

Možnosti posudzovania podzemných kavern metódou matematického modelovania

Peter Paločko¹ a Jaroslav Daňko²

Possibilities of judging underground caverns based on the mathematical modelling

A basic assumption of utilizing salt caverns as underground storages is ensuring their safety and geotechnical stability. The paper shows on example possibilities of mathematical modelling of solution stability salt caverns in Zbudza. It includes a geotechnical description of the deposit, its geotechnical properties, grid of geometry definition, and the way of definition of stress-strain relations. In conclusion, the reached results are shown.

Key words: geotechnical stability, salt cavern, mathematical modelling

Úvod

Celosvetová energetická situácia a aspekty energetickej bezpečnosti vyústili v posledných rokoch do nového spôsobu uskladňovania ropy v rôznych typoch podzemných zásobníkov, ktoré bývajú najčastejšie v tvare vertikálnych valcovitých telies. V takýchto podzemných telesách možno uskladňovať ropu a zemný plyn (Martinez, 1983), prípadne produkty týchto látok ako: propán, bután, etán, etylén, či nafta (Veil, 1996).

Aby podzemné dielo mohlo plniť svoju úlohu počas celej doby svojej životnosti, je potrebné zabezpečiť jeho geotechnickú stabilitu, t.j. nesmie tu nastať I. skupina ani II. skupina (medzných stavov deformácii) medzných stavov. Na zistenie napät'ovo – deformačných vlastností boli vypracované viaceré metodiky, ktoré je možné rozdeliť do základných skupín:

- empirické metódy,
- analytické metódy,
- matematické a fyzikálne modelovanie.

Pri navrhnutí hrúbky medzikomorového piliera medzi komorami P6-P9 na ložisku Zbudza pomocou matematického modelovania boli využité poznatky z predchádzajúcich prác (Maras a kol., 2000) vykonaných na Katedre dobývania ložísk a geotechniky (KDLaG) Fakulty BERG TU Košice, ktorých zadávateľom bol závod Solivary a.s. Prešov (Đurove, 1997).

Geologická a geotechnická charakteristika ložiska

Ložisko kamennej soli Zbudza sa nachádza v severnom výbežku Severotiskej nížiny pri rieke Laborec, na začiatku jej dolného toku.

Svojou geologickou pozíciou patrí k neogénu východoslovenskej panvy. Ide o niekoľko čiastkových depresií s akumuláciami kamennej soli, z ktorých najvýznamnejšou je ložisko Zbudza.

Nadložíe ložiska je vzhľadom na výskyt polôh pieskov, štrkov a štrkopieskov a blízkosť rieky Laborec považované za zvodnelé. Vlastné ložisko soli je bezvodné, prieskum nepreukázal žiadne prítoky vôd. Hydrogeologické pomery podložia neboli detailne preskúmané.

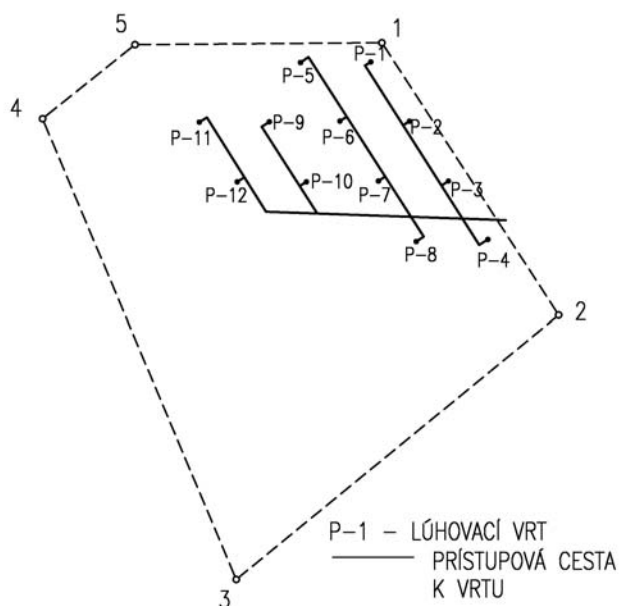
Na podklade štúdie „Predbežné stabilné riešenie zásobníkov uhľovodíkov Zbudza“, vypracovanej Vysokou školou banskou v Ostrave, Katedrou geotechniky a podzemného staviteľstva, bola osová vzdialenosť susediacich komôr stanovená na 140 – 150 m. Na základe tohto návrhu bolo určené rozmiestnenie ťažobných vrtov na povrchu v trojuholníkovej sieti, s dĺžkou strany 140 m pri predpokladanom priemere komôr 70 m. Na základe toho boli v lúhovacom poli č. 1 (obr. č. 1) doteraz realizované vrty P-2, P-3, P-6, P-7, P-8 a P-4.

