

PROSTOROVÝ ZEMNÍ TLAK NA KRUHOVÉ ŠACHTY

SPATIAL EARTH PRESSURE ACTING ON CIRCULAR SHAFT

Michal Sedláček¹

ABSTRAKT

Příspěvek je zaměřen na problematiku prostorového zemního tlaku, který působí na kruhové šachty. Prostorový zemní tlak nenarůstá lineárně s hloubkou, neboť zde dochází ke vzniku horizontálního klenbového efektu. Tato skutečnost má za následek výrazné snížení horizontální složky zemního tlaku. Podobné snížení intenzity vodorovné složky zemního tlaku podle se běžně používá při návrhu podzemních stěn (teorie Piaskovski-Kowalewski). Ovšem pro kruhové šachty tuto teorii nelze použít z důvodu relativně velkého půdorysného zakřivení konstrukce, při němž je plocha porušení odlišná od teorie Piaskovski-Kowalewski. Pro návrh kruhové šachty je uvažována kuželová smyková plocha, zatímco pro návrh podzemních stěn je uvažován smyková plocha ohraničená stěnou výkopu a parabolickým válcem, který je ve spodní části zkosený.

ABSTRACT

The paper present a method for estimation spatial earth pressure acting on circular shafts, also gives recommendations for safe and economical design.

1 Úvod

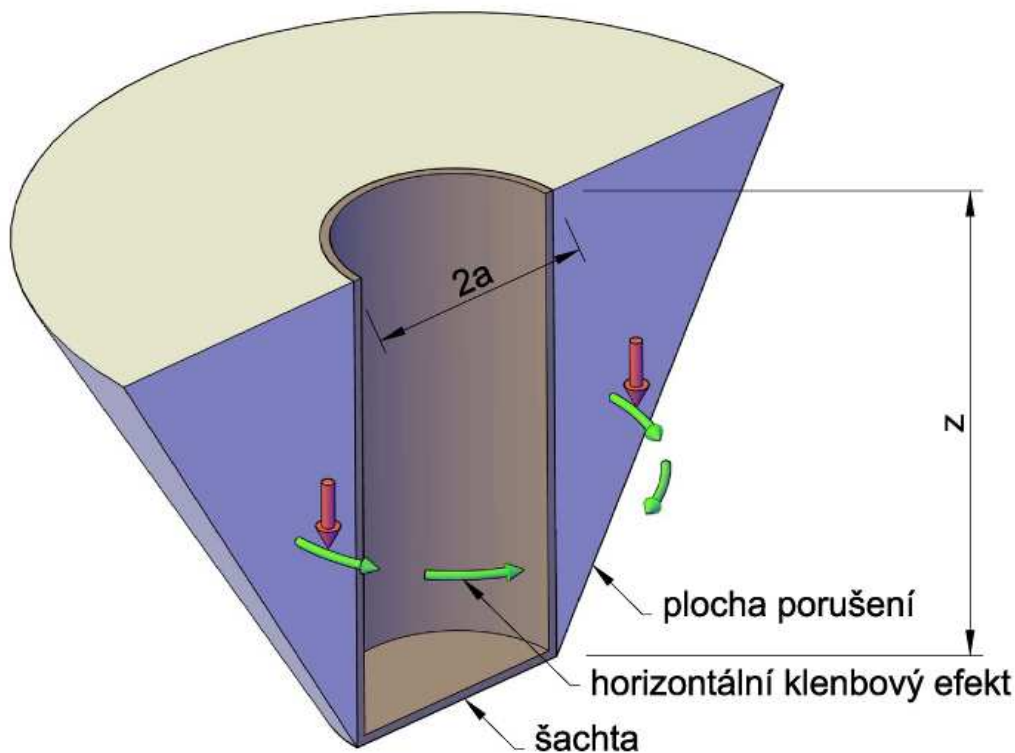
Podzemní šachty tvoří nedílnou součástí podzemního stavitelství. Většinou plní doplňkovou funkci ke stavbě hlavní, nejčastěji se jedná o větrací či únikové šachty pro tunely dopravních staveb nebo šachty sloužící pro potřeby podzemních staveb městské infrastruktury (např. kolektory, kabelové tunely, kanalizace).

