

VYUŽITIE DEFORMAČNEJ METÓDY PRI NÁVRHU PRIMÁRNEHO OSTENIA TUNELOV

APPLICATION OF THE CONVERGENCE - CONFINEMENT METHOD TO DESIGN OF PRIMARY TUNNEL LINING

Pavol Vavrek ¹

ABSTRAKT

Dimenzovanie primárneho ostenia tunelov sa v súčasnosti realizuje hlavne pomocou rôznych metód matematického modelovania (FEM, FDM, DEM). Jednou z alternatív, ktorá sa dá použiť je aplikácia deformačnej metódy, ktorá bola využívaná hlavne v období nástupu moderného tunelárstva. Zo známeho grafického priebehu deformačnej charakteristiky horninového masívu a deformačnej charakteristiky primárneho ostenia sa stanoví veľkosť zaťaženia výstuže a celková deformácia výlomu tunela. Príspevok sa zameria na popis a praktickú aplikáciu metódy.

ABSTRACT

Dimensioning of tunnel primary lining is currently carried out mainly using a variety of methods of mathematical modeling (FEM, FDM, DEM). One of the alternatives that can be used is the application of a deformation method – convergence confinement method that has been used mainly during the onset of modern tunneling. The convergence confinement method is a two-dimensional, analytical method used in the design of subsurface structures and for the description of ground and system behaviour. Its purpose is to derive the required support measures from the combination of the following values: the ground characteristic curve (GCC), the support characteristic curve (SCC) and longitudinal deformation profiles (LDP). The most important part is the point of intersection, between the ground characteristic curve and the support characteristic curve, where the loading forces of the rock mass and the stabilizing forces of the installed support reaches the point of equilibrium. This article focuses on the description and practical application of this method.

1 Úvod

Pre inžiniersku prax je v súčasnej dobe charakteristická snaha optimalizovať každú konštrukciu a dosiahnuť riešenie, ktoré je nielen technicky dokonalé, ale tiež ekonomicky najvýhodnejšie. Táto snaha vedie k vytváraniu stále dokonalejších matematických modelov inžinierskych konštrukcií. Pre efektívne využívanie týchto modelov má v praxi prvoradý význam numerická metóda použitá pre riešenie. Zavedenie počítačov do inžinierskej praxe umožnilo efektívne aplikovať väčšinu klasických numerických metód a vyvinúť nové metódy. V technickej praxi sa môžeme stretnúť s rôznymi metódami riešenia napät'ovo – deformačného stavu vznikajúceho pri razení podzemných líniových diel. Rozlišujeme tri základné skupiny metód:

¹Ing. Pavol Vavrek, PhD., Fakulta BERG Technickej Univerzity v Košiciach, Park Komenského 19, 040 01 Košice, tel: 055/6022952 e-mail: pavol.vavrek@tuke.sk

Analytické metódy pracujú s funkciami presne definovanými v spojitych oblastiach – kontinuu nezávisle premenných, bez aproximácie – približností, riešia úlohy presne alebo s presne definovanou odchýlkou, užívajú rad funkcií a definícií špeciálnych funkcií rôznymi diferenciálnymi alebo integrálnymi rovnicami, využívajú matematické analýzy, založené na limitách, diferenciáloch a iných exaktne definovaných pojmoch.

Experimentálne metódy spočívajú v odpozorovaní, nameraní potrebných veličín na modeli rôznej mierky a pred rozmachom numerických metód boli jediným prostriedkom k získaniu výsledkov tam, kde sa analytické metódy zrejme nedali použiť pre zložitosť geometrických, statických a fyzikálnych vlastností, ktoré znemožňovali definovať nejaký dostatočne jednoduchý model zvládnuteľný analyticky, ktorý by ale ešte aspoň približne vystihoval skutočnosť. V súčasnej dobe sa javí výrazný posun experimentálnych metód na získanie fyzikálnych vlastností telies za rôznych podmienok a overenie výpočtov v prípadoch veľkej dôležitosti. Najznámejšími zástupcami experimentálnych metód je modelovanie pomocou ekvivalentných materiálov a fotoelasticimetria.