Geomechanické vlastnosti hornín, ktoré boli použité ako vstupné hodnoty pre matematický model, boli určené na Katedre dobývania ložísk a geotechniky (Đurove a kol. 1997). Ich výsledky sú zhrnuté v tab. 1:

¹ Ing. Peter Paločko, Banské projekty s r. o., Miletičova 23, 821 09 Bratislava, paločko@gmail.com

² Ing. Jaroslav Daňko, Katedra dobývania ložísk a geotechniky F BERG Technickej univerzity, 043 84 Košice, Park Komenského 19, jaroslav.danko@tuke.sk

(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 8. 2. 2006)



Obr. 1. Schéma siete lúhovacích vrtov.
Fig. 1. Diagram of liming holes network.

Tab. 1. Geomechanické vlastnosti hornín.
Tab. 1. Geomechanical properties of rock.

Materiál	Youngov modul E [MPa]	Poissonovo číslo μ [-]	Hĺbka pod povrchom [m]
Nadložie	691	0,12	0÷464
Sol'	1632	0,31	464÷595
Preplástok	691	0,12	525÷526,5
Podložie	691	0,12	595 a hlbšie

Reologické vlastnosti horniny boli určené v CHEMKOP Krakow (Kasprzyk, 1998). Podľa Nortonovho zákona sa reologická deformácia popisuje vzťahom:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A \bar{\sigma}^{-n}$$

kde

$\dot{\varepsilon}_{cr}$ - je miera plazivosti [rok⁻¹],

$\bar{\sigma}$ - stredný tlak [MPa],

A, n - koeficienty plazivosti A [MPa⁻ⁿ.rok⁻¹], n [-].

Pre ložisko Zbudza na základe meraní CHEMKOP Krakow boli pre reologický model určené tieto hodnoty: $A=3,1529 \cdot 10^{-9}$ MPa⁻ⁿ.rok⁻¹ $n=3,6569$.

Matematický model ložiska a výpočet metódou konečných rozdielov

Napätovo deformačné úlohy, ktoré nie je možné riešiť analytickými metódami, sa dajú veľmi vhodne riešiť metódami matematickej aproximácie alebo pomocou fyzikálneho modelovania.

Keďže pri fyzikálnych javoch, ktoré patria do sféry mechaniky hornín nepoznáme vzťahové rovnice, alebo sú známe pre značne idealizované prostredie je vhodné v takýchto prípadoch realizovať fyzikálne modelovanie. Podrobnejšie sa touto problematikou zaoberá napr. (Ďurove, 1990) alebo (Kožešník, 1989).

Matematike modelovanie je možné použiť, pokiaľ sa dajú s potrebnou presnosťou matematicky definovať vzťahy v horninovom prostredí. Výhodou týchto metód je široká škála riešiteľných úloh.

V konkrétnom prípade bol ako nástroj matematického modelovania použitý program FLAC^{3D} vyvíjaný spoločnosťou Itasca consulting group, Inc., USA.

Pre modelovanie dvoch lúhovacích komôr v dobývacom priestore Zbudza.

