumu, tak i z pohledu posouzení stability těchto 400 let starých podzemních prostor. Studium stability představuje především geomechanický monitoring, dále geodetická měření, seizmologický monitoring, hydrogeologické studie, numerické modelování a též laboratorní studium prováděné na horninových vzorcích z dolu.

Z petrografického hlediska jsou hlavním horninovým typem, na který je vázáno zrudnění, variské granitoidní horniny, ve kterých probíhala většina hornické činnosti. V tomto příspěvku jsou představeny výsledky laboratorního výzkumu fyzikálních vlastností odebraných horninových vzorků. Metodiky měření vychází z obecných poznatků, např. Barton (2007), resp. poznatků z měření na

granitových horninách, např. Vasconcelos et al., 2008. Získané výsledky přispívají k posouzení chování těchto granitoidních hornin v horninovém masivu a poskytují důležité informace pro další výzkum.

2 Testovaný materiál

V komoře označované K1. která patří k nejstarším podzemním prostorám, bylo povoleno pro geomechanická měření odvrtání dvou vodorovných vrtů (provedeno v roce 2007). Vrty byly realizovány jako jádrové a nacházejí se v hloubce cca 25 m, resp. 30 m pod povrchem. Vrt u ústí fárací jámy do komory (dále označovaný vrt 1) byl vyvrtán v místě zdravého horninového masivu s pozůstatky ruční dobývky. Délka vrtu je 2,74 m a vrtné jádro bylo porušeno vyhojenými i otevřenými puklinami s četností 2–5 puklin/m (obr. 1). Druhý vrt dlouhý 2,83 m byl vyvrtán v téže komoře u ústí chodby spojující horní a štolové patro (dále označovaný vrt 2). Horninový masiv v místě druhého vrtu byl do hloubky 0,1 m značně porušený a i dále přesahovala četnost puklin 6 puklin/m (obr. 2).

Celistvé kusy jádra byly v laboratoři převrtány na průměr 48 mm a z takto upravených vrtných jader byla vytvarována zkušební tělesa tvaru válce o štíhlostním poměru 2:1 (výška: průměr), která jsou standardně používána pro stanovení pevnostních a přetvárných vlastností. Seznam vzorků odebraných z jednotlivých vrtů je uveden v tabulce 1.



Obr. 1 Vrtné jádro z vrtu 1



Obr. 2 Vrtné jádro z vrtu 2

3 Ultrazvukové měření na neopracovaném vrtném jádře

Před výběrem částí jader pro tvorbu zkušebních těles bylo po celé délce obou vrtných jader provedeno ultrazvukové prozařování. Cílem bylo získat informaci o velikosti průběhových rychlostí napříč jádrem a případných změnách této rychlosti podél jader. K měření byly použity přenosné měřící aparatury PUNDIT plus a TICO, které jsou sice vyvinuty pro testování betonu (nedestruktivní ultrazvukové impulzivní prozařování), umožňují však také provádění experimentálních měření v terénu na neopracovaném horninovém masívu. Pokud měříme na horninovém materiálu, tyto aparatury umožňují pouze měření průběhového času.

Tab. 1 Označení vzorků a jejich hloubková pozice

Vrt	Číslo vzorku	Hloubka [m]	
vrt 1	11807/1	$0,\!00-0,\!70$	
	11807/2		
	11807/3		
	11807/4		
	11807/5		
	12070/1	2,20-2,50	
vrt 2	12071/1	0,50 - 0,80	
	12071/2		
	12072/1	0,80 - 1,20	
	12073/1	2.50 2.90	
	12073/2	2,30 - 2,80	

Odečítán je čas příchodu P vlny ultrazvukového signálu, jak vyplývá z konstrukce aparatur a konfigurace měření. Laboratorní měření na neopracovaném jádře, stejně jako metodika měření, byla publikována Lednickou (2010), proto jsou v této kapitole představeny pouze získané výsledky.