Základním předpokladem pro dlouhodobou životnost a provozuschopnost těchto konstrukcí je jejich bezpečný ale současně hospodárný návrh. Toho je však možné docílit pouze v případě dostatečných odborných znalostí a zkušeností z této specifické oblasti podzemního stavitelství. Stěžejním vstupním podkladem pro takovýto návrh šachty je určení zemního tlaku, který na danou konstrukci působí. V případě kruhových šachet se jedná o prostorový zemní tlak, který však není zaveden ani v ČSN 73 0037 Zemní tlak na stavební konstrukce ani v ČSN EN 1997-1 Eurokód 7.

¹Ing. Michal Sedláček, Ph.D., KO-KA s.r.o., Thákurova 7, Praha 6, tel.: 731-412-556, sedlacek@ko-ka.cz

2 Prostorový zemní tlak

Výsledky provedených experimentů (např. [1], [2], [4]) jednoznačně prokázaly, že vodorovná složka zemního tlaku u kruhových šachet nenarůstá lineárně s jejich hloubkou. Tato skutečnost je zapříčiněna vytvořením horizontálního klenbového efektu v zemině (obr. 1). Prostorový zemní tlak na kruhovou šachtu lze tedy definovat jako zemní tlak, který zohledňuje horizontální klenbový efekt zeminy.



Obr. 1 Princip horizontálního klenbového efektu

Fig. 1 Horizontal arching effect

Pokud je hloubka šachty (z) větší než její průměr ($2a$), potom vliv horizontálního klenbového efektu roste a intenzita prostorového zemního tlaku v uvažované hloubce je mnohonásobně menší, než hodnota zemního tlaku vypočtená podle ČSN 73 0037 [3] tzn. bez vlivu horizontálního klenbového efektu.

Pro určení horizontální složky prostorového zemního tlaku má zásadní vliv možnost deformace konstrukce šachty a s tím související zvolená technologie hloubení. Tuhá konstrukce (např. převrtávané piloty) neumožňuje deformaci a proto je vystavena většímu zatížení, než konstrukce poddajná. Naopak poddajná konstrukce (např. stříkaný beton, důlní výztuž) umožní dostatečnou deformaci a je tedy namáhána mnohem nižším zatížením, než konstrukce tuhá.

Pro odpovídající stanovení prostorového zemního tlaku je nutné rozdělit šachty na 3 základní typy: poddajné, tuhé a polotuhé.

2.1 Poddajná konstrukce šachty

Jedním z prvních autorů, který se zabýval problematikou prostorového zemního tlaku na půdorysně zakřivenou konstrukci byl V. G. Berezantzev [6]. V roce 1958 publikoval níže uvedený vztah pro výpočet prostorového zemního tlaku na kruhovou opěrnou zeď.

$$S_{ep,F} = a\gamma \frac{K_a}{\eta-1} \left[1 - \left(\frac{a}{r_b} \right)^{\eta-1} \right] + q \left(\frac{a}{r_b} \right) - \cot g\varphi \left[\left(\frac{a}{r_b} \right)^{\eta} K_a - 1 \right] c$$

$$\eta = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - 1 \quad r_b = 1 + \frac{z}{a} \cdot \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad K_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

a ... poloměr šachty, z ... hloubka šachty, γ ... objemová hmotnost zeminy, c ... soudržnost, φ ... úhel vnitřního tření, q ... přetížení povrchu

Tyto vztahy jsou však podmíněny dostatečnou deformací konstrukce na níž zemní tlak působí. Typickým příkladem poddajné konstrukce je šachta, která je prováděna pomocí stříkaného betonu, nebo důlní výztuže. Při této technologii výstavby dochází nejprve k odtěžení zeminy a následně k instalaci nosného prvku (stříkaný beton, důlní výztuž). Vlivem technologických prostojů (odtěžení zeminy, nástřik betonu či instalace důlní výztuže) dochází k určité časové prodlevě, během níž dojde k přeskupení napětí v zemině v okolí šachty a výsledná intenzita zemního tlaku na vlastní konstrukci šachty bude blízká prostorovému aktivnímu zemnímu tlaku.



