MODELOVÁNÍ NAPĚŤO-DEFORMAČNÍHO STAVU ŠTOLY V DOLE JERONÝM MODELLING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE GALLERY IN THE JERONÝM MINE

Eva Hrubešová¹

Abstrakt

V příspěvku jsou prezentovány výsledky numerické analýzy změn napěťo-deformačního stavu v důsledku plánované ražby spojovací štoly v prostorách dolu Jeroným. Modelování bylo realizováno s využitím specializovaného geotechnického softwaru Plaxis. Na základě provedených parametrických výpočtů je provedeno kvantitativní i kvalitativní vyhodnocení výsledků modelování (vyhodnocení posunů, čerpání smykové pevnosti, lokalizace plastických bodů). Celkové maximální posuny nad stropem štoly vykazují v závislosti na variantách modelu široké rozmezí hodnot (od několika milimetrů až k desítkám centimetrů). Formulované závěry je však třeba posuzovat v souvislostech s deklarovanými přijatými předpoklady modelu, které reflektují některé nedostatečné, neúplné a nespolehlivé informace týkající se především lokalizace a tvaru závalových prostor zjištěných v trase štoly a charakteru jejich výplně.

Abstract

The paper presents the results of numerical analysis of changes of stress-strain state induced by the excavation of connection gallery in the mine Jeroným. Modelling was carried out using specialized geotechnical software Plaxis. Based on the parametric calculations are carried out quantitative and qualitative evaluation of modelling results (evaluation of the displacements, consumption of the shear strength of the rock mass, localization of plastic points). The total maximum displacements of the gallery roof show, depending on the model assumptions, a wide range of values (from several millimetres to tens of centimetres). However, results should be considered in connection with the declared adopted model assumptions, which reflect some of the poor, incomplete and unreliable information, especially regarding the location and shape of the caverns identified in the gallery route and the character of their fill.

Klíčová slova

Důl Jeroným, napěťo-deformační stav, numerické modelování, metoda konečných prvků, Plaxis

1 Úvod

Nedílnou součástí objektivního posouzení změn napěťo-deformačního stavu horninového masívu v důsledku zásahu do horninového masívu a provedení rizikové analýzy tohoto zásahu je matematické modelování. Vyhodnocení výsledků matematických modelů může významně přispět k vytvoření představy o vlivu realizace plánovaných stavebních úprav i v lokalitě Dolu Jeroným, umožní kvantitativní i kvalitativní vyhodnocení stavu napětí a deformací v zájmové oblasti, stanovení dosahu vlivu určité stavební úpravy, lokalizaci potenciálně nestabilních oblastí a může přispět ke stanovení odpovídajících varovných stavů. Míra vypovídací schopnosti výsledků matematických modelů je primárně závislá na objektivních vstupních datech modelů. Obvykle se při realizaci geotechnických matematických modelů potýkáme především s otázkou objektivního a spolehlivého získávání informací o lokalizaci jednotlivých geologických těles v geologickém profilu a materiálových vlastnostech horninového prostředí, které mohou být značně variabilní v prostoru i čase. Geometrické informace jsou obvykle známy s vyšší spolehlivostí. V případě modelování oblasti Dolu Jeroným je tvorba spolehlivého matematického modelu komplikována především následujícími faktory (Žůrek et al., 2008):

- Velkou rozsáhlostí komplexu a jeho značnou geometrickou variabilitou znemožňující realizaci prostorového modelu celé oblasti.
- Nespolehlivými a neúplnými geometrickými informacemi o velikosti, tvaru a prostorové lokalizaci jednotlivých součástí komplexu (komor, kaveren apod.).
- Neznámým stupněm zvětrávání žulového masívu v jednotlivých částech důlního komplexu, postupným degradačním procesem horninového prostředí, což neumožňuje spolehlivé stanovení vstupních materiálových charakteristik modelů.
- Horninové prostředí v lokalitě vykazuje diskontinuitní charakter, avšak nejsou k dispozici dostatečné znalosti o charakteru diskontinuit, které jsou potřebné pro tvorbu diskontinuitního numerického modelu (především charakter výplně a povrchu diskontinuit).
- Nedostatečná, popř. žádná znalost materiálů, které se nachází v průzkumem zjištěných závalových kavernách uvnitř žulového masívu.
- Kolísání hladiny podzemní vody v určitých částech komplexu (Kaláb et al., 2008).