Na každém kuse jádra, který bylo možno proměřit, byly nejprve zjištěny směry maximálních a minimálních rychlostí (6 měřících míst po obvodu jádra), a poté bylo jádro proměřeno po celé délce ve dvou na sebe kolmých směrech odpovídajících zjištěným maximálním a minimálním rychlostem. Vzdálenost měřících míst při prozařování podél jádra byla 20 mm. Hodnoty rychlostí průchodu ultrazvukových vln u vrtného jádra vrtu 1 se pohybovaly v rozmezí 1500 – 3500 m.s⁻¹, přičemž nižší hodnoty rychlostí odpovídaly místům v okolí porušených zón. Velikosti průběhových rychlostí směrem s hloubkou vrtu nepatrně narůstaly, pomineme-li okolí porušených zón. Směr maximálních a minimálních průběhových rychlostí (měřených ve směru kolmém na osu jádra) podél jádra se víceméně neměnil, výjimku tvořilo opět okolí porušených zón. Hodnoty naměřených rychlostí průchodu ultrazvukových vln u vrtného jádra vrtu 2 byly v rozmezí 1500 –3300 m.s⁻¹. V okolí rozpukaných částí docházelo opět k poklesu hodnot průběhových rychlostí, ovšem nejvýraznější pokles byl naměřen

v místě celistvého jádra v hloubce cca 11,2 m (měřeno od začátku vrtného jádra), a to pouze ve směru minimálních rychlostí. Vrtné jádro bylo v těchto místech sice na povrchu hrbolaté (následek rezonance vrtné korunky), ale pokud by docházelo ke snížení hodnot průběhových rychlostí vlivem nerovností na povrchu jádra, muselo by se toto snížení rychlostí projevit také ve směru maximálních rychlostí, k čemuž však nedocházelo. Proto bylo toto místo považováno za místo s odlišnými fyzikálními vlastnostmi. Směry maximálních a minimálních průběhových rychlostí (měřených ve směru kolmém na osu jádra) podél jádra se v proměřených částech neměnily. Pomineme-li zmiňovanou oslabenou zónu, hodnoty rychlostí podél jádra byly stabilní, nepatrně narůstaly s hloubkou vrtu.

Podle uvedených výsledků ultrazvukového prozařování na dvou vrtných jádrech lze říci, že pomocí nedestruktivní ultrazvukové impulsové metody lze získat představu o změnách průběhových rychlostí ultrazvukových vln podél jádra. Na základě těchto změn je možné detekovat například porušená místa, která odpovídají nízkým hodnotám rychlostí ultrazvukových vln. Bylo zjištěno, že v rovině kolmé k ose vrtu vykazuje hornina u obou jader anizotropii, výraznější rozdíly rychlostí ve dvou na sebe kolmých směrech byly pozorovány u jádra vrtu 2 (Lednická, 2009).

4 Ultrazvukové měření na opracovaných vzorcích vrtného jádra

Po realizaci válcových zkušebních těles z vrtných jader bylo provedeno měření, při němž pro stanovení průběhové rychlosti ultrazvukových vln byla použita elektronická modelovací aparatura EMA 2 (vyrobena v Geofyzikálním ústavu ČSAV Praha, 1971). Měření



Obr. 3 Detail příchodu P vlny na záznamech naměřených aparaturou EMA 2; z fotografie displaye bez aktuálního zobrazení rozsahu časové a amplitudové osy

rychlostí v podélném směru bylo provedeno na všech jedenácti zkušebních tělesech. Měření v příčném směru po obvodu zkušebního tělesa bylo provedeno pouze na čtyřech tělesech jádra vrtu 1 (11807/1, 11807/2, 11807/3, 12070/1) a na všech pěti tělesech jádra vrtu 2. Stejné měření bylo provedeno také pomocí aparatury PUNDIT plus, především kvůli porovnání naměřených hodnot dvěma odlišnými aparaturami (terénní versus přesná laboratorní aparatura).

Čas průběhu ultrazvukové vlny se u aparatury EMA 2 odečítá ručně vyhledáním prvního nasazení vlny na vlnovém obraze na displeji přístroje. Při prozařování uvedených devíti opracovaných zkušebních těles bylo

první nasazení vlny dobře znatelné (příklad úvodní části vlnových obrazů je na obr. 3), odečtené časy tudíž pokládáme za zcela přesné (je vyloučena chyba aparaturního odečetu jako nevýrazné nasazení, přeskočení fáze ...).