Obr. 2 Poddajná konstrukce šachty
Fig. 2 Flexible shaft structure

2.2 Tuhá konstrukce šachty

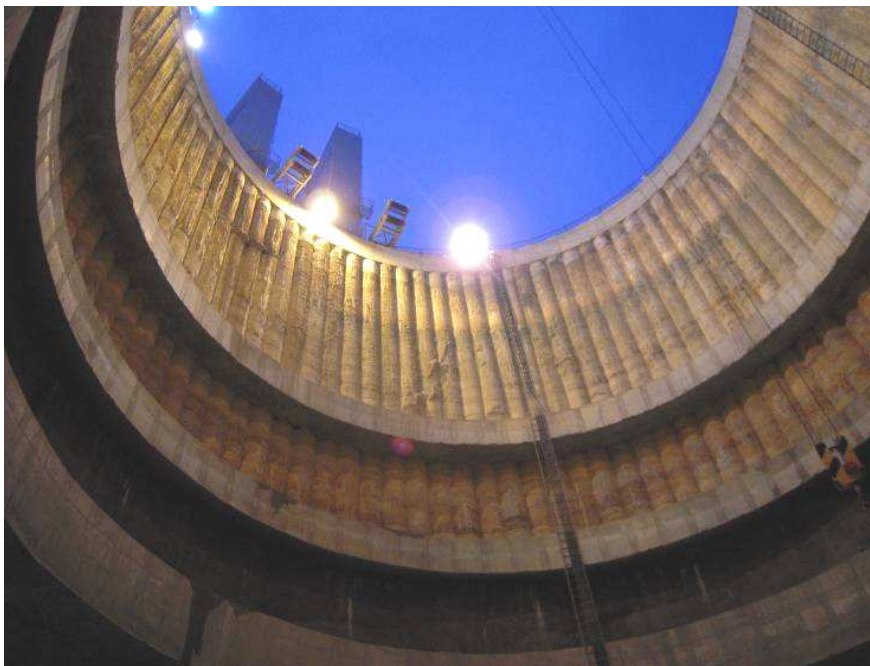
Pro konstrukce, které neumožňují deformaci nejsou vztahy uváděné V. G. Berezantzevem dostatečně výstižné a proto byly modifikovány podle [7] tak, aby reflektovaly chování tuhé konstrukce.

$$S_{ep,R} = r\gamma \frac{\sqrt{K_a}}{\eta-1} \left(1 - \frac{1}{r_b^{\eta-1}} \right) + q \frac{1}{r_b^{\eta}} K_a - \cot g\varphi \left[\frac{1-\lambda+\eta}{\eta} - \frac{\varepsilon}{r_b} K_a \right] c$$

$$\eta = \sin \varphi \quad r_b = 1 + \frac{z}{a} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad \lambda = 1 - \sin \varphi \quad \varepsilon = \sec^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$

r ... poloměr šachty, z ... hloubka šachty, γ ... objemová hmotnost zeminy, c ... soudržnost, φ ... úhel vnitřního tření, q ... přetížení povrchu

Typickým příkladem tuhé konstrukce je šachta, která je prováděna z převrtávaných pilot. Při této technologii výstavby dojde nejprve k vybudování vlastní konstrukce šachty (převrtávané piloty) a teprve potom dochází k odtěžení zeminy. Vlivem tuhosti této konstrukce (minimální deformace) nedojde k přeskupení napětí v zemině v okolí šachty a intenzita zemního tlaku bude odpovídat prostorovému zemnímu tlaku v klidu.