Historická dokumentace dolu byla v předchozích obdobích zničena, nově zmapovány byly pouze vybrané nezatopené části dolu. K dispozici jsou tedy pro určité části komplexu výsledky provedeného prostorového laserového skenování, avšak jejich využití pro tvorbu numerického prostorového modelu je dosti náročné a vyžaduje mnohdy z hlediska geometrie modelované oblasti značnou míru improvizace a zjednodušení (některé části jsou pro skenování nedostupné, některé jsou zatopeny vodou), která se pak může větší či menší měrou projevit v nižší vypovídací schopnosti výsledků modelování. Z tohoto hlediska se tedy v této fázi modelové analýzy ukazuje jako objektivnější využití výsledků skenování pro tvorbu rovinných modelů, vycházejících z jednotlivých rovinných řezů.

2 Základní charakteristika a předpoklady numerického modelování

Jak již bylo uvedeno, vzhledem ke značné rozsáhlosti a horizontální i vertikální geometrické variabilitě celé oblasti, není možno realizovat komplexní celkový model dolu, ale jsou postupně realizovány pouze dílčí numerické modely vybraných částí. Volba těchto dílčích částí je provedena jednak s ohledem na předpokládanou důležitost stability těchto částí vzhledem ke stabilitě celé zájmové oblasti a jednak v závislosti na předpokládaných stavebních a rekonstrukčních pracích, které jsou v budoucnu plánovány v souvislosti s úvahami o zpřístupnění této historické památky veřejnosti.

V předchozích obdobích vyhodnocování napěťo-deformačního stavu v oblasti Dolu Jeroným byla provedena rovinná modelová analýza jednotlivých řezů ve dvou komorách – v komoře K2 a následně komoře K1 (Hrubešová a kol., 2010). Obě modelované komory mají značně komplikovanou prostorovou geometrii, nejdelší rozměr komor je 30 m, maximální šířka cca 15 m, výška kolísá v rozmezí cca 2 - 10 m, výška masívu v nadloží komor se pohybuje v rozmezí cca 44 - 51 m. Navíc do komor ústí v různých výškových úrovních několik chodeb. Komora K2 byla modelově analyzována především z toho důvodu, že je jedním z možných míst vyústění plánované propojovací štoly mezi starými a opuštěnými důlními díly. Druhá modelovaná komora K1 se nachází v nejsvrchnější části dolu Jeroným v blízkosti zmíněné plánované propojovací štoly.



Obr. 1 Podélný řez plánovanou spojovací štolou

K modelování byl využit programový systém Plaxis 2D, pracující na základě metody konečných prvků. Výsledky 2D numerické napěťo-deformační a stabilitní analýzy obou zmíněných komor dokumentují dostatečnou stabilitu současného stavu, maximální celkové posuny dosahují hodnot cca 2 mm, což koresponduje s výsledky dosavadního geotechnického monitoringu (Hrubešová et al., 2007, 2010).

V současné fázi modelování je prováděna modelová analýza ražby plánované štoly mezi starými opuštěnými důlními díly. Jedná se o spojovací štolu lichoběžníkového příčného průřezu s plochou světlého průřezu 3,12 m², výška 2,2 m, délka štoly je 90 m, štola je ukloněná s převýšením 11,9 m, výška nadloží cca 42 m. Podélný řez spojovacím překopem (štolou) je uveden na obr. 1.

