

Eva HRUBEŠOVÁ<sup>1</sup>, Zdeněk KALÁB<sup>2</sup>, Robert KOŘÍNEK<sup>3</sup>, Petr ŽŮREK<sup>4</sup>

DÍLČÍ VÝSLEDKY MODELOVÉ ANALÝZY STABILITNÍ A NAPĚŤO-DEFORMAČNÍ  
SITUACE KOMORY DOLU JERONÝM

PARTIAL RESULTS OF STABILITY AND STRESS-STRAIN STATE MODELING IN THE  
MINE ROOM, JERONÝM MINE

**Abstract**

This paper deals with mathematical modelling of stability and stress-strain conditions in medieval mine workings named Jeroným (near Čistá, Sokolov District). Two main topics are discussed: current state and prediction of situation during planned building operations for reconstruction of some parts. Paper presents basic conditions and presumptions of models, characteristics of partial results. Analyses of first results from modeling of mine room named K2 (transverse cross sections) using Plaxis programming system are presented.

**Key words:** Medieval Mine Jeroným, mathematical modeling, Plaxis programming system

**Charakteristika zájmové lokality**

Zájmovou lokalitou matematických modelových analýz uvedených v tomto příspěvku je středověký cinový důl Jeroným, nacházející se v obci Čistá (okres Sokolov) v západní části České republiky. Historické důlní dílo je lokalizováno v Chráněné krajinné oblasti Slavkovský les a je unikátní památkou hornické kultury od 16. století. Důl Jeroným je tvořen složitým komplexem důlních chodeb a prostor v několika úrovních nad sebou, přičemž spodní část komplexu je v současnosti zatopena vodou. Komplex historického díla v dnešní době tvoří dvě základní části – Stará důlní díla a Opuštěná důlní díla (ODD), která jsou od sebe oddělena četnými závaly většího rozsahu a obě části mají vlastní přístup (Žůrek et al., 2005; Kaláb et al., 2006).

Z hlediska geologického se jedná o žulový masív, jehož stupeň zvětrání není dostatečně znám. Masív je prostoupen množstvím trhlin, tektonických poruch a kaveren, přirozeného i umělého původu, s různým charakterem povrchu a různou výplní, které mohou tvořit průsakové cesty pro podzemní vodu.

V současné době je tato důlní lokalita veřejnosti nepřístupná, avšak v souvislosti s předpokládaným využitím části tohoto dolu k turistickým účelům byly v roce 2001 zahájeny práce k získání objektivnější a konkrétnější představy o napětí-deformační a stabilitní situaci tohoto mělkého důlního díla. Historická dokumentace dolu byla zničena a bylo tedy nutno, mimo jiné, znovu zdokumentovat alespoň nezatopené přístupné části. Dále byl v rámci této stabilitní analýzy zahájen geologický, geotechnický a seismologický monitoring tohoto systému důlních děl. Účelem

<sup>1</sup> Doc. RNDr., Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava, e-mail: eva.hrubesova@vsb.cz<sup>2</sup> Doc. RNDr., CSc., Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava, též Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, FAST VŠB-TU Ostrava, e-mail: kalab@ugn.cas.cz<sup>3</sup> Doc. Ing., CSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava, e-mail: robert.korinek@vsb.cz<sup>4</sup> Doc. Ing., CSc., Institut hornického inženýrství a bezpečnosti, Hornicko-geologická fakulta VŠB-TU Ostrava, e-mail: petr.zurek@vsb.cz

<sup>2</sup> Doc. RNDr., CSc., Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava, též Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, FAST VŠB-TU Ostrava, e-mail: kalab@ugn.cas.cz<sup>3</sup> Doc. Ing., CSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava, e-mail: robert.korinek@vsb.cz<sup>4</sup> Doc. Ing., CSc., Institut hornického inženýrství a bezpečnosti, Hornicko-geologická fakulta VŠB-TU Ostrava, e-mail: petr.zurek@vsb.cz

<sup>3</sup> Doc. Ing., CSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava, e-mail: robert.korinek@vsb.cz<sup>4</sup> Doc. Ing., CSc., Institut hornického inženýrství a bezpečnosti, Hornicko-geologická fakulta VŠB-TU Ostrava, e-mail: petr.zurek@vsb.cz

<sup>4</sup> Doc. Ing., CSc., Institut hornického inženýrství a bezpečnosti, Hornicko-geologická fakulta VŠB-TU Ostrava, e-mail: petr.zurek@vsb.cz

stávajícího geomechanického a seizmologického monitoringu je posouzení geomechanické stability částí ODD, kontrola dopadu prováděných hornických prací na historické důlní prostory a silnici procházející nad důlním dílem, jehož některé prostory se nachází mělce pod povrchem terénu.