Prvá komora sa má lúhovať vo vrte P-6, pričom jej strop v ložisku je v hĺbke 464 m. Nadložie tvoria íly, podložie je zastúpené anhydritom a prachovcami. Ložisko soli je v hĺbke 525 m predelené preplástkom pieskovca hrúbky 1,5 m. (Geomechanické vlastnosti všetkých zastúpených hornín sú uvedené vyššie).

Druhá komora sa nachádza v plánovanom vrte P-9. Vzhľadom na to, že tento vrt ešte nebol navŕtaný, pri jeho modelovaní sa predpokladali rovnaké petrografické zloženie hornín ako vo vrte P-6 s ohľadom na úklon vrstiev zistený odvrátenými vrtmi.

Parametre komôr (s ohľadom na predchádzajúce práce na KDLaG) boli nasledovné:

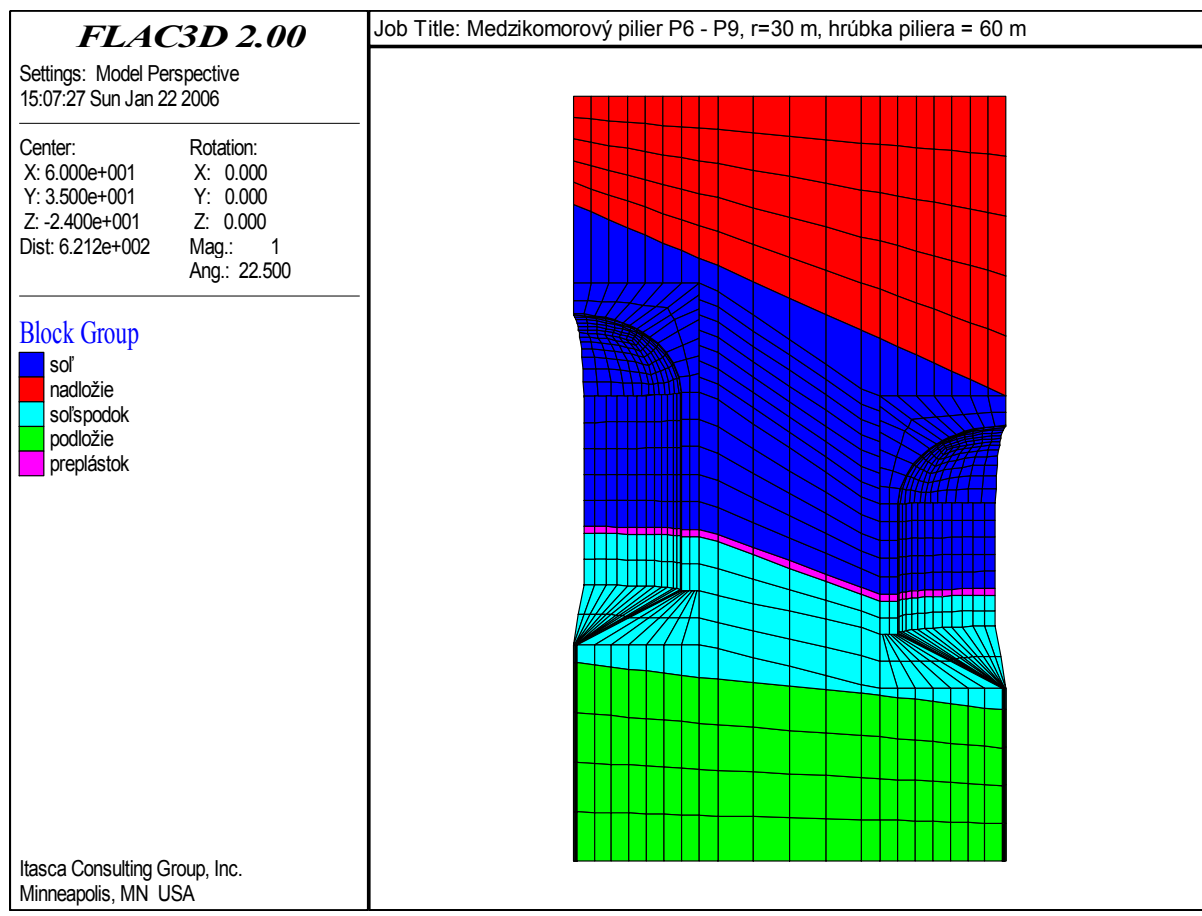
- vrchnú časť komory tvorí klenba tvaru elipsoidu s pomerom poloosí $x:y:z = 1:1:0,52$,
- telo komory tvorí valec s polomerom 30 m,
- spodnú časť komory tvorí kužeľ s výškou 14 m.