Předpokládá se, že štola bude vyztužena ocelovými oblouky K24 v kombinaci s ocelovými pažnicemi UNION, počva bude stabilizovaná příčným ocelovým prahem (profil U160 – obr. 2). Numerický model vychází v tomto případě z návrhu tvaru a velikosti spojovací chodby, typu vyztužení, z geologických podmínek ve směru trasy spojovací chodby a v jejím nadloží a z výsledků průzkumu, který odhalil v trase budoucí štoly několik kaveren. Výška těchto kaveren nad stropem budoucí štoly je cca 18 m, oblast, v nichž byly kaverny průzkumem zastiženy má délku cca 45 m (tj. jsou lokalizovány nad polovinou délky trasy štoly)



Obr. 2 Příčný průřez štoly, včetně návrhu vyztužení

a nachází se mimo oblast ústí štoly, přibližně ve středové části trasy štoly. Mimo zastiženou závalovou oblast je štola ražena v žulovém masívu, mocnost žulového tělesa nad stropem štoly je cca 18 m, nad ním se nachází cca 18 m ruly, přípovrchová vrstva mocnosti cca 4 m je tvořena eluviem. Geometrie a dosah kaveren v oblasti boků štoly, popř. pod její počvou, nejsou dosud známy, což znemožňuje tvorbu objektivního numerického modelu. Navíc není spolehlivě specifikován ani jejich materiálový obsah. V části kaveren se pouze předpokládá výplň z jílovito-písčitých sedimentů, které mohou být zvodnělé, v případě zbývajících kaveren nejsou dosud žádné informace o materiálu jejich výplně, ani o rozsahu vyplnění těchto kaveren. Přítomnost těchto kaveren, jejich geometrie, lokalizace vzhledem k trase plánované štoly a charakter jejich výplně je však rozhodující z hlediska chování horninového prostředí v okolí samotné štoly i z hlediska kvantitativního i kvalitativního charakteru deformací a vnitřních sil ve výztuži štoly. Numerický model tedy musel respektovat tato značná omezení z hlediska spolehlivosti geometrických i materiálových vstupních dat závalových prostor a musely být tedy přijaty dosti zásadní předpoklady, které pak v konečném důsledku omezují vypovídací schopnosti modelu a možnosti zobecnění výsledků modelování. Výplňový materiál zavalených prostor byl v modelu uvažován variantně.

Prezentované výsledky modelování lze tedy interpretovat a vyhodnocovat pouze v závislosti na přijatých omezujících předpokladech modelu a nelze je šířeji zobecňovat. Základní předpoklady modelu jsou následující:

- model je realizován jako rovinný, není tedy zohledněno uklonění štoly;
- model předpokládá stav rovinné deformace;
- předpoklad izotropního horninového prostředí;
- předpoklad Mohr-Coulombova konstitutivního modelu chování horninového prostředí (pružně-ideálně plastický model), Mohrova obalová čára pevnosti je charakterizována soudržností a úhlem vnitřního tření;
- horninové prostředí je modelováno za předpokladu kontinuálního přetváření, není zohledněn diskontinuitní charakter prostředí a pohyby po případných predisponovaných diskontinuitách;
- příčný řez předpokládá lokalizaci kaverny pouze nad stropem díla, kaverna má obdélníkový tvar, je umístěna nad stropem štoly symetricky a přesahuje na každé straně bok štoly o 2 m;
- závalový materiál kaverny je uvažován ve třech variantách: varianta s výplní z materiálu jíl písčitý (CS) měkké konzistence, varianta s výplní z materiálu jíl písčitý tuhé konzistence a varianta s výplní z hlinitého štěrku GM;

Geometrie rovinného modelu, včetně lokalizace geologických rozhranní a lokalizace závalového prostoru nad stropem štoly, je uvedena na obr. 3. Materiálové charakteristiky skalních hornin a zemin v geologickém profilu jsou uvedeny v tabulce č. 1. Materiálové charakteristiky žulového masívu byly stanoveny laboratoří Ústavu geoniky AVČR Ostrava, materiálové charakteristiky ruly nebyly laboratorně stanoveny, v této fázi řešení není znám dosah ani stupeň degradace vrstvy ruly. Pro potře-



Obr. 3 Výchozí geometrie numerického modelu

by výpočtu byly tedy uvažovány hodnoty modulu pružnosti a pevnostní parametry ruly o 20 % nižší ve srovnání se žulovým masívem. Materiálové charakteristiky ostatních zeminových vrstev odpovídají směrným normovým charakteristikám. Geometrické a materiálové charakteristiky výztužní konstrukce jsou uvedeny v tabulce č. 2.

