



Analýza tlakového režimu na výstuž 1. fázy vystuženia monitorovacích štôlní úložiska rádioaktívneho odpadu

Michal Maras¹ a Jozef Hatala¹

Analysis of stresses on the 1st phase support of the monitoring drifts of the radioactive waste repository

In the paper, the stability analysis of the radioactive waste repository monitoring drifts' support by means of the numerical modeling - finite element method is described. The aim of this analysis was to judge to what extent the designed 1st phase support's parameters correspond with the geomechanical conditions determined by the engineering-geological survey.

Key words: finite element method, drift, stability, geomechanical investigation, mathematical modeling.

Úvod

Analýza stability monitorovacích štôlní predstavuje veľmi zložitú úlohu. Štôlne sú razené blízko pod povrchom terénu, v umele vytvorenom zemnom telese, s výrazne premenlivými vlastnosťami, na kontakte s veľmi tuhým betónovým telesom vlastného úložiska.

Treba zdôrazniť, že pre tak zložitý geotechnický problém sa nedajú použiť klasické prístupy k riešeniu stability zemných telies a zaťaženia v nich zabudovaných konštrukcií. Za jednu z možných metód, ktorou sa dá aspoň orientačne stanoviť charakter a veľkosť deformácií navrhutej výstuže v daných geotechnických podmienkach, je treba považovať metódu konečných prvkov.

Charakteristika modelovaného prostredia

Z vyššie uvedených dôvodov bola stabilita monitorovacích štôlní analyzovaná výpočtovým systémom GEM 22, ktorý máme na našom pracovisku k dispozícii. Výpočtový systém GEM 22 je koncipovaný pre riešenie úloh lineárnej pružnosti, a preto neumožňuje modelovanie priebehu deformácií v čase. Úloha bola riešená pomocou matematického modelu rovinatej deformácie. Riešenie je platné pre vertikálny rovinný rez o hrúbke 1 m, vedenom kolmo na pozdĺžnu os štôlne. Vstupné údaje pre riešenie úlohy sú: deformačné charakteristiky jednotlivých vrstiev zemín, prilahlých betónových konštrukcií a vlastnej výstuže štôlne, zadané modulom deformácie E a Poissonovým číslom μ . Všetky existujúce výpočtové a modelové systémy, ktoré problém riešia ako úlohu rovinatej deformácie, neumožňujú namodelovanie rámovej výstuže, čiže výstuže, ktorú tvoria nosné rámy budované v určitých vzdialenostiach po dĺžke štôlne, v tomto prípade vo vzdialenosti 0,6 m. Umožňujú modelovať len výstuž celoplošnú, ktorá kryje celý obvod štôlne.

Z týchto dôvodov, ak chceme zachovať podobnosť modelovaného javu so skutočnosťou, musíme nájsť spôsob, ktorý umožní rámovú výstuž, budovanú v skutočnosti nahradiť plošnou výstužou v modeli tak, aby bol zachovaný rovnaký stabilizačný účinok oboch výstuží. Potom je úlohou stanovenie vlastností ekvivalentnej celoplošnej výstuže, nahradzujúcej rámovú výstuž. Podobné princípy boli uplatnené v prácach: Ďurove (1994), Bukovanský (1986, 1998a, 1998b) a Tománek et al. (1995). V úlohe lineárnej pružnosti treba stanoviť veľkosť modulu pružnosti ekvivalentnej celoplošnej výstuže (E_e) o zvolenej hrúbke. Hrúbka celoplošnej výstuže bola zvolená tak, aby šírka plochy, ktorou výstuž dosadá na počvu, bola rovnaká ako v skutočnosti, čiže 8 cm.

Modul pružnosti ekvivalentnej celoplošnej výstuže bol stanovený z požiadavky rovnakého odporu výstuže (tuhosti) voči ohybu, ktorá bude splnená, ak bude platiť

$$n E I = E_e I_e,$$

kde E a I - sú modul pružnosti ocele ($E = 2 \cdot 10^5$ MPa) a I moment zotrvačnosti prierezu U-profilu, z ktorého sú vyhotovené rámy výstuže (U-80 - oblúk, U-100 - stojka),

E_e a I_e - sú modul pružnosti ekvivalentnej celoplošnej výstuže o hrúbke 8 cm a moment zotrvačnosti jej prierezu.

n - hustota budovania oceleovej rámovej výstuže (počet oblúkov na 1 m dĺžky štôlne, čiže $n = 1,67$).

