

# Vplyv deformačného procesu horninového masívu na únosnosť svorníkovej výstuže

Michal Maras<sup>1</sup> a Juraj Ďurove<sup>1</sup>

## Influence of deformation process of rock massif on the carrying capacity of rock bolts

The paper deals with the activation of rock bolts anchored in the rock massif at the rock bolt termination by the deformation process of the rock mantle of an underground opening of circular cross-section driven in the virgin hydrostatic stress field, i.e. with a centrally symmetrical deformation. From the solution follows that the rock bolt activation by the deformation process of the rock massif depends on the depth of the opening under the surface, modulus of deformation, and Poisson's number of the rock, length, and the building density of rock bolts, as well as on the initial deformation of the opening formed prior to the installing the rock bolts.

**Key words:** rock bolts, deformation, rock massif, underground opening.

## Úvod

Výpočet parametrov svorníkovej výstuže horninového plášťa je možné uskutočniť pomocou analytických riešení, vychádzajúcich z teórií deformačnej charakteristiky masívu (Hatala et al., 1989).

Riešenie aktivácie svorníkovej výstuže zabudovanej s určitým odstupom za čelbou razeného diela, predložené v tomto článku uvažuje s pružným chovaním sa svorníkov i horninového masívu. Využíva všeobecne známy aparát analytických metód riešenia napätovo deformačného stavu v okolí podzemných diel, ako úlohy rovinnej deformácie.

## Výpočet odporu výstuže mechanicky kotvených svorníkov

Predpokladajme kruhový prierez výlomu, razeného v hydrostatickom napätovom poli s hodnotou primárneho napätia  $\sigma$ . Ďalej z dôvodu zjednodušenia riešenia predpokladajme, že svorníková výstuž je budovaná vo vencoch vo vzdialenosti 1 m, čiže na vertikálny jednotkový rez pripadá 1 veniec svorníkovej výstuže. Svorníky sú po obvode výlomu zabudované v pravidelných vzdialenostiach prostredníctvom ohradzujúceho prvku bez podperného účinku. Ohradzujúci prvok zabezpečuje rovnomerné rozloženie radiálneho napätia po obvode výlomu, vyvolaného osovými silami svorníkov, mobilizovanými vlastným aktívnym predpnutím svorníkov pri ich inštalácii, alebo deformačným procesom horninového plášťa podzemného diela. Na obr. 1 sú schematicky zobrazené silové pomery a geometrické parametre vstupujúce do riešenia úlohy.

Ak má každý zabudovaný svorník plniť stabilizačnú funkciu, musí s horninovým masívom deformačne spolupôsobiť bez ohľadu na to, akým spôsobom k aktivácii dochádza.

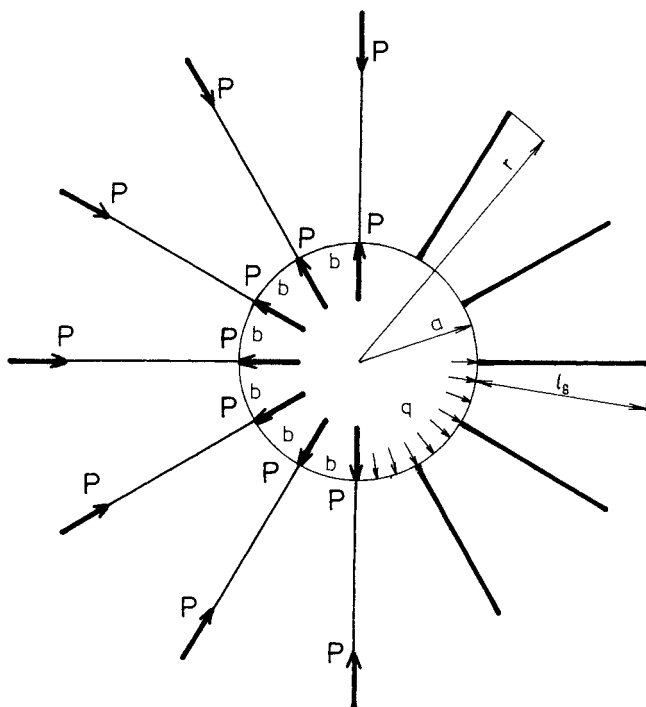
V tomto prípade uvažujeme so svorníkmi, ukotvenými v horninovom masíve kotviacou hlavou a aktivovanými len rozdielom posunutia obvodu výlomu voči kotviacej hlave.