	Objemová tíha [kN/m ³]	Modul pružnosti [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Soudržnost [kPa]	Úhel vnitřního tření [°]
Žulový masív	25.8	13 000	0.39	9200	49
Rula	25,8	10 400	0,39	7360	39
Eluvium-MS	18	5	0,35	8	24
CS, konz. měkká	18,5	2,5	0,35	30	0
CS, konz. tuhá	18,5	6	0,35	10	22
GM	19	60	0.3	4	30

Tab. 1 Materiálové charakteristiky horninového prostředí

Tab. 2 Geometrické a materiálové charakteristiky výztužní konstrukce

	Plocha průřezu	Moment setrvačnosti	Moment setrvačnosti	Modul pružnosti materiálu
	[cm²]	Ix [cm ⁴]	Iy [cm⁴]	[MPa]
Profil K24	30,15	372,37	404,49	210 000

3 Vyhodnocení výsledků modelování

Modelové výpočty byly provedeny pro různé varianty výplňového materiálu v závalových prostorách a pro variantní odstup vyztužení díla od jeho vyražení. Vliv odstupu vyztužení byl modelován pomocí koeficientu α; ten určuje, kolik procent celkových posunů proběhlo před instalací výztuže. Čím vyšší hodnota tohoto koeficientu je uvažována (čím vyšší podíl celkových deformací proběhne před instalací výztuže), tím nižší podíl celkových posunů odpovídajících odlehčení masívu po vyražení díla se přenese na výztuž, což má za následek rovněž snížení vnitřních sil ve výztuži. Tento koeficient je standardně součástí výpočetního softwaru Plaxis a umožňuje uživateli zohlednit zmíněné technologické hledisko ražení a vyztužování.

Pro každou ze tří materiálových variant zemin v zavalených prostorách byly vyhodnoceny posuny, napětí, stupeň čerpání smykové pevnosti a rozložení plastických bodů v okolním horninovém prostředí.

Koeficient a	Jíl písčitý – měkká konzistence	Jíl písčitý – tuhá konzistence	Štěrk hlinitý
	maxim. celkový posun [mm]	maxim. celkový posun [mm]	maxim. celkový posun [mm]
0	6	6	4
0,05	19	11	4,5
0,1	42	16	5
0,2	250	26	6
0,3	1010	37	6

Tab. 3 Vyhodnocení výsledků maximálních celkových posunů nad stropem štoly



Obr. 4 Maximální posuny stropu spojovací štoly v závislosti na typu zeminy v kaverně nad štolou a rychlosti vyztužení

Z vyhodnocení maximálních celkových posunů nad stropem štoly (tab. 3, obr. 4) vyplývá, dle předpokladů, výrazná závislost na tuhosti výplňového materiálu v zavalených prostorách nad stropem štoly, a to nejen z hlediska kvantitativního, ale i kvalitativního. Za předpokladu štěrkové výplně dosahují maximální celkové posuny stropu štoly 4 - 6 mm v závislosti na prodlevě mezi vyražením díla a jeho vyztužením, v případě jílovité výplně jsou hodnoty maximálních celkových posunů nad stropem štoly vyšší. Za předpokladu jílovité výplně tuhé konzistence se maximální celkové posuny pohybují v závislosti na koeficientu α v rozmezí 6 - 37 mm, v případě měkké konzistence se však posuny, zejména při delší prodlevě mezi vyražením díla a jeho vyztužením (při vyšším koeficientu α), výrazně zvyšují (pro koeficient α =0,3 dosahují max. hodnoty posunů až 1 m) a, i když model ještě indikoval i při těchto vysokých hodnotách posunů z hlediska únosnosti stabilní stav, z hlediska 2. mezního stavu (stavu použitelnosti) se jedná již o hodnoty nepřípustné. Z hlediska praktické aplikace tedy model poukázal, mimo jiné, na problematiku včasného vyztužení štoly po jejím vyražení, přičemž tento faktor se ukazuje být zcela zásadní v případě jílovitých zemin měkké konzistence.