Podľa vyššie uvedeného vzťahu je možné stanoviť pre oblúk z U-80 ($I = 8,94 \cdot 10^{-8}$ m⁴) modul ekvivalentnej výstuže:

¹ Doc. Ing. Michal Maras, CSc. a Prof. Ing. Jozef Hatala, CSc., Katedra dobývania ložísk a geotechniky Fakulty BERG Technickej univerzity, 043 84 Košice, Park Komenského 19

(Recenzovali: Ing. Vítazoslav Krúpa, CSc. a Doc. Ing. Juraj Ďurove, CSc.)

$$E_c = \frac{EIn}{I_c} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 89,4 \cdot 10^{-8} \cdot 1,67 \cdot 12}{0,08^3} = 6\,998 \text{ MPa,}$$

pre stojku z U-100 ($I = 174 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$)

$$E_c = \frac{EIn}{I_c} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 174 \cdot 10^{-8} \cdot 1,67 \cdot 12}{0,08^3} = 13\,584 \text{ MPa.}$$

Aby nedošlo k skresleniu zaťaženia počvy pod ekvivalentnou výstužou, bolo treba redukovať aj jej mernú hmotnosť tak, aby zaťaženie tiažou výstuže na dĺžku 1 m štôlne bolo rovnaké, ako je pri rámovej výstuži. Merná hmotnosť pre ekvivalentnú výstuž je nasledovná:

$$\begin{array}{ll} \text{pre U-80} & \rho_c = 146 \text{ kg m}^{-3}, \\ \text{pre U-100} & \rho_c = 177 \text{ kg m}^{-3}. \end{array}$$

Oceľová roznášacia podložka pod stojkami z U-100 o šírke 300 mm a hrúbke 10 mm bola modelovaná oveľa tuhšou doskou o hrúbke 50 mm (z dôvodu možného skreslenia výsledkov pri trojuholníkových prvkoch s odvesnou len 10 mm). Aj pre tento prvok bola ρ_c stanovená tak, aby tiaž podložky o hrúbke 5 cm bola rovnaká, ako tiaž podložky o hrúbke 10 mm, $\rho_c = 1\,560 \text{ kg m}^{-3}$.

Pre riešenie úlohy tohto charakteru, z hľadiska dodržania fyzikálnej podobnosti reálneho javu a jeho matematického modelu, bola rozhodujúcou voľba okrajových podmienok modelu, a to tak, aby čo najvernejšie odzrkadľovali podmienky na hraniciach modelovaného bloku v skutočnosti.

V snahe využiť kapacitné možnosti výpočtového systému GEM 22 (50 x 100 uzlov), pri základnej štvorcovej sieti uzlov s takou hustotou v modelovanom profile štôlne, ktorá zabezpečí dostatočnú presnosť, bola zvolená plocha modelu tak, ako je zobrazená na obr. 1.

Pravý okraj modelu je tvorený vnútornou stranou betónovej steny úložiska a v tejto línii pokračuje až po spodný okraj modelu. Na tomto okraji bolo zvolené plné upnutie uzlových bodov. Toto upnutie predpokladá, že razenie štôlne nevyvolá žiadne deformácie týchto stien.

Ľavý okraj modelu bol situovaný do polovičnej vzdialenosti medzi štôľňami, čiže pod stred cestnej komunikácie. Uzlové body na ľavom okraji modelu boli upnuté v horizontálnom smere, čiže môžu vykonávať len vertikálny pohyb.

Uzlové body na spodnom okraji modelu boli upnuté v oboch smeroch, čiže vychádzalo sa z predpokladu, že posunutie týchto bodov bude v skutočnosti také malé, že môže byť v modeli zanedbané.

Priebeh horného zošikmeného okraja modelu (medzi cestou a stenou úložiska) bol nahradený horizontálnym priebehom tak, aby bola zachovaná rovnosť tiaže tejto časti modelu.