Počas práce boli skúmané tieto tri varianty:

- osová vzdialenosť komôr 140 m, hrúbka medzikomorového piliera 80m,
- osová vzdialenosť komôr 120 m, hrúbka medzikomorového piliera 60m,
- osová vzdialenosť komôr 100 m, hrúbka medzikomorového piliera 40m.

Definícia matematického modelu piliera

Geometriu modelu názorne ukazuje obr. 2



Obr. 2. Geometrický model medzikomorového piliera.

Fig. 2. Geometric model of inter-cavern protective pillar.

Okrajové podmienky sú definované ako obmedzenie pohyblivosti určitých plôch a definovanie napätí v určitých oblastiach.

Obmedzenie pohyblivosti. V tomto prípade sa to týka plôch na okraji modelu v smere normály na plochu; pričom horná plocha sa ponechá voľná. Táto podmienka sa tiež nazýva „tuhá vaňa“.

Iniciačné napätia, v tomto prípade ide o stav primárnych napätí na vrchnej ploche modelu.

Primárne napätia boli vypočítané z geostatického tlaku v zodpovedajúcej hĺbke. Hodnoty primárneho napätia sa vypočítajú podľa vzťahov (Hatala, Trančík, 1987):

$$\sigma_z = H\rho_0g = 410.2346.9,81 = 9436847Pa = 9,436 MPa$$

Kde H - hĺbka pod povrchom (vrch modelu) [m],

ρ_0 - objemová tiaž nadložných hornín [$kg\ m^{-3}$],

g - zemské tiažové zrýchlenie [$m\ s^{-1}$].

Bočný tlak je potom:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z k = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z = \frac{0,07}{1-0,07} 9,436 = 0,709 \text{ MPa}$$

kde k - je súčiniteľ bočného tlaku [-],
 μ - Poissonovo číslo hornín [-],

Hodnoty σ_x a σ_z platia pre hornú hranicu riešenej oblasti (vrch modelu).

Definovanie vlastností horniny – behavioristická časť modelu popisuje správanie sa horniny pri určitom zaťažení. Pre nadložie, podložie a preplástok bol zvolený model elastický, pre samotnú soľ model „power“ (Manuál FLAC^{3D}), ktorý zohľadňuje reologické vlastnosti materiálu podľa Nortonovho zákona.

Výpočet rozdelený na 2 časti:

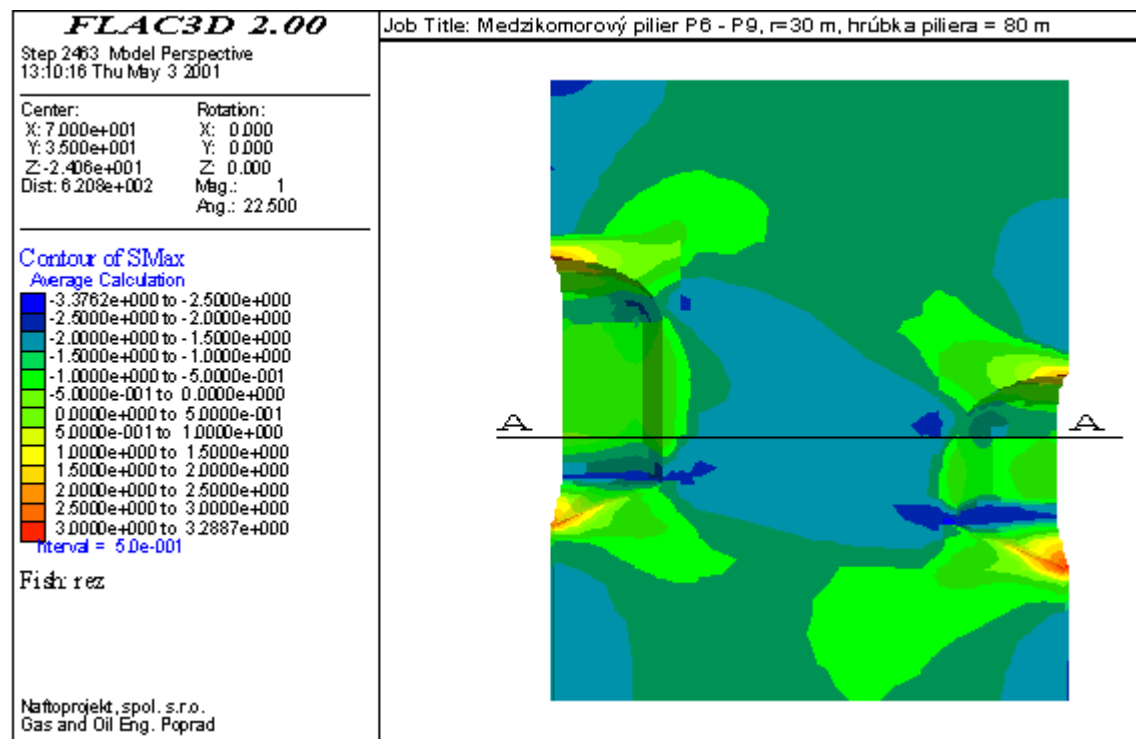
1. vyhľadanie rovnovážneho stavu po vytvorení kavery metódou konečných rozdielov (čas a spôsob vzniku kavery nebol nezohľadňovaný),
2. simulovanie reologických vlastností soli po dobu jedného roka.

Interpretácia výsledkov

Záverčnou fázou skúmania podzemného objektu pomocou matematického modelovania je analýza vzniknutých napätí a deformácií. Na základe týchto výstupov je potom možné posúdenie či navrhované podzemné dielo je alebo nie je stabilné, prípadne navrhnutie ďalších úprav. Keďže použitý behavioristický model neumožňoval sledovať stupeň bezpečnosti diskretných oblastí, stabilita piliera bola posúdená pomocou dosiahnutia (resp. nedosiahnutia) medzných stavov jednotlivých veličín. Počas interpretácie boli sledované tieto veličiny:

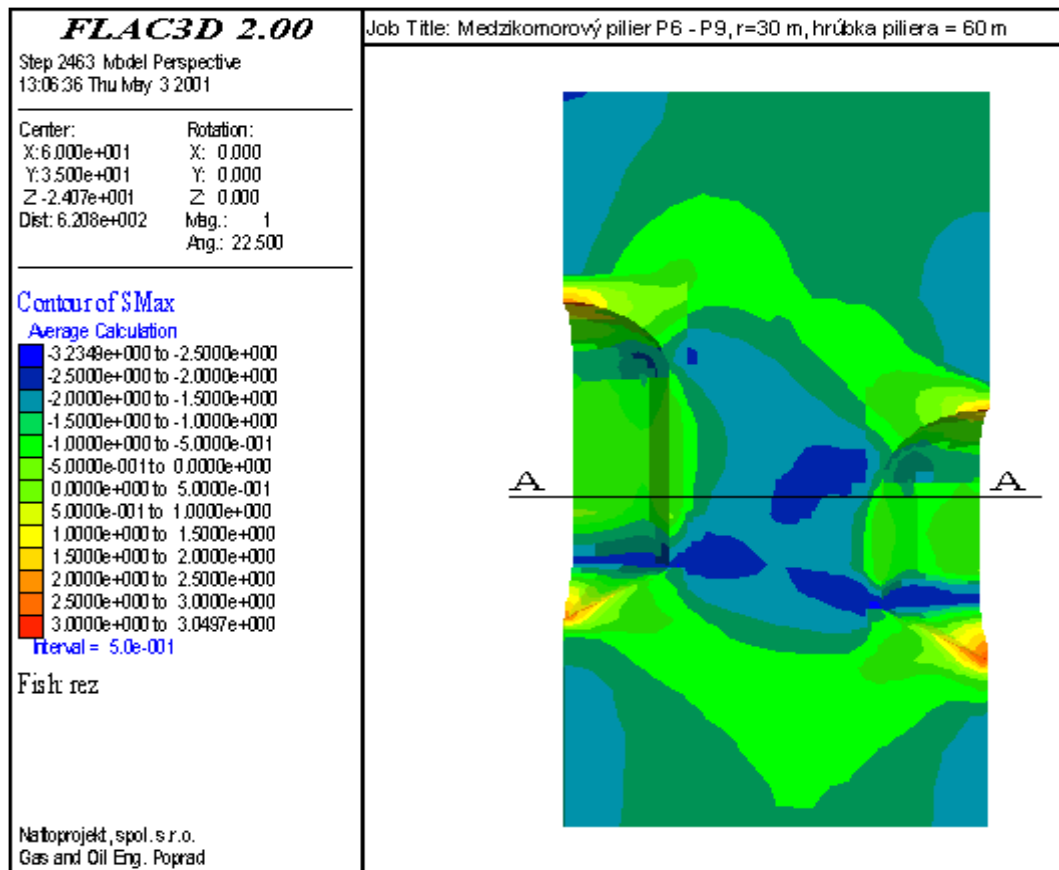
- maximálne a minimálne hlavné napätia;
- šmykové napätia τ_{xy} , τ_{xz} a τ_{yz} ;
- deformácie piliera a komôr.

Hlavné napätia (viď obr. č. 3,4,5)



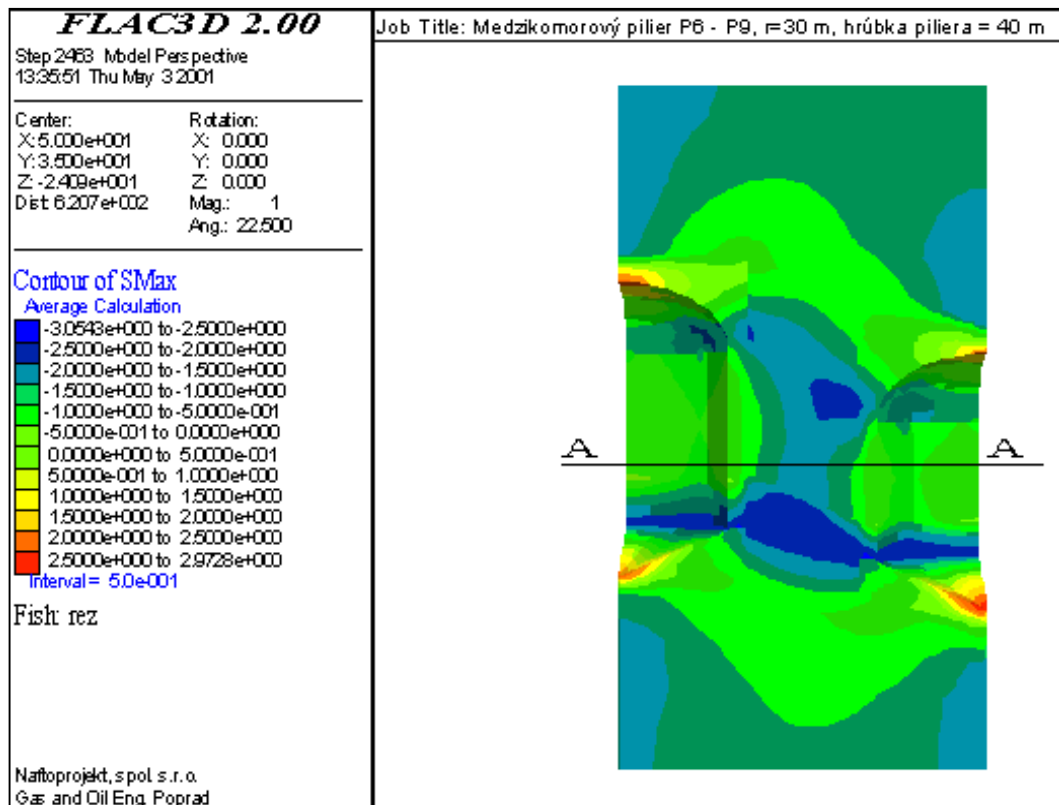
Obr. 3. σ_1 – Variant 1.