Aktivácia osovej sily v svorníkovej tyči je vyvolaná rozdielom posunutia na obvod výlomu  $u_a$  a posunutia v mieste kotviacej hlavy, ukotvanej vo vzdialenosti  $r$  od osi diela. Predpokladajme, že aktivované osovú silu vo svorníkoch, zabudované cez ohradzujúci prvok, sa na obvode výlomu prejavujú vo forme „reakcie výstuže  $q$ “. Z dôvodu možnosti analytického riešenia úlohy uvažujeme s rovnomerným centrickým odporom  $q$ . Vzájomný vzťah medzi veľkosťou síl  $P$ , aktivovaných vo svorníkoch a odporom  $q$  možno vyjadriť vzťahom (1):

$$q = \frac{nP}{2\pi a} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

<sup>1</sup> Ing. Michal Maras, CSc. a Ing. Juraj Ďurove, CSc., Katedra dobývania ložísk a geotechniky Fakulty BERG Technickej univerzity, 043 84 Košice, Park Komenského 19  
(Recenzovali: Prof. Ing. Jozef Hatala, CSc. a Ing. Viťazoslav Krúpa, CSc. Revidovaná verzia doručená 8.6.1998)

kde  $n$  je počet svorníkov rovnomerne rozložených v prstenci po obvode výlomu.



Obr. 1. Silové pomery a geometrické parametre:  $a$ -polomer kruhového výlomu [m],  $q$ -hodnota radiálneho odporu na obvode výlomu vyvolaná aktiváciou svorníkov cez uvažovaný ohradzujúci prvok [MPa],  $l_s$ -vzdialenosť kotviacej hlavy svorníkov od obvodu výlomu (dĺžka svorníkov) [m],  $b$ -vzdialenosť svorníkov po obvode výlomu (v tomto prípade hustota budovania) [m].

Veľkosť aktivovaných osových síl  $P$  je funkciou rozdielu radiálneho posunutia na kotviacej a upínacej hlave  $\Delta u$ , modulu pružnosti materiálu svorníkovej tyče  $E_s$ , nosného priemeru svorníkovej tyče  $d_s$  a dĺžky svorníka (2):

$$P = E_s \frac{\Delta u}{l_s} \frac{\pi d_s^2}{4}, \quad [\text{MN}], \quad (2)$$

Po dosadení (2) do (1) dostávame vyjadrenie (3):

$$q = \frac{n E_s \Delta u d_s^2}{8 a l_s}, \quad [\text{MPa}]. \quad (3)$$

Z (3) vyplýva, že veľkosť aktivovaných síl  $P$ , a tým aj veľkosť nimi vyvolaného odporu  $q$ , je daná veľkosťou rozdielu posunutí  $\Delta u$ , pričom tak ako to vyplynie z ďalších vzťahov, veľkosť  $q$  spätne ovplyvňuje  $\Delta u$ .

Veľkosť posunutia  $u_a$  na obvode výlomu, ako funkciu  $q$  v tomto zjednodušenom prípade, vyjadruje vzťah:

$$u_a = \frac{a}{2G} (\sigma - q), \quad [\text{m}], \quad (4), \quad \text{kde} \quad G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad [\text{MPa}], \quad (5)$$

v ktorom

$\sigma$  - je hodnota primárneho stavu napätí v uvažovanej hĺbke diela pod povrchom [MPa],

$G$  - modul pružnosti v šmyku hornín v okolí výlomu [MPa],

$E$  - modul pružnosti horniny v tlaku [MPa],

$\mu$  - Poissonovo číslo horniny.

Veľkosť posunutia v mieste ukotvenia svorníka – vo vzdialenosti  $r = a + l_s$  – udáva vzťah (6):

$$u_r = \frac{a^2}{2G(a + l_s)} (\sigma - q), \quad [\text{m}]. \quad (6)$$

V závislosti na odstupe miesta plánovaného zabudovania svorníkov za čelbou, pred ich zabudovaním sa čiastočne posunie obvod výlomu ( $u_{a0}$ ) i miesto ukotvenia svorníka ( $u_{r0}$ ).