Byla provedena detailní strukturně-tektonická měření a sledování pohybu bloků na stávajících puklinách (skleněné a sádrové destičky), konvergence je monitorována pomocí konvergenční stojky i laserového dálkoměru. Monitorovací měření zahrnují rovněž kontrolní sledování pro výškové měření změn hladiny podzemní vody, od roku 2004 jsou v této zájmové oblasti prováděna i seizmická měření.

Souhrnně lze za sledované období shrnout, že zatím nebyly detekovány významné projevy nestability důlního díla. Seizmická měření prokázala pouze malé seizmické zatížení dopravou na důlní dílem a slabými zemětřeseními z nedaleké kraslické oblasti, po dobu rekonstrukce dědičné štoly významně přispěla ke kontrole prováděných trhacích prací.

### **Matematický model zájmové lokality**

#### ***Cíle matematického modelování, koncepce tvorby modelu***

Cíle matematického modelování dolu Jeroným lze rozdělit do tří dílčích cílů:

- 1) ověřit současné stabilitní poměry díla
- 2) určit optimální lokalizaci pro rozmístění monitorovacích stanovišť
- 3) prognózovat stabilitní vývoj díla v souvislosti s budoucími uvažovanými stavebními úpravami (změny tvaru důlních prostor, ražba spojovací chodby, změna vodních poměrů) a s postupnou degradací horninového prostředí

Za účelem efektivního modelování je nutno rozdělit celý složitý komplex chodeb a kaveren na liniová a prostorová díla a přijmout určitá tvarová zjednodušení.

Mezi liniová díla lze zařadit:

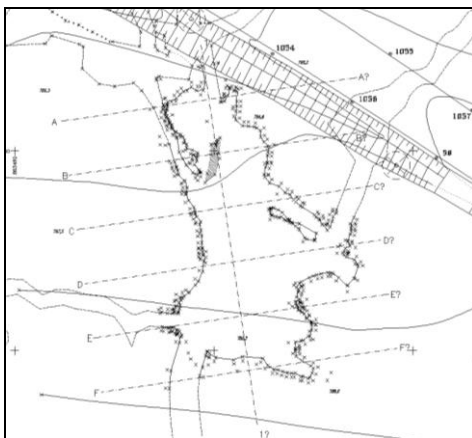
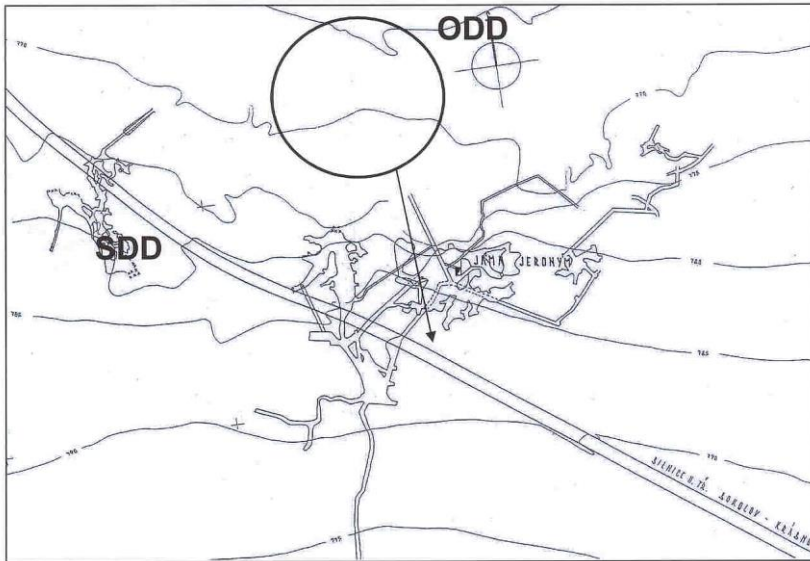
- šachta Jeroným (svislé dílo obdélníkového profilu spojující povrch s komplexem dobývek)
- štola Jeroným (vodorovné dílo spojující povrch s komplexem dobývek)
- komplex důlních chodeb – horizontální, vertikální, šikmé, navzájem propojené mezi sebou i s prostorovými díly

Do soustavy prostorových děl patří:

- komory – velkoprostorová díla nepravidelných půdorysných rozměrů a výšky (šířka 1-20 m, výška až 15 m) se zachovanými pilíři, které plní výtuzní funkci

V první fázi modelových výpočtů, jejichž dílčí výsledky jsou obsahem tohoto příspěvku, se předpokládala tvorba výpočtového modelu komory K2. Priorita této části důlního komplexu v procesu modelování je dána především tím faktem, že právě tato komora je jedním z možných míst vyústění plánované spojovací chodby mezi starými a opuštěnými díly. Tato plánovaná stavební úprava bude mít za následek změnu napětíodeformačního stavu v samotné komoře i v jejím okolí. Výsledky matematického modelování by měly, mimo jiné, kvantifikovat tyto změny, stanovit dosah vlivu uvedených stavebních úprav a vyhodnotit vliv těchto napětíodeformačních změn na stabilitní situaci oblastí.

Model vychází z měřické dokumentace detailního zaměření komory K2 (obr. 1), provedené Ing. Trnkou v roce 2006. Dle pořizené dokumentace má komora v realizovaném řezu 1-1' délku cca 30 m, šířka i výška jsou značně proměnlivé – výška od cca 2 m do 10 m, maximální šířka cca 15 m, výška masivu v nadloží komory se pohybuje v rozmezí cca 44-51 m, do komory ústí v různých výškových úrovních celkem 5 chodeb.



**Obr.1** Lokalizace komory K2 v systému důlních děl Dolu Jeroným a její půdorys.

Metody matematického modelování napětí, odeformačního a stabilitního stavu v masívu Dolu Jeroným jsou determinovány především specifickou geologií a hydrogeologií zájmové oblasti, vlastnostmi horninového prostředí, ovlivněnými nedostatečně známým stupněm zvětrávání žulového

masívu, značně nepravidelnou geometrií podzemních děl a rovněž pozůstatky dřívější těžby. Z tohoto pohledu bylo tedy navrženo postupně modelování problematiky komory Dolu Jeroným od jednodušších koncepcí rovinného modelu založeného na metodě konečných prvků až po složitější model prostorový, řešený metodou oddělených elementů.

V první etapě modelování byl vytvořen rovinný model založený na metodě konečných prvků ve vybraných reprezentativních řezech komory (programový systém Plaxis 2D) - výsledky této první etapy budou dále prezentovány v tomto příspěvku. Realizovaný jednodušší rovinný konečněprvkový model s omezenými možnostmi zohlednění reálného diskontinuitního prostředí umožní získat základní představu o napěťodeformační a stabilitní situaci v zájmové oblasti, umožňuje rovněž realizaci parametrických výpočtů. V další etapě se předpokládá vytvoření konečněprvkového prostorového modelu komory s využitím programového systému CESAR-LCPC. Vzhledem k diskontinuitnímu charakteru masívu s množstvím trhlin a puklin s různým charakterem povrchu a s různou výplní nemusí vést nejčastěji využívané numerické metody modelování kontinua (např. metoda konečných prvků) ke zcela objektivním výsledkům. Vyšší vypovídací schopnost a spolehlivost výsledků modelování by bylo možno dosáhnout s využitím tzv. metody oddělených elementů (DEM - Distinct Element Method), která byla speciálně vyvinuta pro modelování trhlínatého diskontinuitního prostředí (Cundall, 1971) a která byla implementována do programových systémů UDEC a 3DEC (ITASCA, USA). Aplikace těchto metod by měla být obsahem následujících etap modelového řešení. Metoda DEM umožňuje modelovat reálné chování horninových bloků s dominantním postavením diskontinuit, přičemž zohledňuje jejich geometrické charakteristiky (směr, hustotu, průběžnost, rozevření), charakter povrchu, výplně a vliv proudění vody diskontinuitami. Aplikace těchto metod modelování diskontinua by měla být obsahem následujících etap modelového řešení. V porovnání s výpočetními systémy založenými na metodách modelování kontinua však tento výpočetní systém klade větší nároky na tvorbu samotného modelu, na kvantitu i kvalitu vstupních charakteristik prostředí a výpočet je i v případě rovinných modelů časově dosti náročný. Především charakteristiky diskontinuit často nebývají s dostatečnou přesností a spolehlivostí známy, mnohdy se stanovují pouze na základě více či méně přesného odborného odhadu. Aplikace těchto neobjektivněji skutečnému chování diskontinuitního prostředí, pak může vést k nespolehlivým výsledkům a takovéto výsledky pak mohou v konečném důsledku zahrnovat vyšší míru neobjektivnosti než při aplikaci metod modelování kontinua.