Oveľa zložitejším problémom je adekvátne namodelovanie okrajových podmienok na obvode štôlne. Okrajové podmienky po pravej strane štôlne zodpovedajú skutočnosti. Medzi stojkou a stenou je ponechaná medzera. Výpočtový systém GEM 22 neumožňuje namodelovať kontakt medzi oblúkom a zeminou, ktorý je v skutočnosti ostrý, deliaci, tvorený pažením z oceľového plechu. V modeli materiál výstuže plynule "prerastá" do materiálu zemín, bez rozhrania, ktoré v skutočnosti existuje. Vo výsledkoch modelovania sa to prejavuje značným zmenšením vniku nohy oblúka do počvy štôlne. Oblúk pri vertikálnom posune "ťahá" smerom do počvy priľahlú vrstvu zeminy, s nulovým relatívnym posunutím bodov na kontakte oblúka so zeminou. Táto skutočnosť a neschopnosť systému modelovať vývoj deformácie v čase, sú hlavnou príčinou relatívne malého vniku nohy oblúka do počvy. Z týchto dôvodov je treba zdôrazniť, že výsledky modelovaných variantov majú viac kvalitatívny než kvantitatívny charakter. Umožňujú posúdiť, koľkokrát je vniknutie nohy oblúka do počvy pri modelovanej zmene vlastností zemín väčšie, v porovnaní s vniknutím v základnom modeli modelujúcom geotechnické podmienky známe pri vypracovaní projektu razenia a vystuženia monitorovacích štôlní.

V rámci tejto analýzy boli vlastnosti zemín v okolí štôlne modelované v 4 variantoch.

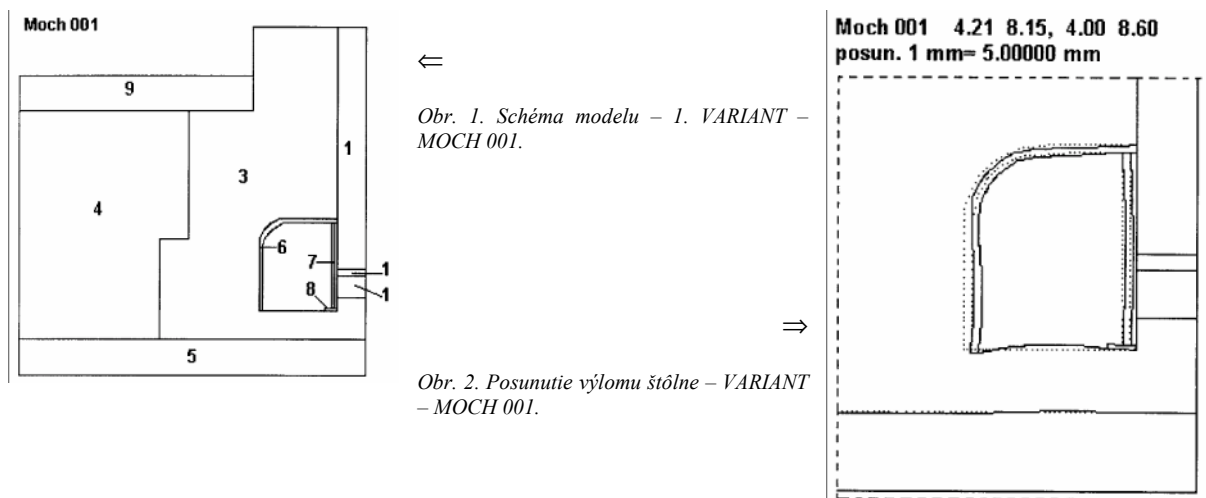
Variant - MOCH 001

predstavuje základný variant. Na obr. 1 čísla označujú materiály, ktorých vlastností sú uvedené v tabuľke 1. Vlastnosti zemín č. 3 a č. 4 sú v súlade s vlastnosťami zemín tried F6 a F5 podľa STN 73 1001 tak, ako boli zatriedené IG prieskumom - 1. etapa.

Na obr. 2 je detail modelu so zobrazením posunutí na obvode výlomu štôlne v mierke, uvedenej v záhlaví obrázku (1 mm v obrázku zodpovedá 5 mm v skutočnosti).