Na základě naměřených hodnot průběhových rychlostí aparaturou EMA 2 a přenosnou ultrazvukovou aparaturou PUNDIT plus byl posouzen vztah obou měření (obr. 4). Nejlépe se u obou aparatur shodují hodnoty průběhových rychlostí při prozařování vzorků v podélném směru (modrá a červená barva v grafu). Při prozařování po obvodu vzorku již dochází k větším rozdílům při porovnání průběhových rychlostí. Rychlosti naměřené pomocí aparatury PUNDIT plus vycházejí nižší než rychlosti vyhodnocené aparaturou EMA 2. U obou jader vychází uvažovaná závislosti velice podobně, rozptyl hodnot rychlostí u jádra vrtu 1 je pro získanou lineární závislost menší. Také hodnoty z pokusného měření na neopracovaném jádře z vrtu 2 mají podobný charakter (fialový čtverec v grafu na obr. 4). Důvodem rozdílů mezi průběhovými rychlostmi naměřenými dvěma různými aparaturami při měření po obvodu vzorků je pravděpodobně velmi krátká vzdálenost mezi sondami (závisí na průměru vzorku). Vlnová délka procházející ultrazvukové vlny musí být pro přesná měření menší než délka dráhy paprsku. Pro aparaturu EMA 2, kde frekvence vysílaného signálu je cca 1 MHz, při rozmezí rychlostí 2000 – 3500 m.s⁻¹, vychází vlnová délka 0,002 – 0,0035 m. U aparatury PUNDIT plus je frekvence vysílaného signálu 54 kHz, čemuž odpovídá vlnová délka 0,037 – 0,065 m, pro stejný rozsah rychlostí.



Obr. 4 Vztah průběhových rychlostí naměřených aparaturami EMA 2 a PUNDIT plus

terénní aparaturou jsou plně interpretovatelné a lze je zhodnotit i kvantitativně.

V případě nedostatečné vzdálenosti sond se proto projevuje efekt "rozměru vzorku". Rozdíly mezi průběhovými rychlostmi mohou být způsobené také nedostatečným kontaktem válcové plochy jádra s rovinou dotykové plochy sondy (přenos vibrací). Lze také podle literatury (např. Pyrak-Nolte et al., 1990) uvažovat, že u vzorků hornin obsahujících systémy orientovaných trhlin může docházet k disperzi a rychlost se tedy stává frekvenčně závislou. Na námi zkoumaných vzorcích nebyly trhliny vizuálně detekovány, a proto tento vliv nebyl uvažován.

Jedním z cílů měření vzorků přesně kalibrovou aparaturou EMA 2 bylo získat představu o skutečných



Obr. 5 Měřící komora se vzorkem upevněná v lisu Zwick 1494 (laboratoř Ústavu geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava)

hodnotách rychlostí v měřených horninách. Srovnání hodnot měřených přenosnou terénní aparaturou s daty z laboratorní aparatury EMA 2 ukázala, že měření terénní aparaturou jsou kvalitní. Z obr. 4 je vidět, že informace odvozené z měření

5 Pevnostní a přetvárné vlastnosti

Tab. 2 Výsledky měření fyzikálních a pevnostních parametrů (objemová hmotnost – ρ_0 , pevnost v prostém tlaku – σ_D , Youngův modul pružnosti – E, Poissonovo číslo – μ)

Číslo tělesa	ρ_{θ} [kg/m ³]	σ _D [MPa]	<i>E</i> [MPa]	μ
11807/1	2618	57	15400	0,26
11807/2	2610	52	12700	0,19
11807/3	2600	61	16500	0,12
11807/4	2593	57	14800	0,14
11807/5	2602	66	15500	0,20
12070/1	2621	76	10400	0,22
12071/1	2631	83	11400	0,12
12071/2	2592	73	8600	0,11
12072/1	2617	72	12200	0,17
12073/1	2661	86	12400	0,11
12073/2	2642	80	11800	0,14