Pomer tohto počiatočného posunutia na obvodě výlomu a v mieste ukotvenia udáva vzájomný pomer vzťahov (4) a (6), z ktorého vyplýva:

$$u_{ro} = u_{ao} \frac{a}{a + l_s}, \quad [\text{m}]. \quad (7)$$

Z toho vyplýva, že z danej alebo zvolenej hodnoty  $u_{ao}$  môžeme stanoviť aj  $u_{ro}$ .

Veľkosť rozdielu posunutí  $\Delta u$  obdržíme z rozdielu vzťahov (4) a (6). Po zohľadnení počiatočného posunutia  $u_{ao}$  a  $u_{ro}$  dostávame:

$$\Delta u = \left[ \frac{a}{2G} (\sigma - q) - u_{ao} \right] - \left[ \frac{a^2}{2G(a + l_s)} (\sigma - q) - u_{ro} \right], \quad [\text{m}]. \quad (8)$$

Po dosadení za  $q$ ,  $G$ ,  $u_{ro}$  z vyššie uvedených vzťahov do (8) a po príslušnej úprave získame výsledný vzťah pre stanovenie rozdielu posunutí, ktorým sú aktivované zabudované svorníky v podmienkach vymedzených ostatnými vstupnými údajmi vo vzťahu (8):

$$\Delta u = \left( \frac{a\sigma}{2G} - u_{ao} \right) \frac{16Gax}{16Ga(x+1) + nE_s d_s^2}, \quad [\text{m}], \quad (9)$$

v ktorom je dĺžka svorníkov vyjadrená ako násobok polomeru kruhového výlomu  $l_s = xa$ .

Z vypočítanej hodnoty  $\Delta u$  môžeme využitím vzťahov (2) a (3) stanoviť osovú silu  $P$ , ktorá je vo svorníku aktivovaná rozdielom posunutí, ako aj veľkosť priemernej hodnoty radiálneho odporu  $q$ , vyvolaného aktivovanými silami na obvodě výlomu.

Najskôr je však potrebné vo vzťahu (9) vyjadriť  $u_{ao}$  ako  $k$  násobok celkovej deformácie výlomu, ktorá by vznikla pri nulovom odpore výstuže:

$$u_{ao} = ku = k \frac{a\sigma}{2G}, \quad [\text{m}], \quad (10)$$

Ako aj počet svorníkov zabudovaných po obvodě výlomu:

$$n = \frac{2\pi a}{b}, \quad (11)$$

kde  $b$  je vzdialenosť svorníkov v [m].

Po týchto úpravách a po dosadení (9) do (2) a (3) získame výsledné vzťahy (12) a (13):

$$P = \frac{\pi b E_s \sigma d_s^2 (1 - k)}{8Gb(x+1) + \pi E_s d_s^2}, \quad [\text{MN}], \quad (12)$$

$$q = \frac{\pi E_s \sigma d_s^2 (1 - k)}{8Gb(x+1) + \pi E_s d_s^2}, \quad [\text{MPa}]. \quad (13)$$

## Závery

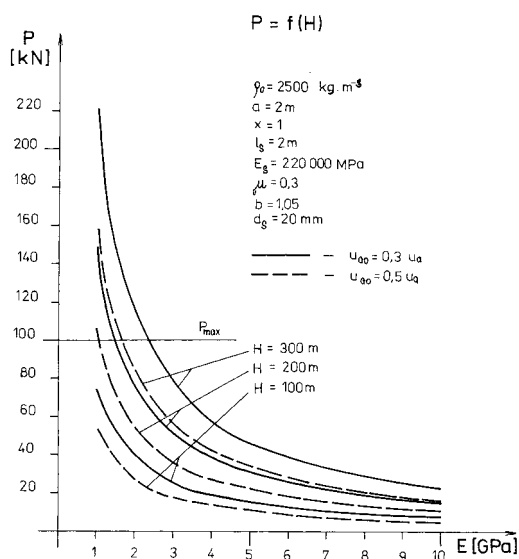
Na základe prezentovaného zjednodušeného analytického riešenia možno vysloviť niektoré pomerne závažné závery pre voľbu konštrukčného typu svorníkovej výstuže a jej parametrov, ako aj pre technológiu jej zabudovania.