Numerické metódy sa vyznačujú číselným spracovaním všetkých vstupných údajov a aproximáciou všetkých funkcií istými náhradnými funkciami. Vonkajším znakom pre užívateľa je to, že numerická metóda neposkytne „vzorec“ ale číselné výsledky pre jeden konkrétny prípad. Pokiaľ by sa mal získať „vzorec“, čo sa žiada napr. u parametrických štúdií väčšieho súboru variant úlohy je potrebné vyriešiť skupinou príkladov a závislosť výsledkov na menených parametroch aproximovať vhodnou funkciou, napr. polynómom.

Jednou z najviac používaných analytických metód pri návrhu primárnej výstuže banských a podzemných inžinierskych líniových diel je **deformačná metóda** v zahraničí známa pod označením „*convergence-confinement method*“. Jej základy položil v roku 1964 Pacher, začiatkom 21. storočia Carranza-Torres a Fairhurst upravili túto metódu o podmienku medzného stavu podľa Hoek-Brownovho kritéria. O zdokonalenie metódy pre podmienky moderného tunelového staviteľstva, ktoré je založené na skladbe primárneho ostenia zo striekaného betónu a svorníkov s rôznym stupňom armovania sa zaslúžil hlavne Panet so svojimi spolupracovníkmi. Na Fakulte BERG Technickej Univerzity v Košiciach je táto metóda používaná pri riešení problematiky stability dlhých banských diel v podmienkach hnedouhoľného baníctva niekoľko desaťročí zásluhou hlavne prof. J. Hatalu.

Základom riešenia stability líniových podzemných diel deformačnou metódou je zostrojenie:

- deformačnej charakteristiky masívu,
- deformačnej charakteristiky výstuže (ostenia),
- deformačného profilu v pozdĺžnej osi razeného diela.

2 Deformačná charakteristika masívu

Podkladom pre stanovenie zaťaženia výstuže líniových podzemných diel je deformačná charakteristika masívu, ktorá vyjadruje závislosť medzi posunutím horniny a radiálnym odporom výstuže na obryse diela. Z dôvodu zjednodušenia a možnosti zvládnutia odvodenia deformačnej charakteristiky masívu analytickými metódami sa vychádza z týchto predpokladov riešenia:

- kruhový prierez podzemného diela,
- hydrostatické napät'ové pole $\sigma = \sigma_z = \sigma_x = \sigma_y = H \cdot \gamma_o$ (H - hĺbka razeného diela pod povrchom, γ_o – objemová tiaž nadložných hornín).

Postupy výpočtu deformačnej charakteristiky masívu sú väčšinou vypracované pre tieto prípady:

1. v okolí podzemného diela vzniká zóna ideálne plasticky pretvárajúcich sa hornín,
2. v okolí podzemného diela razeného v primárne nesúdržných horninách vzniká zóna nepružných deformácií,

3. v okolí podzemného diela razeného v primárne súdržných horninách vzniká klastická zóna (zóna rozrušených hornín v dôsledku vysokej koncentrácie napätí),
4. v okolí podzemného diela razeného v primárne súdržných horninách vzniká zóna čiastočne porušených hornín.

V príslušnej literatúre (napr. Hatala, J., Trančík, P., 1983) je možné nájsť podrobné odvodenie základných vzťahov používaných pri konštrukcii deformačnej charakteristiky masívu pre rôzne prípady chovania sa horninového masívu.

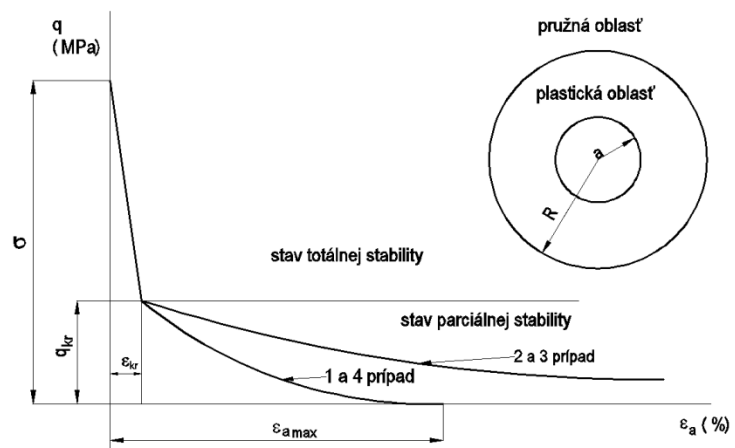
Poznanie priebehu napätí v okolí podzemných diel je len prvým krokom v riešení stability problematiky horizontálnych banských alebo podzemných inžinierskych diel. Je potrebné si uvedomiť, že každá zmena napätového stavu je doprevádzaná jej odpovedajúcou deformáciou. V závislosti na odpore a charaktere výstuže môžu vznikáť dva stavy:

- pri $q \geq q_{kr}$ – stav totálnej stability,
- pri $q \leq q_{kr}$ – stav parciálnej stability,

pričom q je odpor výstuže, q_{kr} – kritická hodnota reakcie výstuže, ε_{kr} – pomerná deformácia posunutia obvodu obrysu diela pri kritickej hodnote reakcie výstuže.

V tzv. podkritických hĺbkach, t.j. v podmienkach kde koncentrácia napätí na obryse diela nedosahuje kritických hodnôt z hľadiska pevnosti hornín a za obrysom diela nevzniká oblasť nepružných deformácií, je vzťah medzi posunutím horniny na obryse diela a odporom výstuže lineárna. Pri $q \leq q_{kr}$ za obvodom výlomu vzniká zóna nepružných deformácií o vonkajšom polomere R . Pomerné posunutie obvodu výlomu v plastickej oblasti ε_{ap} je funkciou odporu výstuže q .

Deformačná charakteristika masívu pre stav parciálnej stability má nelineárny (krivkový) priebeh, pritom môže byť dvojaký (obr. 1). Ako je uvedené pri popise priebehu sekundárnych stavov napätí v 1. a 4. riešenom prípade banské dielo podzemné dielo môže byť stabilné bez výstuže aj v hĺbke väčšej ako kritická. Pri $q = 0$ polomer oblasti nepružných deformácií by nadobudol konečnú – maximálnu deformáciu ε_{amax} .



Obr. 1 Deformačná charakteristika masívu
Fig. 1 Ground characteristic curve

Z toho vyplýva, že deformačná charakteristika masívu pre 1. a 4. riešený prípad má priebeh podľa krivky 1 (obr. 1). V 2. a 3. prípade podzemné dielo nemôže byť stabilné bez výstuže, pri $q = 0$ je $R = \infty$, a preto priebeh deformačnej charakteristiky bude podľa krivky 2.

Hodnota ε_{kr} je maximálnou hodnotou pružnej deformácie výlomu a odpovedá hodnote q_{kr} . Priebeh deformačnej charakteristiky masívu je závislý na veľkosti polomeru rozhrania pružno-plastickej zóny R a pôsobiacim radiálnym napätím na tomto rozhraní $\sigma'_{rp} = q_{kr}$.

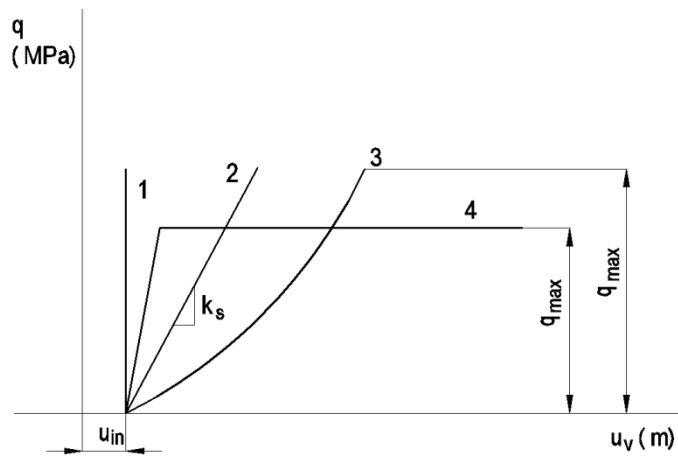
Vidíme, že poznanie priebehu deformačnej charakteristiky horninového masívu v okolí kruhového výlomu už umožňuje stanoviť buď veľkosť deformácie výlomu pri danej hodnote odporu výstuže, alebo požadovaný odpor výstuže pre danú (napr. prípustnú) hodnotu deformácie výlomu.

3 Deformačná charakteristika výstuže

Ako už bolo uvedené, odpor výstuže sa prejavuje až pri jej deformácii vyvolanej deformáciou výlomu, ale aj tiažou rozrušených hornín v stropnej časti výlomu. Závislosť odporu výstuže q na jej pomernej deformácii $\varepsilon_v - q = f(\varepsilon_v)$, alebo deformácie výstuže na jej zaťaženie $\varepsilon_v = f(q)$ nazývame deformačnou charakteristikou výstuže podzemného diela.