Měření pevnostních a přetvárných vlastností hornin bylo realizováno na mechanickém lisu ZWICK 1494, který je schopen vyvinout max. sílu 600 kN. Snímání podélné a příčné deformace bylo prováděno pomocí měřící komory (obr. 5) vybavené dvěma pérovými tenzometrickými snímači podélné deformace a čtyřmi pérovými tenzometrickými snímači příčné deformace situovanými v polovině výšky zkušebního tělesa ve dvou kolmých směrech. Snímače příčné deformace se zkušebního tělesa dotýkají pomocí valivých doteků (Knejzlík et al., 1995). Příklad grafu závislosti napětí na přetvoření z měření na jednom ze vzorků je uveden na obr. 6. Výsledky pro všechny vzorky jsou prezentovány v tabulce 2.



Obr.6 Příklad naměřeného grafu závislosti napětí na přetvoření během vzrůstajícího jednoosého napětí (modře - osové přetvoření, žlutě - příčné přetvoření, zeleně - objemové přetvoření) a kumulativní počet akustických emisí (červeně)

U všech jedenácti zkušebních těles došlo při jednoosém tlakovém namáhání (řízené

zaťěžování) k porušení tělesa v ploše kolmé na směr minimálních rychlostí (Obr. 7). V grafu na obr. 8 je uvedena závislost Youngova modulu E (stanoven na základě napětí a přetvoření), a to na průběhové rychlosti v podélném směru. Je vidět, že hornina z vrtu 1 má odlišné deformační charakteristiky než hornina z vrtu 2.

Odlišnosti mezi horninami z vrtů 1 a 2 se projevily již dříve při hodnocení anizotropie na základě výsledků ultrazvukových měření.



pr. / Okazka porušeni zkušebniho teleša 11807/5 (vlevo) a zkušebniho tělesa 12072/1 (vpravo). Směry maximálních a minimálních průběhových rychlostí (měřeno po obvodu vzorku) jsou znázorněny barevně červená barva odpovídá směru maximálních rychlostí, modrá barva odpovídá směru minimálních rychlostí. Žlutě je zvýrazněna plocha porušení vzorku



Obr. 8 Závislost Youngova modulu E na průběhové rychlosti v podélném směru

Kromě měření síly a deformace bylo v průběhu experimentu prováděno také měření četnosti akustických emisí, aby bylo možno charakterizovat chování hornin z hlediska vývoje jejich porušení. Ze schopnosti vzorku emitovat akustické emise v průběhu zatěžování lze soudit na to, že během zaťěžování dochází ke křehkému porušování (podle Konečný, 1998).

Akustické emise jsou zaznamenávány snímačem akustických impulzů, kterým je piezoelektrický akcelerátor S9223 firmy Physical Acoustic Corporation. Tento snímač umožňuje registrace akustických signálů v rozmezí 10kHz – 100kHz. Po každém zaregistrovaném impulzu je automaticky znemožněna další registrace po dobu 3 ms, čímž se znemožní vyhodnocení jednotlivých fází akustických impulzů jako několika samostatných impulzů (Knejzlík et al., 1995). Postupný nárůst registrovaných emisí v průběhu zatěžování je pak vynesen do grafu. Příklad průběhu nárůstu počtu registrovaných akustických emisí a změn přetvoření během jednoosého zatěžování je uveden na

obr. 6. Je zřejmé, že v počáteční fázi zatěžování dochází ke stlačování zkušebního tělesa a ke kumulaci energie, což se projevuje nízkým počtem registrovaných akustických emisí. Po dosažení maximálního objemového přetvoření, odpovídající maximálnímu stlačení vzorku, začíná počet registrovaných akustických emisí narůstat, přičemž maximální nárůst odpovídá oblasti porušování zkušebního tělesa po dosažení meze pevnosti. Takovýto vývoj odpovídá uvolňování energie především formou vzniku porušení ve formě trhlin a dalších diskontinuit, které postupně vede až k destrukci zkušebního tělesa. Provedeme-li porovnání počtu registrovaných akustických emisí na studovaném materiálu se vzorky "čerstvých" granitoidních hornin, pak docházíme k závěru, že hornina z Dolu Jeroným má tento počet velmi nízký. To je zřejmě důsledek značného zvětrávání hornin v tomto historickém důlním díle.