Na obr. 5 jsou ilustrovány stupně čerpání smykové pevnosti pro koeficient $\alpha = 0,1$ pro jílovité zeminy měkké konzistence. V případě jílovitých zemin měkké konzistence v zavalených kavernách nad stropem štoly dochází k výraznějšímu čerpání smykové pevnosti v částech bezprostředně přiléhajících ke stropu štoly, v případě jílovitých zemin tuhé konzistence a v případě štěrkové výplně kaverny je daná oblast



Obr. 5 Oblast maximálního čerpání smykové pevnosti v okolí štoly (zeminy CS měkké konzistence v závalu)

Obr. 6 Lokalizace plastických bodů nad stropem štoly (zeminy CS měkké konzistence v závalu)

maximálního čerpání smykové pevnosti koncentrována do úzkých lokálních oblastí přechodu mezi stropem a bokem díla a netvoří souvislou oblast nad stropem štoly. V žádné z posuzovaných modelových variant však nedošlo ke ztrátě stability analyzovaného modelu.

Kvalitativně odlišný charakter chování horninového prostředí nad stropem štoly v závislosti na charakteru výplně v závalovém prostoru dokumentuje i rozložení plastických bodů. V případě jílovitých zemin měkké konzistence model indikoval výskyt plastických bodů v přístropní části štoly (obr. 6), přičemž tato oblast plastického přetváření se rozšiřuje v závislosti na prodlevě mezi vyražením štoly a jejím vyztužením. V případě jílovitých zemin tuhé konzistence, případně za předpokladu štěrkové výplně, tyto plastické body nad stropem štoly model neindikoval.

4 Závěr

Dosavadní modelová analýza napěťo-deformačního stavu při ražbě štoly mezi opuštěnými a starými důlními díly vychází z určitých předpokladů, které bylo nutno přijmout vzhledem ke komplexnosti celé modelované úlohy i vzhledem k nespolehlivým, neúplným a mnohdy i neexistujícím informacím o geometrii a materiálových charakteristikách částí modelu. Z pohledu těchto dříve uvedených předpokladů a omezení modelu uvedených v kapitole 2 je třeba tyto výsledky vyhodnocovat a vyvozovat z nich závěry, které v této fázi modelování nemají zcela obecný charakter. Variantní výpočty pro tři různé výplňové materiály v závalových prostorách nad stropem štoly i variantní vyhodnocení modelování v závislosti na odstupu vyztužení díla od jeho ražby ukázaly zásadní vliv těchto dvou zmiňovaných faktorů na deformační i napěťovou situaci jak v horninovém masívu, tak i ve výztuži. Analýza výsledků dokumentuje, dle předpokladu, nepřímou úměru mezi velikostí maximálních posunů nad stropem štoly a modulem pružnosti závalového materiálu. Dále byl potvrzen požadavek na rychlé vyztužení štoly v případě jílovitých zemin měkké konzistence, neboť při nerespektování tohoto faktoru dochází k vývoji velkých posunů, které jsou z hlediska mezního stavu použitelnosti nepřípustné.

Charakter výplně v závalových prostorách se projevuje i ve velikostech vnitřních sil, které jsou závislé na vzájemné spolupráci systému horninové prostředí – výztuž. Významnou roli z hlediska velikosti vnitřních sil a jejich rozložení po obvodu díla má, mimo jiné, i lokalizace závalových prostor v okolí díla. Nesymetrické uložení kaverny vzhledem k plánované trase štoly, existence závalových materiálů na bocích štoly apod. bude mít výrazný kvalitativní i kvantitativní vliv jak na deformační chování konstrukce, tak i na ohybové momenty a normálové síly ve výztuži, bude způsobovat asymetrické namáhání výztužní konstrukce, což může mít výrazný vliv na její únosnost. Důvodem asymetrického zatížení konstrukce může být rovněž tlak vody. Tyto aspekty nejsou zatím modelově v celé šíři analyzovány a tento problém bude vyžadovat vzhledem k neexistující podrobnější dokumentaci závalových prostor další parametrické výpočty.