Priebeh deformačnej charakteristiky výstuže je funkciou pretvárných vlastností materiálu výstuže a jej hrúbky. Na obr. 2 je zobrazený grafický priebeh deformačných charakteristík týchto druhov výstuže:

- 1 - ideálne tuhá,
- 2 - pružne poddajná,
- 3 - pružne poddajná s poddajnými vložkami na spojoch prvkov tvoriacich prstenec,
- 4 - ideálne poddajná – oceľová s trecími spojmi.



Obr. 2 Deformačné charakteristiky výstuže
Fig. 2 Support characteristic curve

U vystuženého podzemného diela ide o spolupôsobenie minimálne dvoch prvkov s odlišnou deformačnou charakteristikou. Tak ako u masívu aj u výstuže veľkosť odporu výstuže je funkciou jej deformácie. S deformáciou výstuže nedochádza len k zmenšovaniu svetlého prierezu podzemného diela, ale aj k nárastu radiálneho odporu výstuže, ktorým výstuž prispieva k stabilizácii deformačného procesu jej horninového plášťa.

Dôležitou hodnotou deformačnej charakteristiky výstuže je jej koncový bod, teda maximálna hodnota q_{max} – maximálny odpor na medzi únosnosti, ktorý závisí na pevnosti materiálu výstuže a na jej hrúbke. Správanie sa systému masív – výstuž ovplyvňuje aj tuhosť zabudovanej výstuže k_s (obr. 2), ktorá vyjadruje sklon lineárnej časti deformačnej charakteristiky výstuže voči vertikálnej rovine. Pre potreby moderného tunelárstva boli odvodené vzťahy na stanovenie tuhosti a maximálnej únosnosti jednotlivých typov výstužných prvkov používaných pri NRTM (striekané betóny, svorníky, oceľové oblúky) ako aj ich kombinácií, ktoré sú k dispozícii v príslušnej literatúre (napr. Carranza-Torres, Fairhurst, 2000).

Výber najvhodnejšieho typu výstuže závisí na tvare deformačnej charakteristiky masívu, na čase zabudovania výstuže po vytvorení výlomu, za ktorý prebehne časť deformácií do predpolia čelby a za čelbou (u_{in} – obr. 2), na spôsobe zabezpečenia silového kontaktu medzi horninou a výstužou (výstuž predpínaná alebo podperná) a na hrúbke a stlačiteľnosti tretieho prvku v systéme – základky (platí pre banské diela) alebo výplňovej injektáže pri použití prefabrikovanej výstuže.

Inžiniersky správne posúdenie rozsahu vplyvu uvedených faktorov a jeho adekvátne zohľadnenie v riešení je vo väčšine prípadov rozhodujúce pre stanovenie optimálnych požiadaviek na parametre výstuže. Často konštatovaný nesúlad medzi teoreticky stanovenými a v skutočných podmienkach overenými parametrami zaťaženia a deformácie výstuže možno pripísať predovšetkým týmto nedostatkom:

- nesúlad medzi uvažovaným a skutočne existujúcim priebehom primárneho stavu napätí v horninovom masíve,

- väčší rozdiel medzi predpokladanými a skutočnými hodnotami pevnostných a deformačných vlastností horninového masívu,
- žiadne alebo nedostatočne zohľadnenie technologických faktorov budovania výstuže.

4 Deformačný profil v pozdĺžnej osi razeného diela

Predikciou radiálnych deformácií výlomu podzemného diela sa zaoberalo viacero autorov, jedna z najviac používaných teórií je výpočet podľa Paneta, ktorý priebeh radiálnych deformácií v pozdĺžnej osi podzemného diela počíta pomocou súčiniteľa λ a vzdialenosti d budovania primárnej výstuže od čelby razeného diela.