6 Závěr

Pro laboratorní měření bylo využito vrtné jádro, které bylo získáno při realizaci mělkých vrtů pro instalaci tenzometrických sond pro sledování změn tenzoru napětí. Vrty byly odvrtány v historické části důlního díla cca 25 – 30 m pod povrchem.

Ke stanovení průběhových rychlostí bylo využito neopracovaného jádra, pro další experimenty bylo připraveno 11 válcových zkušebních těles. K měření rychlosti průchodu ultrazvukových vln bylo použito jak terénní přenosné aparatury, tak i přesnějšího laboratorního zařízení. Hodnoty průběhových rychlostí se pohybují v rozmezí $1500 - 3500 \text{ m.s}^{-1}$, což je v souladu s výsledky uváděnými v odborné literatuře (např. Barton, 2007). Výsledky měření ukazují na anizotropii vrtného jádra v ploše kolmé na osu vzorku.

Destruktivní zkoušky válcových zkušebních těles poskytly hodnoty materiálových charakteristik zkoumané horniny. U všech zkušebních těles, která byla namáhána v prostém tlaku, došlo k porušení v rovině kolmé na směr minimálních rychlostí průchodu ultrazvukových vln. Registrace akustických emisí při jednoosém zatěžování ukázala, že se jedná o horninu s nízkým počtem detekovaných jevů, zřejmě v důsledku zvětrávání.

Pro vyhodnocení závislostí vybraných parametrů horniny na rychlosti ultrazvukových vln bylo k dispozici pouze malé množství naměřených dat. Pro některé parametry, např. závislost Youngova modulu na rychlosti ultrazvukových vln, je korelační vztah poměrně těsný. Přesto měřené fyzikální vlastnosti odráží spíše strukturu a petrografické složení testovaného materiálu. Na druhé straně bylo oběma vrty prokázáno, že masiv je místy až silně rozpukán.

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 Čisté".

Literatura

BARTON, N. Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. *1. st edition. London: Tailor&Francis Group*, 2007, 721 p. BERAN, P., JANGL, L., MAJER, J., SUČEK, P., OTFRIED, W. 1000 let hornictví cínu ve Slavkovském lese. *1. vyd. Okresní muzeum Sokolov*, 1995.

- 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.*, M-29(395), 2006, p. 137-146.
- KNEJZLÍK J., KONEČNÝ P. JR., RAMBOUSKÝ Z. Měření přetvárných vlastností a akustických emisí hornin při jednoosém zatěžování. 33. konference o experimentální analýze napětí, Třešť, 1995.
- KONEČNÝ P. The laboratory study of Deforming Behavior and Related Acoustic Emission on Different Rocks. In: *Advances in Rock Mechanics*, Yunmei Lin Editor, World scientific Publishing, 1998.
- LEDNICKÁ, M. Ultrazvukové prozařování vrtného jádra z lokality historického Dolu Jeroným. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební*, 2008, roč. 8, č. 2, p. 97–105.
- LEDNICKÁ, M. Využití ultrazvukového měření pro hodnocení degradace horninového materiálu. *Disertační práce, VŠB TU Ostrava a Ústav geoniky AVČR, v.v.i.*, 2009. 95 s.
- LEDNICKÁ, M. Ověření použitelnosti přístrojů pro testování betonu při hodnocení stavu horninových vrtných jader ze středověkého dolu Jeroným. *EGRSE [CD-ROM]*, 2010, roč. XVII, č. 1, p. 35 44.
- PYRAK-NOLTE, L.J., MYER, L.R., COOK, N.G.W. Anisotropy in Seismic Velocities and Amplitudes from Multiple Parallel Fractures. *Journal of Geophysical Research*, 95, B7, 1990, doi: 10.1029/JB095iB07p11345, p. 11345-11358.
- VASCONCELOS, G., LOURENCO, P.B., ALVES, C.A.S., PAMPLONA, J. Ultrasonic Evaluation of the Physical and Mechanical Properties of Granites. *Ultrasonics*, 2008, vol. 48, no. 5, doi:10.1016/j.ultras.2008.03.008, p. 453-466.
- ŽŮREK, P., KOŘÍNEK, R., KALÁB, Z., HRUBEŠOVÁ, E., KNEJZLÍK, J., DANĚK, T., KUKUTSCH, R., MICHALČÍK, P., LEDNICKÁ, M., RAMBOUSKÝ, Z. Historický Důl Jeroným v Čisté. *Monografie. 1. vyd. Ostrava: VŠB TU Ostrava a Ústav geoniky AV ČR, v. v. i.*, 2008. 82 s.