V této souvislosti je třeba rovněž uvést, že vzhledem ke geometrické komplikovanosti celé modelované oblasti bude na základě grafického strukturně-tektonického hodnocení zejména prostorový model vyžadovat přijetí určitých tvarových zjednodušení.

#### **Charakteristiky modelu**

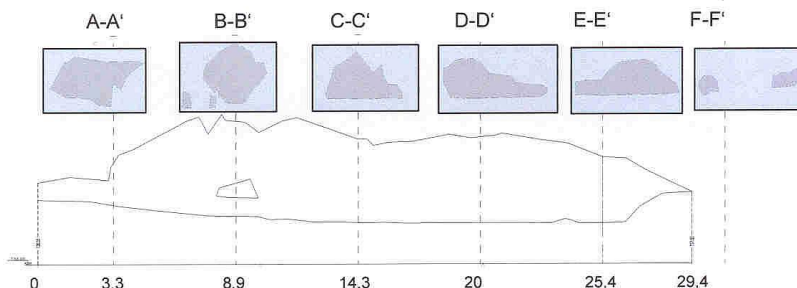
V příspěvku jsou prezentovány výsledky první dílčí fáze modelování programovým systémem Plaxis 2D. Celkem bylo modelově analyzováno 6 příčných řezů A-F (obr. 2) dle měřické dokumentace (Trnka, 2006).

Materiálové charakteristiky horninového prostředí zadávané do modelu odpovídaly průměrným hodnotám objemové hmotnosti, pevnosti v prostém tlaku, pevnosti v příčném tahu, Youngova modulu pružnosti a Poissonově číslu, které byly získány laboratorními zkouškami pracovníky Oddělení laboratorního výzkumu geomateriálů Ústavu Geoniky AVČR v Ostravě (tab.1). V modelu byl uvažován Mohr-Coulombův materiálový model, jehož charakteristiky soudržnost  $c$  a úhel vnitřního tření  $\varphi$  byly stanoveny na základě znalostí tlakové a tahové pevnosti z Mohrovy obalové čáry.

**Tab.1** Tabulka vstupních materiálových charakteristik modelu.

objemová hmotnost	pevnost v prostém tlaku (MPa)	pevnost v příčném tahu (MPa)	Youngův modul (MPa)	Poissonovo číslo
-------------------	-------------------------------	------------------------------	---------------------	------------------

2578	76.2	6.84	19 080	0.28
------	------	------	--------	------



**Obr.2** Podélný řez komorou K2 s vyznačením analyzovaných příčných řezů.

#### *Výsledky první etapy modelování*

V každém z šesti uvažovaných řezů byly vyhodnoceny posuny, napětí, čerpání pevnosti a stupeň stability (využita metoda redukce pevnostních charakteristik „phi-c“ reduction).

Hodnoty maximálních celkových posunů, lokalizovaných nad stropem komory, vykazují v závislosti na analyzovaném řezu hodnoty řádově 0.3-1.7 mm, napětí jsou koncentrována především do bočních částí průřezu, speciálně do přechodových oblastí mezi dnem komory a bočními stěnami a do oblastí dalších ostrých výstupků (obr.3). Stupeň stability, stanovovaný jako podíl skutečné smykové pevnosti  $\tau_{rel}$  a smykové pevnosti potřebné k zachování stavu neporušenosti, ukazuje ve všech analyzovaných řezech dostatečně vysoké hodnoty v rozmezí 2.4-48, což dokumentuje v těchto příčných řezech dostatečnou stabilitu současného stavu.

Ve všech řezech jsou oblasti s maximálním smykovým přetvořením lokalizovány do stropních částí řezů, a to především opět do míst ostrých výstupků. Charakteru rozložení napětí pak odpovídá i rozložení čerpání pevnosti materiálu  $\tau_{rel}$ , určené podílem vypočtené hodnoty smykových napětí  $\tau$  a maximální hodnoty smykových napětí  $\tau_{max}$  odpovídajících dotyku Mohrovy kružnice s Mohrovou obálkou.

$$\tau_{rel} = \frac{\tau}{\tau_{max}}$$

Z grafického vyhodnocení čerpání pevnosti uvedeného na obr.4 vyplývá rozmezí čerpání pevnosti 0.2-0.3, což indikuje nízkou úroveň čerpání pevnosti ve vyhodnocovaných příčných řezech komory. Maximální hodnoty celkových posunů a hodnoty stupňů stability pro jednotlivé řezy jsou uvedeny v tabulce č.2.