V tabuľke 2 je pre tento variant výpis hodnôt horizontálneho posunutia $U_x = 9,67 \text{ mm}$ a vertikálneho posunutia $U_y = 4,15 \text{ mm}$ päty nohy oblúka, ktoré je treba považovať za rozhodujúce pre posúdenie vhodnosti projektom navrhutej konštrukcie výstuže. Takto stanovené hodnoty vniku nohy oblúka do počvy je treba

považovať za veľmi nízke a návrh konštrukcie 1. fázy vystuženia za adekvátny geotechnickým podmienkam v ílovom obale úložiska, predpokladaným v 1. etape IG prieskumu.



Obr. 1. Schéma modelu – 1. VARIANT – MOCH 001.

Obr. 2. Posunutie výlomu štôlne – VARIANT – MOCH 001.

Tabuľka 1. Vlastnosti materiálov modelu.

Číslo mat.	Popis materiálu	E [MPa]	μ [-]	ρ_c [kg m ⁻³]
1	Betón (odhad)	25.10 ³	0,25	2 300
3	Ílová obálka (podľa IG – 1. etapa, F6)	10	0,4	2 050
4	Hlinený zásyp, odhad triedy F5, konzistencia pevná	7	0,4	2 000
5	Podložie – vlastnosti ako materiál 3	10	0,4	2 050
6	Oceľový oblúk U-80 (ekvivalent)	6 998	0,3	146
7	Oceľová stojka U-100 (ekvivalent)	13 584	0,3	177
8	Oceľová podložka (ekvivalent)	2.10 ⁵	0,3	1 560
9	Cestné teleso (odhad)	300	0,25	2 100

Tabuľka 2. Výpis horizontálneho a vertikálneho posunutia päty nohy oblúka.

*** GEM22 – TISK POSUNUTI V METRECH ***				
ULOHA=Moch 001				
J	I	UX	UY	
41	35	.967057E-02	.415234E-02	
*** GEM22 – TISK POSUNUTI V METRECH ***				
ULOHA=Moch 002				
J	I	UX	UY	
41	35	.168022E-01	.842393E-02	
*** GEM22 – TISK POSUNUTI V METRECH ***				
ULOHA=Moch 003				
J	I	UX	UY	
41	35	.323460E-01	.165894E-01	
*** GEM22 – TISK POSUNUTI V METRECH ***				
ULOHA=Moch 004				
J	I	UX	UY	
41	35	.532637E-01	.262476E-01	

Variant - MOCH 002

modeluje stav zistený 2. etapou prieskumu z marca 1997. Laboratórnym výskumom na vzorkách zemín z prieskumných vrtov, vrtaných do ílového obalu úložiska, boli stanovené hodnoty rozhodujúceho parametra pre metódu konečných prvkov - modulu deformácie. V správe o výsledkoch IGH prieskumu (Svetík et al., 1997) sú uvedené hodnoty optimálneho modulu E_{oad} [MPa]. Z hľadiska početnosti je treba za dostatočne reprezentatívne považovať hodnoty pre hĺbkové intervaly 2 - 4 m, 4 - 6 m a 6 - 7 m. V intervale 2 - 4 m boli pre jednotlivé vrty R-1 až R-21 stanovené tieto priemerné hodnoty E_{oad} :

$$R-1 \quad E_{\text{oad}} = 14,30 \text{ MPa,}$$

$$R-10 \quad E_{\text{oad}} = 12,21 \text{ MPa,}$$

$$\text{priemerný } E_{\text{oad}} = 13,47 \text{ MPa.}$$

$$\begin{aligned} R-15 E_{\text{oed}} &= 13,90 \text{ MPa,} \\ R-21 E_{\text{oed}} &= 11,53 \text{ MPa,} \end{aligned}$$

Priemerná hodnota modulu deformácie E, prepočítaná z E_{oed} je

$$E = E_{\text{oed}} \cdot \beta = 13,47 \cdot 0,47 = 6,33 \text{ MPa.}$$

V dvoch vrtoch R-8 a R-13 boli stanovené podstatne nižšie hodnoty

$$\begin{aligned} R-8 E_{\text{oed}} &= 6,73 \text{ MPa,} & \text{priemerný } E_{\text{oed}} &= 6,00 \text{ MPa.} \\ R-13 E_{\text{oed}} &= 5,56 \text{ MPa,} \end{aligned}$$