Summary

Laboratory tests represent significant information for several tasks. In this contribution, rock samples from medieval Jeroným Mine in Čistá (West Bohemia) were used for non-destructive and then destructive laboratory measurements. First ultrasonic measurements were performed on two drill cores (length about 3 m per each) from the largest chamber located about 30 m below the surface. In this position, altered granite massif is slightly or more weathered. Simple portable apparatuses were used. Next measurements were made on cylindrical trial rock samples using laboratory instrumentation. All these measurements document that the rocks under the study have interval rock velocities (from travel times) in range $1500 - 3500 \text{ m.s}^{-1}$. Tested rocks are anisotropic namely in plane perpendicular to borehole axis. Pattern of this anisotropy is not the same for individual drill cores. It was documented from both instrumentations: portable (Pundit Plus and TICO) and also very precise laboratory instrumentation (EMA2 apparatus). According obtained results from ultrasonic measurements it is possible to document not only anisotropy but also fissures and fractures in rock samples (massif) using values of measured velocities.

Determination of physical parameters was followed by destructive measurements on rock samples. Obtained strength parameters from measurements performed during increasing of uniaxial loading (see Fig. 6) are presented in Tab. 2. Usually, failures of loaded rock samples represent general direction of plane that is perpendicular to minimum interval rock velocities. Laboratory tests showed good correlation between measured velocities and e.g. Young's elasticity modulus (see Fig. 8).

Acoustic emission was also measured during uniaxial loading. Typical shapes of curve of acoustic emissions were obtained for all tested rock samples. The number of recorded acoustic events was relatively small that is typical phenomenon of weathered granite rocks.

Figures and tables:

- Fig. 1 Drill core from the borehole No. 1
- Fig. 2 Drill core from the borehole No. 2
- Fig. 3 Details of P-wave onset on wave patterns recorded by EMA2 apparatus; figures from display photos without current time and amplitude scales
- Fig. 4 Relation between interval rock velocities (from travel times) that were measured by EMA2 apparatus and Pundit plus apparatus
- Fig. 5 Measuring chamber with the rock sample in press design Zwick 1494 (lab of Institute of Geonics ASCR, Ostrava)
- Fig. 6 Example of relation between stress and strain (blue axial strain, yellow lateral strain, green volumetric strain) and total number of registered acoustic emission (red) during increasing of uniaxial loading
- Fig. 7 Demonstrations of rock sample failures (No. 11807/5 links, No. 12072/1 right). Directions of maximum and minimum interval rock velocities are illustrated in colour directions of maximum interval rock velocities is red colour, directions of minimum one is blue colour; yellow colour signed failure plane
- Fig. 8 Relation between Young's elasticity modulus and interval rock velocities (in longitudinal direction)

Tab. 1 Rock samples identification and their depth position

Tab. 2 Results from physical and strength parameters (density - ρ_0 , strength in uniaxial loading - σ_D , Young's elasticity modulus - E, Poisson's number - μ)

¹ Authors

Ing. Markéta Lednická, Ph.D. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, lednicka@ugn.cas.cz prof. RNDr. Zdeněk Kaláb, CSc. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, kalab@ugn.cas.cz Dr. Ing. Pavel Konečný – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, konecpa@ugn.cas.cz