Ak niektoré zo vstupných parametrov považujeme za konštantné ( $E_s$ ,  $d_s$ ,  $b$ ), môžeme jednoduchou parametrickou štúdiou overiť mieru vplyvu ostatných vstupných parametrov na veľkosť osových síl  $i$  na veľkosť odporu  $q$  na obvode výlomu, aktivovaných len deformačným procesom horninového masívu.

Graficky je možné názorne ukázať závislosť aktivovaných síl na veľkosti modulu pružnosti horninového masívu pre 3 odlišné hĺbky diela pod povrchom (obr. 2), pre 3 odlišné dĺžky svorníkov (obr. 3) a pre dve podstatne odlišné hustoty budovania svorníkov (obr. 4).

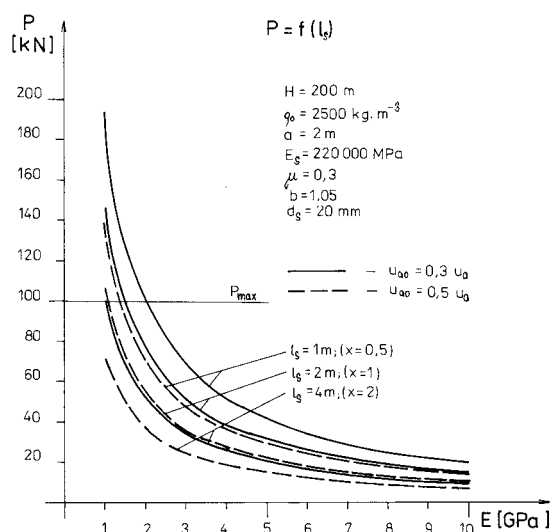
Ak ďalej predpokladáme, že maximálna únosnosť svorníkov je daná maximálnou osovou silou  $P_{max}$ , pri ktorej dochádza k preklzu svorníka na kotviacej hlave (v obr. 2-4 predpokladáme  $P_{max} = 100\text{kN}$ ), a tým aj k podstatnému zníženiu ich stabilizačnej funkcie, môžeme vysloviť tieto závery:

1. Hĺbka diela pod povrchom (obr. 2) má dosť podstatný vplyv hĺbky diela pod povrchom na veľkosť aktivovaných síl  $P$  deformačným procesom horninového plášťa, hlavne pri nižších hodnotách modulu pružnosti horninového masívu. Pri zvolenej dĺžke svorníkov môže dôjsť k preklzu na kotviacej hlave v hĺbke 200 a 300 m aj vtedy, ak sú zabudované pasívne (bez predpnutia) a aj vo väčšej vzdialenosti za čelbou, kde už prebehla značná časť celkovej očakávanej deformácie výlomu (30, resp. 50%). V menšej hĺbke (napr. 100 m) aktivované sily nedosahujú maximálnu únosnosť svorníkov ani pri nízkych hodnotách modulu pružnosti masívu a využitie ich nosnosti vyžaduje ich aktívne predpnutie takou mierou, aby súčet aktívnej predpínacej sily a sily aktivovanej deformačným procesom horninového plášťa nepresiahol ich únosnosť  $P_{max}$ . Z obr. 2 vyplýva, že pri vyšších hodnotách modulu pružnosti masívu aktivácia osových síl deformačným procesom horninového plášťa rapídne klesá a bez ohľadu na miesto zabudovania za čelbou vyžadujú aktívne predpnutie na upínacej hlave bezprostredne po ich inštalácii.
2. Vplyv dĺžky svorníkov na veľkosť osových síl vo svorníkovej výstuži aktivovaných deformačným procesom horninového plášťa v uvedenom analytickom riešení dokladuje obr. 3. S dĺžkou svorníkov sa veľkosť aktivovaných síl podstatne znižuje. Tak napr. pri nízkych hodnotách modulu pružnosti (1 až 2 GPa) u svorníkov s dĺžkou  $l_s = 0,5a$  a  $l_s = a$  hrozí prekĺznutie, svorníky o dĺžke  $l_s = 2a$  už vyžadujú aktívne predpnutie (pri  $u_{ao} = 50\%$ ). Ak vychádzame zo skutočnosti, že vzdialenosť zabudovania svorníkov za postupujúcou čelbou je dosť striktno vymedzená technologickým postupom budovania stabilizačnej výstuže ako celku, čím je zároveň daná aj