Obr. 3 Tuhá konstrukce šachty
Fig. 3 Rigid shaft structure

2.3 Polotuhá konstrukce šachty

Tyto konstrukce umožňují určitou deformaci, která je ovšem menší než u poddajné šachty. K typickým příkladům polotuhé konstrukce se řadí šachta prováděna z ocelových stětovnic, která je po výšce opatřena převázkami. V tomto případě lze intenzitu prostorového zemního tlaku uvažovat jako aritmetický průměr prostorového zemního tlaku v klidu a prostorového aktivního zemního tlaku.

$$S_{ep,SR} = \frac{S_{ep,F} + S_{ep,R}}{2}$$



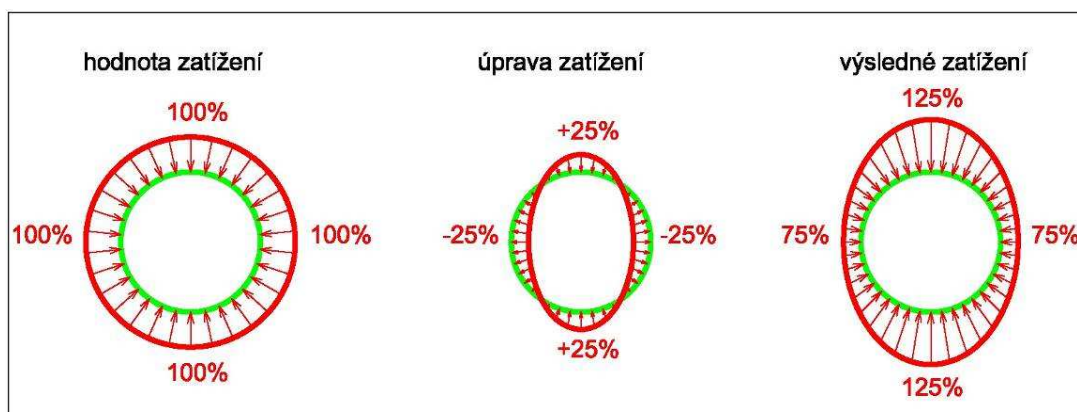
Obr. 4 Polotuhá konstrukce šachty
Fig. 4 Semirigid shaft structure

3 Aplikace zatížení podle EC EN 1990

Prostorový zemní tlak určený v závislosti na interakci statického systému šachta – zemina, lze považovat za charakteristickou hodnotu zatížení (F_k) ve smyslu ČSN EN 1990 [9]. Pokud uvažujeme součinitel kombinace zatížení $\psi = 1,0$, potom dostáváme reprezentativní hodnotu zatížení ve tvaru $F_{rep} = F_k$. Pro určení návrhové hodnoty zatížení F_d je nutné hodnotu F_k vynásobit dílčím součinitelem zatížení γ_f . Zatížení zemním tlakem je zatížení stálé a proto lze v souladu s [9] uvažovat dílčí součinitel stálého zatížení hodnotou $\gamma_G = 1,35$.

Pokud bychom však toto zatížení F_d aplikovali v horizontální rovině jako rovnoměrné, byla by konstrukce šachty namáhána pouze normálovou silou. Tento předpoklad je značně nereálný, např. z důvodu nehomogenity zemního prostředí, proto [5], [8] i [10] doporučuje rozložení zemního tlaku jako radiální zatížení cosinového průběhu s příslušnou úpravou zatížení (obr. 5).

$$F_d = \gamma_G F_k = 1,35 \cdot (S_{ep} + 0,25 \cdot S_{ep} \cdot \cos 2\varphi)$$