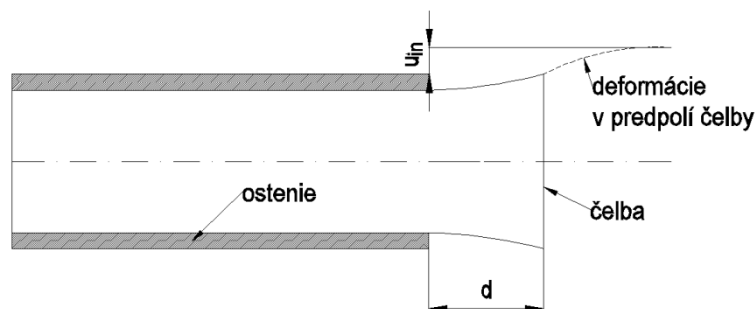
Inicializačné radiálne deformácie u_{in} (obr. 3) sa počítajú podľa vzorca:

$u_{in} = \lambda \cdot u_{el}$ pričom,

$$\lambda = \alpha + (1 - \alpha) \left[1 - \left(\frac{m_o a}{m_o a + d} \right)^2 \right]$$

súčiniteľ $\alpha = 0,25$

súčiniteľ $m_o = 0,75$.



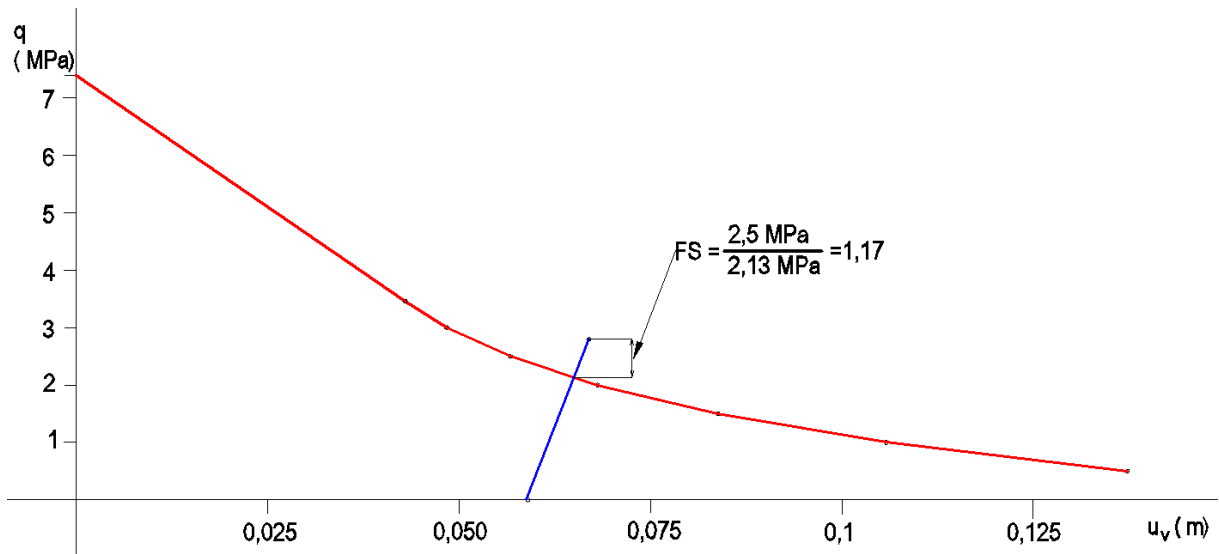
Obr. 3 Definícia u_{in}
Fig. 3 Definition of u_{in}

5 Modelový príklad

Použitie deformačnej metódy na modelovom príklade vychádza z týchto predpokladov:

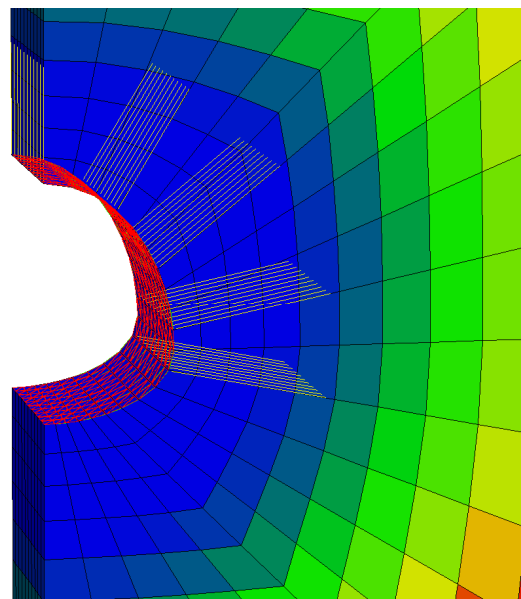
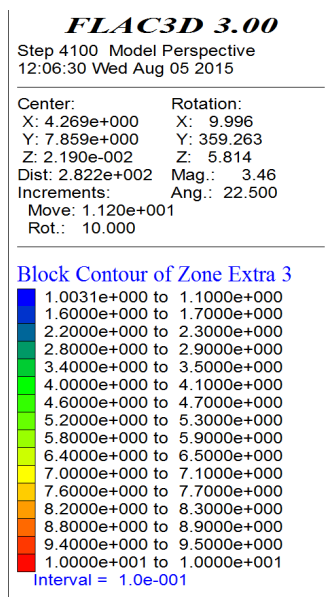
- použitie pružno-plastického modelu,
- vlastnosti horninové prostredia: objemová tiaž nadložných hornín – 26,4 kN.m⁻³, súdržnosť – 1,238 MPa, uhol vnútorného trenia – 22,1°, pevnosť masívu – 40 MPa, modul pružnosti masívu – 750 MPa, Poissonovo číslo – 0,25, polomer razeného diela – 6,5 m, hĺbka pod povrchom – 280 m.
- vlastnosti primárneho ostenia – striekaný betón: tlaková pevnosť – 30 MPa, modul pružnosti – 20 000 MPa, Poissonovo číslo – 0,15, hrúbka – 0,25 cm, oceľové oblúky: modul pružnosti – 207 000 MPa, medza klízu – 295 MPa, svorníky: únosnosť – 250 kN, dĺžka – 6 m, rozostup budovania vo venci – 1,5 m, rozostup svorníkových vencov – 1 m, priemer – 25 mm, modul pružnosti materiálu svorníkovej tyče – 207 000 MPa.
- výpočet LDP – podľa Paneta.

Stupeň bezpečnosti systému masív – primárna výstuž tunela pre vyššie uvedené vstupy, ktorý je vypočítaný ako podiel maximálneho odporu použitej kombinovanej výstuže na medzi únosnosti a odporu výstuže pri rovnovážnom stave je $FS = 1,3$ (obr. 4).



Obr. 4 Výpočet modelového príkladu deformačnou metódou
Fig. 4 Example calculation with convergence – confinement method

Pre porovnanie bol modelový príklad riešiaci systém hornina – výstuž deformačnou metódou posúdený aj matematickým modelom, ktorý vychádzal z tých istých predpokladov. Z výsledkov matematického modelu je uvádzaný výstup vo forme stupňa bezpečnosti jednotlivých zón ktorých sa priestorový model skladá (obr. 5). Stupne bezpečnosti v modeli boli vypočítané pomocou Mohr – Coulombovej podmienky medzného stavu. Najnižší stupeň bezpečnosti zón modelu je na úrovni $FoS = 1$, čo je v porovnaní s deformačnou metódou nižšia hodnota o cca 17 %.



Obr. 5 Stupne bezpečnosti zón v modeli
Fig. 5 Factor of safety in model zone

Najnepriaznivejšie hodnoty stupňa bezpečnosti sa nachádzajú na obvode výlomu, smerom od výlomu do masívu ich hodnoty postupne narastajú. Na obr. 5 sú vykreslené aj implementované štruktúrne prvky (svorníky, nosníky a striekaný betón), ktoré boli v modeli použité.

6 Záver

Deformačná metóda aj napriek určitým zjednodušeniami sa používa aj v súčasnosti hlavne pri predbežných návrhoch primárnych ostení tunelov na báze striekaného betónu. Jej výhodou je rýchlosť, čo sa dá využiť pri prvotných návrhoch – „nástreloch“ ostení pre variabilné výstužné schémy s možnosťou realizácie širokej škály parametrických štúdií pre premenné (hlavne vlastnosti masívu), ktorých hodnoty nie sú úplne spoľahlivé.

7 Zoznam použitej literatúry

C. Carranza – Torres, Fairhurst,C.: Application of the Convergence_Confinement Method of Tunnel Design to Rock Mases That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No.2, 2000.

Hatala,J., Trančík, P.: Mechanika hornín a masívu. Alfa Bratislava, 1983.

Panet, M. et. al.: Recommendations on The Convergence – Confinement Method. AFTES, 2001.

Príspevok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV (VEGA), č. projektu 1/0295/2014.