Vzhledem k velké míře nejistot a omezujících předpokladů, z nichž prezentovaný model vychází, bude nezbytné nadále na základě dalších získaných informací numerický model doplňovat, rozvíjet a zdokonalovat, provádět ověřovací parametrické výpočty a především srovnat výsledky modelování s výsledky geotechnického monitoringu realizovaného během plánované ražby štoly. Výsledky geotechnického monitoringu pak umožní provádět inverzní analýzu, a to nejen vzhledem k materiálovým charakteristikám horninového prostředí, ale i vzhledem ke geometrickým charakteristikám, což přispěje k vytvoření objektivnějších podmínek pro prognózování vývoje stabilitního a napěťo-deformačního stavu v důsledku plánovaných stavebních úprav v této lokalitě.

References

- HRUBEŠOVÁ, E., KALÁB, Z., KOŘÍNEK, R. and ŽŮREK, P.: Geotechnical Monitoring and Mathematical Modelling in Medieval Mine Jeroným (Czech Republic), *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2007, Vol. 31, No. 3, p. 183–190. ISSN 1732–6702.
- HRUBEŠOVÁ, Eva; KALÁB, Zdeněk; LEDNICKÁ, Markéta. The assessment of stability of cavities of medieval Mine Jeroným, In *From Research to Design in European Practice, Proceedings of the XIVth Danube-European conference on Geotechnical Engineering [CD-ROM]*. Bratislava: STU Bratislava, 2010. p. 269–269. ISBN 978–80–227–3279–6.
- KALÁB, Zdeněk, HRUBEŠOVÁ, Eva, KNEJZLÍK, Jaromír, KOŘÍNEK, Robert, KUKUTSCH, Radovan, LEDNICKÁ, Markéta, ŽŮREK, Petr. Mine Water Movement in Shallow Medieval Mine Jeroným (Czech Republic), In *Mine Water and the Environment – Proceedings of the 10th IMWA Congress 2008*. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 2008. p. 19–22. ISBN 978–80–248–1767–5.
- ŽŮREK, P., KOŘÍNEK, R., KALÁB, Z., HRUBEŠOVÁ, E., KNEJZLÍK, J., DANĚK, T., KUKUTSCH, R., MICHALÍK, P., LEDNICKÁ, M. and RAMBOUS-KÝ, Z.: Historical *Mine Jeroným in Čistá (monograph)*, Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava and Institute of Geonics ASCR Ostrava, 2008. 82 pages. ISBN 978–80–248–1757–6.

Summary

In the paper there are presented results of numerical analysis of changes of the stress-strain state of the geological environment resulted from the planned excavation of the connecting gallery situated in the historical mine Jeroným. Numerical calculations were performed using the software PLAXIS and there are based on certain assumptions that have been necessary to accept due to the complexity of the whole mine area and due to the unreliable, incomplete and often nonexistent information about geometry and material characteristics of the individual parts of the model. There were performed parametric calculations for three different filling materials in the caverns, which are located above the gallery, and for the various gap between the excavation and supporting works in the gallery. Model analysis demonstrates indirect correlation between the size of the maximum displacements of the gallery roof and modulus of elasticity of the filling material in the caverns. The obtained results confirm also the urgency of rapid reinforcement of gallery, especially in case of soft consistency clayey soils, as the disregard of this factor leads to the development of large unacceptable displacements (tens of centimetres). Model have not yet analyzed all aspects of changes of the stress-strain behaviour of the geological environment resulted from the excavation of connecting gallery (for example the effect of localization of caverns, the influence of underground water etc.), this problem will require more advanced parametric model calculations.

Figures:

- Fig. 1 Longitudinal section of the planned connecting gallery
- Fig. 2 Cross section of gallery, including the design of reinforcement
- Fig. 3 Input geometry of the numerical model
- Fig. 4 The maximum displacements of the connecting gallery roof, depending on the type of the material filling the caverns and supporting rate
- Fig. 5 The area of maximum consumption of shear strength around the gallery (soft consistency clayey soil in the caverns)

Fig. 6 Localization of plastic points above the roof of the gallery (soft consistency clayey soil in the caverns)

¹ Doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D., VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, L. Podéště 1875, Ostrava – Poruba, email: eva.hrubesova@vsb.cz