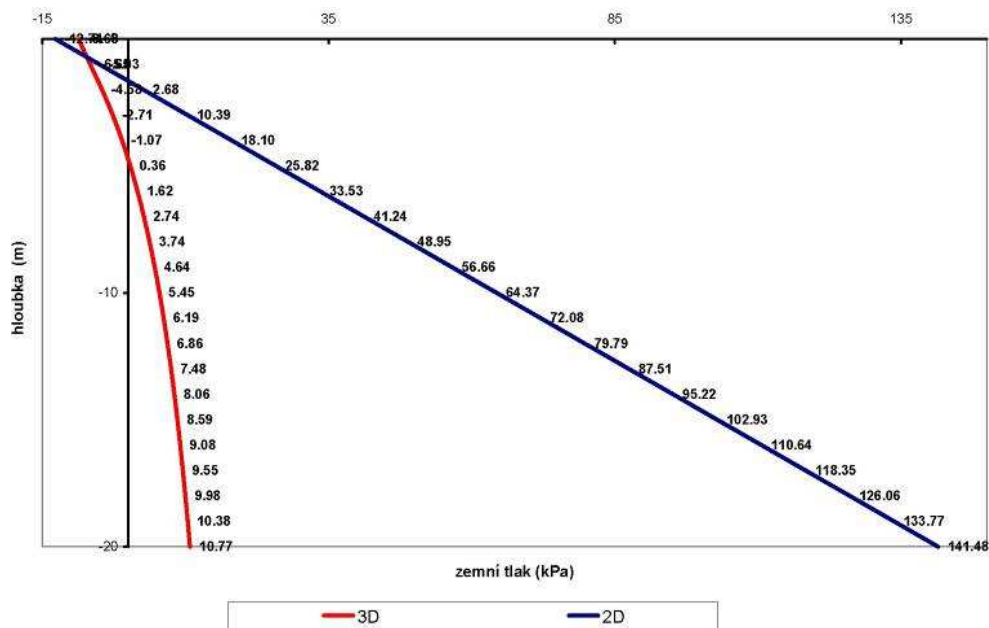
Obr. 5 Redukce radiální složky zemního tlaku
Fig. 5 Modification of uniform load by reduction coefficient

4 Příklady

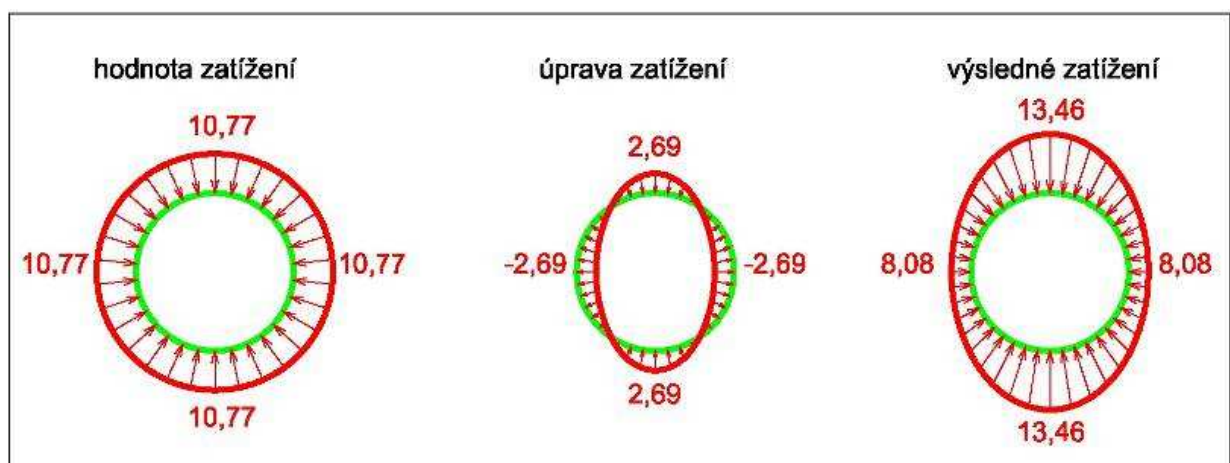
Pro jasnou demonstraci rozdílu mezi prostorovým zemním tlakem (červená křivka) a zemním tlakem určeným podle ČSN 73 0037 [3] (modrá přímka) jsou uvedeny dva číselné příklady:

4.1 Poddajná konstrukce šachty

Jedná se o šachtu hlubokou 20 m, průměr výrubu 4,0 m. Parametry zeminy: $\gamma = 19$ kN/m³, $\phi = 25^\circ$, $c = 10$ kPa. Červená křivka představuje prostorový aktivní zemní tlak, modrá přímka představuje aktivní zemní tlak podle ČSN 73 0037 [3].