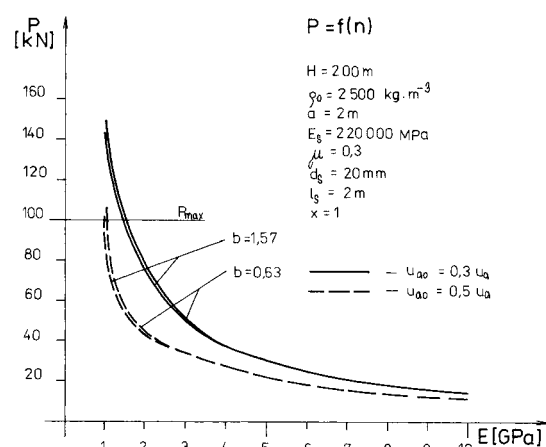


hodnota  $u_{ao}$ , potom jedinou ochranou proti prekĺznutiu svorníka je voľba dostatočnej dĺžky svorníka, vždy však vo vzťahu k veľkosti polomeru výlomu. Dĺžku svorníkov je potrebné voliť vždy tak, aby bolo možné svorník bezprostredne po jeho zabudovaní predpnúť takou predpínacou silou, ktorá v spolupôsobení s ostatnými zabudovanými výstužnými prvkami zabráni porušovaniu hornín na obvode výlomu. Pritom však súčet veľkosti aktívnej sily a sily aktivovanej deformačným procesom horninového plášťa by nemal prekročiť maximálnu únosnosť svorníka, danú silovými pomermi na kotviacej hlave, alebo prierezom a pevnosťou materiálu svorníkovej tyče.

Obr.2. Závislosť únosnosti svorníkov na hĺbke a module pružnosti hornín v okolí výlomu.



Obr.3. Závislosť únosnosti svorníkov na ich dĺžke a module pružnosti hornín v okolí výlomu.



Obr.4. Závislosť únosnosti svorníkov na hustote budovania a module pružnosti hornín v okolí výlomu.

3. Podstatný záver, ktorý vyplýva z tohoto zjednodušeného analytického riešenia, ukazuje obr. 4. Hustota budovania svorníkov, daná vzdialenosťou svorníkov ( $b$ ) po obvodu výlomu, má zanedbateľný vplyv na aktiváciu osových síl deformačným procesom horninového plášťa podzemného diela. I tak veľký rozdiel v hodnote  $b$ , aký zobrazuje obr. 4, sa výraznejšie neprejaví na veľkosti  $P$  v celom modelovanom rozsahu hodnôt modulu pružnosti. Tento nesúlad s poznatkami praxe je možné vysvetliť tým, že v popísanom riešení nie je uvažované so zvýšením modulu pružnosti svorníkmi spevneného masívu, ktorého veľkosť s hustotou budovania svorníkov narastá. Vplyv zvýšenej hodnoty modulu pružnosti na posudzované parametre možno dedukovať z obr. 2, 3 a 4, ktoré sú jeho funkciou. V závere poznamenávame, že hodnotenie aktivácie svorníkov v dielach s iným tvarom prierezu a pri asymetrickom priebehu deformácií popísaným postupom je možné s využitím rôznych metód matematického modelovania.

#### Literatúra

- Hatala, J. & Trančík, P.: Mechanika hornín a masívu. Bratislava, Alfa, 1989, 355 s.  
 Hatala, J. & Maras, M.: Niektoré aspekty spevňujúcej a stabilizačnej funkcie svorníkovej výstuže. In: Zborník prednášok z medzinárodnej vedeckej konferencie konanej pri príležitosti 50. Výročia presťahovania VŠB z Příbrami do Ostravy, sekcia č. 6, Geotechnika a stavitel'stvo, Ostrava, 1995, s.13-19 (dodatok).  
 Maras, M.: Analýza spevňujúcej a stabilizačnej funkcie svorníkovej výstuže. Kandidátska dizertačná práca, TU Košice, F BERG, 1995, . 139 s.