Fig. 3. σ_1 – Variant 1.



Obr. 4. σ_1 – Variant 2.

Fig. 4. σ_1 – Variant 2.



Obr. 5. σ_1 – Variant 3.

Fig. 5. σ_1 – Variant 3.

Zo získaných výstupov máme možnosť vidieť pokles napätí v okolí podzemného diela. K najväčšiemu poklesu dochádza v strope a dne komôr. Pri variante 2 a 3 (hrúbka piliera 40 m a 60 m) je evidentné prepojenie zóny znížených napätí medzi obidvoma komorami. V tejto oblasti dochádza k poklesu napätí na 0,5 MPa. Pri variante 1 nedochádza k skladaniu napätí medzi jednotlivými komorami, tieto tu vystupujú ako dva samostatné objekty.

Podľa predpokladu k najväčšiemu vzostupu napätí dochádza v priestore piliera. V pilieri hrúbky 80m je pokles napätí najmenší, napätia tu dosahujú prevažne 11 MPa. Pilier hrúbky 60 m je namáhaný napätím 10-12 MPa významná časť (asi 80 %) je však pod napätím 12-14 MPa. Najviac namáhaný je pilier hrúbky 40 m, v ktorom je napätie 12-14 MPa.

Minimálne hlavné napätia: vo variante 1 a 2 v strednej časti piliera ostáva zóna napätí približne na úrovni primárnych napätí. Vo variante 3 táto zóna chýba, k poklesu napätí dochádza v celej ploche piliera.

Maximálne hlavné napätia dosahujú vo variante 1: 12 MPa, variante 2: 12,5 MPa a vo variante 3: 14 MPa. Vidíme teda, že pri prechode hrúbky piliera 40 na 60 m dochádza k významnému poklesu napätí, tak pri prechode zo 60 na 80 m rozdiel je zanedbateľný.

Výsledky analýzy hlavných napätí možno zhrnúť nasledovne: Napätie ani pri jednom variante neprekročilo pevnosť horniny (halitu) v prostom tlaku. Musíme si však uvedomiť, že pevnosť meraná na vzorkách horniny je vyššia než pevnosť väčších blokov horninového masívu (Hatala, Trančík 1987). Nezanedbateľným faktorom je aj znečistenie soli syngeneticou ílovitou prímiesou. Íl má výrazne nižšiu pevnosť v prostom tlaku. Z toho vyplýva, že sa v pilieri najmä v okrajových častiach vytvoria šmykové trhliny, ktoré môžu spôsobiť komunikáciu tekutín medzi komorami.

Šmykové napätia pôsobiace vo vertikálnych rovinách τ_{xz} a τ_{yz} takmer v celom priestore nadobúdajú hodnotu 0 MPa. Výnimkou sú miesta v klenbe a kuželi komôr. V týchto miestach stúpa šmykové napätie na hodnotu cca 5,5 MPa. Zvýšenie šmykového napätia v týchto miestach je spôsobené prenosom tlaku nadložia nad komorou do priestoru piliera. V spodnej časti prebieha opačný proces. Napätia τ_{xz} a τ_{yz} sú vlastne priemetom maximálnych šmykových napätí. Podobne ako u horizontálnych šmykových napätí aj v tomto prípade je väčšia časť objemu namáhaná napätím 0 MPa. K vzostupu dochádza na stenách komôr a to na hodnotu 1,39 resp 1,46 MPa (nižšia komora vrtu P-9 je namáhaná menej).