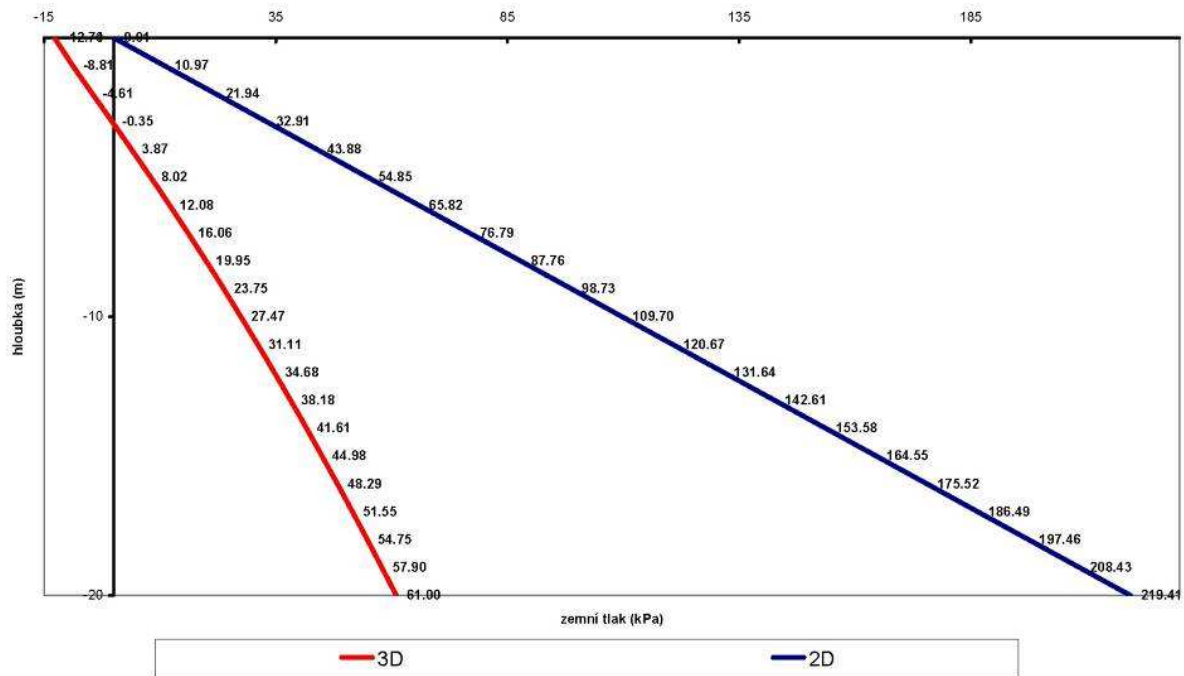
Obr. 6 Horizontální zatížení
Fig. 6 Horizontal load