Priemerná hodnota modulu deformácie z týchto dvoch vrtoch je

$$E = E_{\text{oed}} \cdot \beta = 6,00 \cdot 0,47 = 2,82 \text{ MPa.}$$

V intervale 4 - 6 m boli v 6 vrtoch stanovené pomerne blízke hodnoty

$$\begin{aligned} R-1 E_{\text{oed}} &= 12,24 \text{ MPa,} \\ R-3 E_{\text{oed}} &= 9,69 \text{ MPa,} \\ R-5 E_{\text{oed}} &= 13,30 \text{ MPa,} & \text{priemerný } E_{\text{oed}} &= 12,9 \text{ MPa.} \\ R-9 E_{\text{oed}} &= 12,70 \text{ MPa,} \\ R-13 E_{\text{oed}} &= 17,30 \text{ MPa,} \\ R-17 E_{\text{oed}} &= 13,05 \text{ MPa,} \end{aligned}$$

Priemerná hodnota modulu deformácie pre hĺbkový rozsah 4 - 6 m je

$$E = E_{\text{oed}} \cdot \beta = 12,9 \cdot 0,47 = 6,1 \text{ MPa.}$$

V hĺbkovom intervale 6 - 7 m sú približne zhodné výsledky vo vrtoch

$$\begin{aligned} R-3 E_{\text{oed}} &= 12,87 \text{ MPa,} \\ R-5 E_{\text{oed}} &= 10,00 \text{ MPa,} \\ R-13 E_{\text{oed}} &= 11,16 \text{ MPa,} & \text{priemer: } E_{\text{oed}} &= 10,87 \text{ MPa.} \\ R-15 E_{\text{oed}} &= 11,73 \text{ MPa,} \\ R-17 E_{\text{oed}} &= 8,19 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

Priemerná hodnota modulu deformácie pre hĺbkový rozsah 6 - 7 m je

$$E = E_{\text{oed}} \cdot \beta = 10,87 \cdot 0,47 = 5,1 \text{ MPa.}$$

Jedine vo vrte R-18 bola zistená oveľa nižšia hodnota $E_{\text{oed}} = 5,62 \text{ MPa}$, ktorej odpovedá hodnota $E = 2,64 \text{ MPa}$.

Malej hrúbke podložia, zasahujúcej do spodnej časti modelu sú priradené vlastnosti zemin z intervalu 6 - 7 m.

Na obr. 3 je zobrazené rozloženie materiálov v modeli 2. VARIANT - MOCH 002. V tabuľke 3 je popis tých materiálov, ktoré sú oproti materiálom v 1. variante odlišné.

Tabuľka 3. Vlastnosti materiálov – doplnok 1.

Číslo mat.	Popis materiálu	E [MPa]	μ [-]	ρ_c [kg m ⁻³]
10	Zemina v intervale 0 – 4 m	6,33	0,4	2 050
3	Ľвовá obálka (podľa IG – 1. etapa, F6)	6,10	0,4	2 050
5	Hlinený zásyp, odhad triedy F5, konzistencia pevná	5,10	0,4	2 050

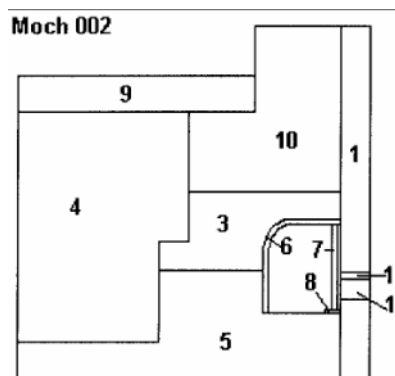
Priebeh posunutí na obvodě štôlně je v detaile na obr. 4 a výpis hodnôt posunutí päty nohy oblúka v tabuľke 2

$$\begin{aligned} U_x &= 16,8 \text{ mm,} \\ U_y &= 8,4 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Nižšie hodnoty modulu deformácie, zistené 2. etapou IG prieskumu, sa prejavujú zvýšením posunutí oproti základnému variantu súčiniteľmi

$$k_x = 1,73,$$

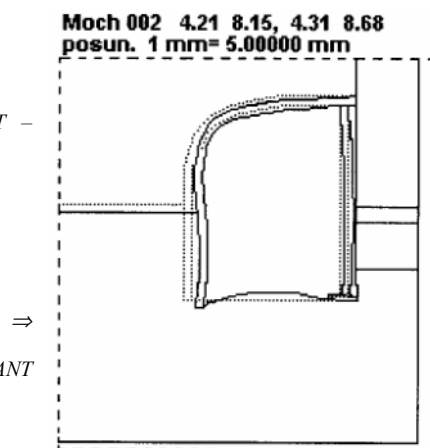
$$k_y = 2,05.$$



←

Obr. 3. Schéma modelu - VARIANT - MOCH 002

Obr. 4. Posunutie výlomu štólne - VARIANT - 002.