Pri porovnaní hodnôt šmykového napätia s pevnosťou hornín v prostom strihu vidíme, že hodnota napätia neprekračuje pevnosť v prostom strihu. Teda podľa teórie maximálnych šmykových napätí (Hatala, 1987) nedochádza k medznému stavu.

Deformácie boli pozorované absolútnym posunutím uzlov modelu v karteziánskom systéme 0xyz. Deformácie boli vypočítané vzhľadom na reologické vlastnosti horniny po 1 roku od vylúhovania komory vrtu P-6. Maximálne posunutie vzniká v strope a dne komôr. V strope je to pokles do 40 cm, na dne vzostup o 24 cm. Amplitúda posunutia tu dosahuje hodnotu 3 cm. Z analýzy deformácií vyplýva, že v žiadnom mieste komôr nedochádza k takým deformáciám, ktoré by významne menili tvar komôr alebo medzikomorového piliera.

Záver

Na základe výsledkov výskumu možno konštatovať:

- sieť lúhovacích vrtov v dobývacom priestore Zbudza možno zhustiť, pretože pôvodná hrúbka piliera 80 m je predimenzovaná, zhustovanie je však potrebné urobiť na základe konkrétnych meraní geomechanických vlastností hornín a následnej počítačovej analýzy, napríklad medzikomorový pilier P6 – P9 navrhujeme na 60m,
- veľkosť šmykových napätí neprekračuje veľkosť pevností hornín v prostom strihu, teda tvar komôr je vhodný,
- po vytlačení úžitkového nerastu – kamennej soli možno medzikomorový pilier z hľadiska dlhohodovej deformácie hornín považovať za stabilný. Je teda možné ďalšie využitie vylúhovaných soľných komôr,
- počas prevádzky podzemného diela je nutné vykonávať dlhodobý monitoring. Ten by mal pozostávať najmä z meraní deformácií na povrchu – vznik poklesovej kotliny. Projekt monitoringu bude súčasťou projektu podzemného diela.

Literatúra - References

- Hatala, J., Trančík, P.: Mechanika hornín a masívu. ALFA, Bratislava, 1987.
 ITASCA CONSULTING GROUP, INC.: Uživatelský popis systému FLAC3D, USA 1997.
 Ďurove, J., Formender, I., Maras, M., Vavrek, P.: Fyzikálno-mechanické vlastnosti hornín z vrtu P-7 v dobývacom priestore Zbudza. KDLaG, F BERG, TU Košice, 1997.

- Kasprzyk, W.: Badania laboratoryjne - Wytrzymałość doraźna i własności reologiczne soli z rdzenia otworu P-7 Zbudza. *Chemkop Krakow, marec 1998*.
- Đurove, J.: Fyzikálne modelovanie sekundárnych napätí v okolí banských diel. *Banické listy, 92-110, 1990*.
- Kožešník, J.: Teórie podobnosti a modelování. *Academia Praha, 1983*.
- Martiner, J., D.: Energy programs. A contribution to salt dome knowledge. In *Proceedings of 6-th. International symposium on salt. The salt institute, Virginia, vol 2, pp 235-245*.
- Veil, J., A.: New information on disposal of oil field wastes in salt caverns. *Argonne National Laboratory, Washington DC, 1996. Presented at 1996 Ground Water Protection Annual Forum St. Paul, MN, USA*.
- Maras, M., Vavrek, P., Đurove, J., Daňko, J.: Stabilné riešenie podzemných zásobníkov ropy Zbudza. *Závěrečná správa výskumnej úlohy pre Solivary, a.s., Prešov. F BERG, TU Košice, marec 2000*.