**Tab.2** Výsledné hodnoty maximálních posunů a stupňů stability pro analyzované řezy.

označení řezu	max. posuny (mm)	stupeň stability F
A-A*	0.66	47.7
B-B*	0.58	13.4
C-C*	0.9	2.4
D-D*	1.66	5.78
E-E*	1.44	36.3
F-F*	0.37	45.4

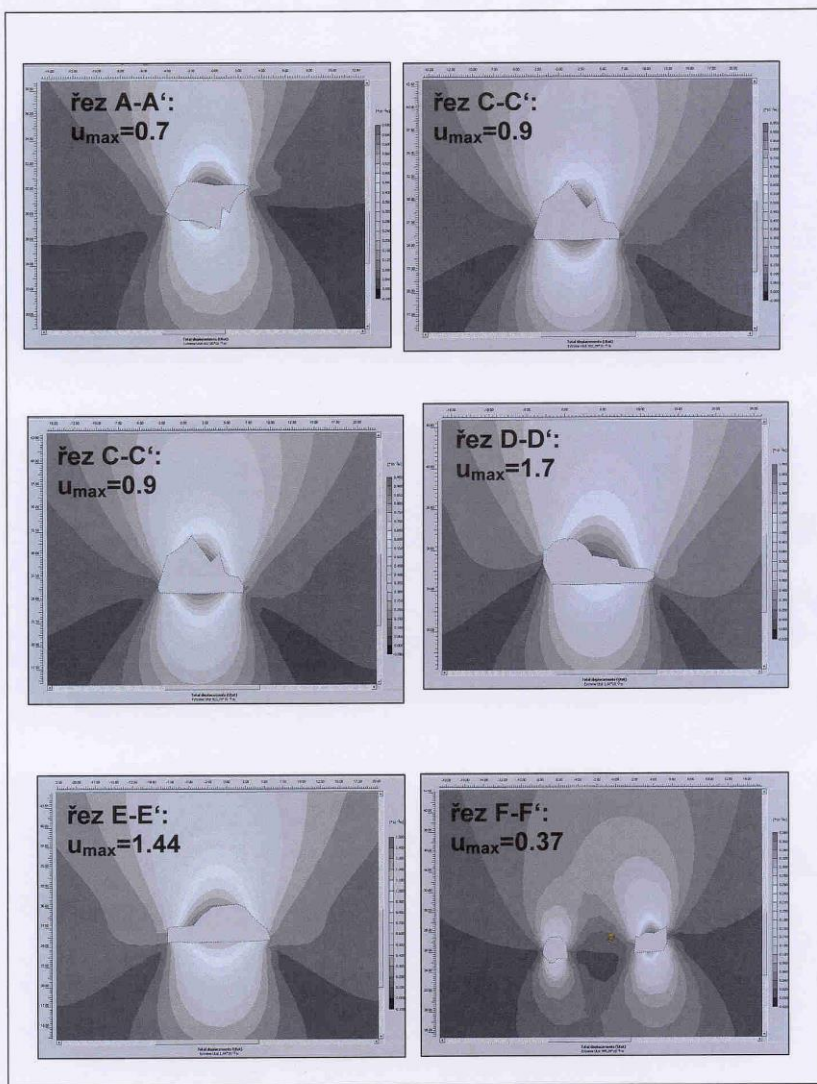
### Závěr

Výsledky první etapy matematického modelování i přes jistá zmiňovaná zjednodušení přijatá v rámci řešení této první etapy modelování (rovinný 2D model, kontinuální metoda modelování) nasvědčují dostatečné stabilitě současného stavu komory K2, což potvrzují i výsledky dosud prováděného monitoringu konvergencí. Ve vztahu ke geotechnickému monitoringu výsledky této části modelové analýzy rovněž poskytují informace o optimálním rozmístění monitorovacích stanovišť pro sledování vývoje maximálních napětíových a přetvárných poměrů v zájmové oblasti.