Variant - MOCH 003

predpokladá, že v intervale 0 - 4 m môžu existovať polohy, ktoré charakterizujú vrty R-8 a R-13 a polohu pod 6 m vrt R-18. Rozloženie materiálov v modeli je rovnaké ako u 2. variantu - MOCH 002. Vlastnosti jednotlivých polôh zemin sú v tabuľke 4. Priebeh posunutí na obvode štólne je na obr. 5 a veľkosť posunutí päty nohy oblúka v tabuľke 2

$$U_x = 32,3 \text{ mm},$$

$$U_y = 16,6 \text{ mm}.$$

Tabuľka 4. Vlastnosti materiálov - doplnok 2.

Číslo mat.	Popis materiálu	E [MPa]	μ [-]	ρ_e [kg m ⁻³]
10	Zemina v intervale 0 - 4 m podľa vrtnov R-8 a R-13	2,82	0,4	2 050
3	Zemina v intervale 4 - 6 m rovnaká ako u 2. variantu	6,10	0,4	2 050
5	Zemina v intervale 6 - spodný okraj modelu podľa vrtu R-18	2,64	0,4	2 050

Súčinitele nárastu veľkosti týchto posunutí oproti základnému variantu sú

$$k_x = 3,3,$$

$$k_y = 4,0.$$

Variant - MOCH 004

Podľa vizuálneho posúdenia konzistencie zemin v počve štólne v uvedených úsekoch možno usudzovať, že zemina triedy F6 sa nachádzala v mäkkom konzistenčnom stave. (Potvrdzujú to aj výsledky skúšok na odobratých vzorkách).

Podľa prílohy č. 6 ČSN 73 1001 tomuto stavu odpovedá modul deformácie v intervale 1,5 až 3,0 MPa. Potom 4. variant, ktorý modeluje zeminu v intervale 6 m - spodný okraj modelu, uvažuje pre zeminu č. 5 spodnú hranicu tohto intervalu, čiže $E = 1,5 \text{ MPa}$, $\mu = 0,4$, $\rho_o = 2050 \text{ kg m}^{-3}$. Rozloženie zemin je na obr. 6. Ďalšou zmenou oproti 2. a 3. variantu je to, že bolo uvažované aj so zmäknutím hlineného zásypu pod úrovňou 6 m a v tomto intervale mu boli prisúdené vlastnosti zhodné s vlastnosťami materiálu č. 5.

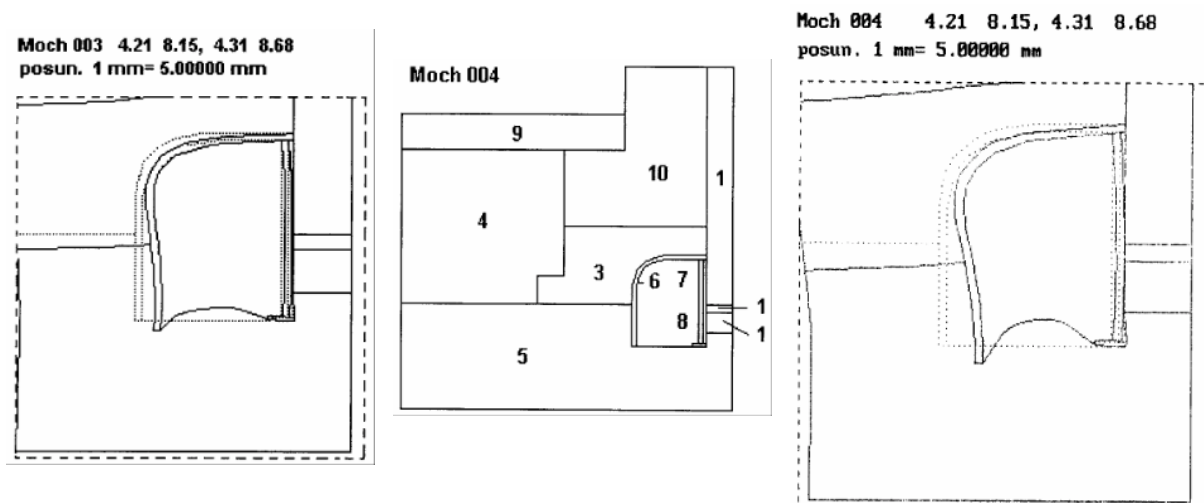
Z obr. 7, ktorý zobrazuje priebeh posunutia obvodu štólne vidieť postupný nárast zdvihu počvy a vniku nohy oblúka do počvy. Výpis hodnôt posunutí päty nohy oblúka je v tabuľke 2.