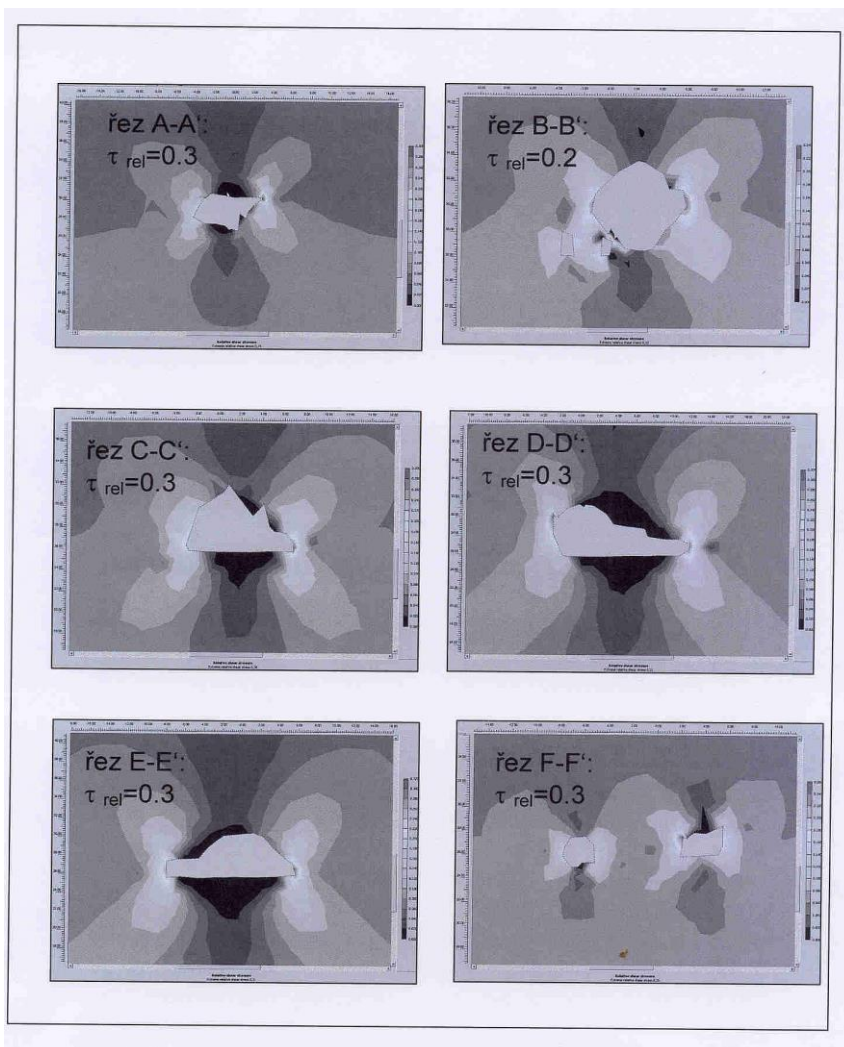
*Příspěvek byl zpracován v rámci řešení grantového projektu GAČR 105/06/0068 „Výzkum faktorů ovlivňujících stabilitu středověkého Dolu Jeroným v Čisté“*

### Literatura

- [1] Cundall, P.A. (1971): A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. In Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Nancy, France. Vol. 1, Paper No. II-8.
- [2] Kaláb, Z. & Lednická, M. (2006): Interpretace seizmických záznamů trhacích prací prováděných ve štole Jeroným v Čisté. Transactions, Řada stavební, VI, č.2/2006, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 155-160.
- [3] Kaláb, Z., Knejzlík, J., Kořínek, R. & Žůrek, P. (2006): Cultural Monument Jeroným Mine, Czech Republic – Contribution to the Geomechanical Stability Assessment. Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M-29(395), Warszawa, 137-146.
- [4] Knejzlík, J. (2006): Distribuovaný systém pro monitorování v Dole Jeroným v Čisté. Transactions, Řada stavební, VI, č.2/2006, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 181-187.
- [5] Lednická, M. & Kukutsch, R. (2007): Sledování změny úrovně hladiny důlních vod v historickém důlním díle Jeroným. Transactions, Řada stavební, VI, č.2/2007, VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [6] Trnka, P. (2006): Geodetické zaměření stěn komory K2 důlního díla Jeroným – Čistá. Zpráva z měření, nepublikováno.
- [7] Žůrek, P., Kořínek, R., Michalčík, P., Štěpánková, H., Daněk, T., Kukutsch, R., Kaláb, Z., Knejzlík, J. & Lednická, M. (2005): Komplexní sledování geotechnických problémů lokality Čistá – Důl Jeroným, období 2004-2005. Uhlí, Rudy, Geologický průzkum, 9/2005, 31-34.



Obr.3 Hodnoty celkových posunů v řezech komory K2.



**Obr.4** Vyhodnocení čerpání pevnosti v řezech komory K2.