$$U_x = 53,3 \text{ mm},$$

$$U_y = 26,3 \text{ mm},$$

$$k_x = 5,5,$$

$$k_y = 6,3.$$



Obr. 5. Posunutie výlomu štôlne – VARIANT – MOCH 003.

Obr. 6. Schéma modelu – VARIANT – MOCH 004.

Obr. 7. Posunutie výlomu štôlne – VARIANT – MOCH 004.

Záver

Z popísanej analýzy tlakového režimu 1. fázy vystuženia monitorovacích štôlní vyplývajú tieto podstatné závery:

1. Návrh výstuže 1. fázy vystuženia odpovedá stupňu poznania vstupných geotechnických parametrov a ich predpokladanej veľkosti. S dostatočnou nosnou rezervou stabilitu výlomu štôlne.
2. Následná 2. etapa IG prieskumu zistila nižšie hodnoty modulu pretvárnosti v porovnaní s predpokladom 1. etapy prieskumu. Zisťuje väčšiu veľkosť posunutí a oveľa nižšie hodnoty modulu deformácie hlavne v polohe spodnej časti štôlne.
3. Zmäknutie počvy je pravdepodobne ovplyvnené vytečením vody do štôlne z drenážneho systému a tiež kapilárnym vztlínaním z odkrytého vodného horizontu, čo sa výrazne prejavuje vo vnikaní nohy výstužného oblúka do počvy. Pre takéto podmienky navrhnutá výstuž nevyhovuje, nie však z dôvodu únosnosti, ale z dôvodu jej konštrukcie. Pre takéto podmienky mala byť zväčšená podložka pod nohou oblúka, s požiadavkou väčšieho krytia počvy, čo by eliminovalo do značnej miery vnikanie oblúka do počvy a zdvih počvy. V tomto prípade eliminovanie horizontálnej zložky posunutia vyžaduje rozopretie oblúka na úrovni počvy.

Literatúra

- Bukovanský, S.: Antagonismus geomechanických jevů lokality Frenštát – západ. *Závěrečná správa tematickej úlohy pre OKD – VDF k.u.o., 1986.*
- Bukovanský, S.: Stabilita uhelného pilíře s ohledem na dobývanou mocnost slaje či lávky v protitřesovém boji se zřetelom k důlním podmínkám OKR. *Acta Montanistica Slovaca 1/98a, s. 89-91.*
- Bukovanský, S.: Stabilita porubů při dynamickém namáhání ve vztahu k důlním otřesům na hlubinných černouhelných dolech v OKR. *Acta Montanistica Slovaca 4/98b, s. 315-316.*
- Ďurove, J.: Analýza stability dlhých banských diel uhoľných ložísk SR pomocou fyzikálneho modelovania. *Kandidátska dizertačná práca. TU Košice, F BERG, Košice 1994.*
- Hatala J., Maras, M.: Analýza tlakového režimu na výstuž 1. fáze vystuženia monitorovacích štôlní úložiska rádioaktívneho odpadu Mochovce. *Expertízne posúdenie na základe požiadania INCO - Banské projekty, s.r.o. Bratislava, F BERG, TU Košice, september 1997.*
- Svetík et al.: Doplnkový inžiniersko-geologický a hydrogeologický prieskum. *Závěrečná správa, Hydroconsult Bratislava, marec 1997.*
- Tománek, P a Bukovanský, S.: Optická čidla pro indikaci a sledování některých geomechanických projevů horského masivu při hlubinném dobývání. *VŠB –TU Ostrava, 1995.*