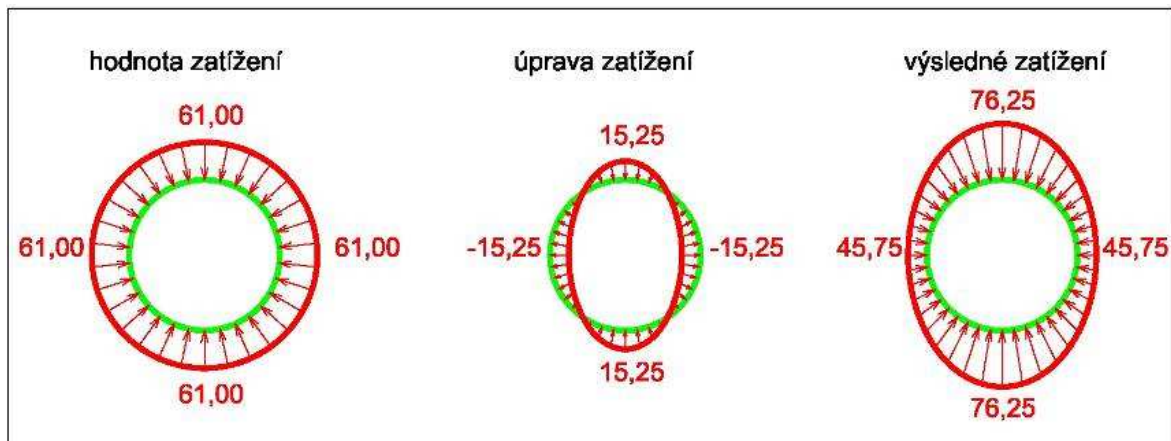
Obr. 7 Redukce radiální složky zemního tlaku
Fig. 7 Modification of uniform load by reduction coefficient

4.2 Tuhá konstrukce šachty

Jedná se o stejnou šachtu jako v příkladu č. 1, tzn. hloubka 20 m, průměr výrubu 4,0 m. Parametry zeminy: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 25^\circ$, $c = 10 \text{ kPa}$. Červená křivka představuje prostorový zemní tlak v klidu, modrá přímka představuje klidový zemní tlak podle ČSN 73 0037 [3].



Obr. 8 Horizontální zatížení
Fig. 8 Horizontal load



Obr. 9 Redukce radiální složky zemního tlaku
Fig. 9 Modification of uniform load by reduction coefficient

5 Závěr

Podzemní stavby jsou pro investory vždy finančně velmi náročné, z tohoto důvodu je žádoucí, aby při jejich návrhu byly zohledněny poznatky a zkušenosti, které mají vliv na snížení ceny díla, při zachování požadované bezpečnosti a provozuschopnosti. Jedním

z takovýchto poznatků je prokázání existence prostorového zemního tlaku, který je zapříčiněn horizontálním klenbovým efektem zemin a lze ho vyjádřit pomocí matematických vztahů.

V uvedeném prvním příkladu je maximální hodnota prostorového zemního tlaku **14 x menší**, v druhém příkladu **3,5 x menší** než při použití zemních tlaků uvedených v ČSN 73 0037 [3]. Takto získané výsledky by v prvním příkladu vedly k subtilnějšímu návrhu konstrukce šachty (menší tloušťka stříkaného betonu), v druhém případě k použití menšího průměru převrtávaných pilot.

Pro rychlejší implementaci výše uvedených poznatků do stavební praxe, byl ve spolupráci s firmou FINE s.r.o. vyvinut software GEO5 – Šachta.

6 Seznam použité literatury

- [1] Walz, B., Pulsfort, M.: *Raumliche Erddruck auf Schachtbauwerke in Abhängigkeit von der Wandverformung*, Bergische Universität Wuppertal, 1999
- [2] Valencia, T. T.: *An experimental study of the earth pressure distribution on cylindrical shafts*, McGill University, Montreal, 2009
- [3] ČSN 73 0037: *Zemní tlak na stavební konstrukce*, 1990
- [4] Tobar, T., Meguid, M.: *Distribution of active earth pressure on vertical shafts*, Geo Halifax, 2009
- [5] Snášelová, K.: *Hloubení a vyztužování jam v extrémních podmínkách*, ODIS VTEI pro uhelný průmysl, 1987
- [6] Berezantzev, V.G: *Earth pressure on the cylindrical retaining walls*, Brussels conference 1958 on Earth pressure problems
- [7] Cheng, Y.M., and Hu, Y.Y. 2005. *Active earth pressure on circular shaft lining obtained by simplified slip line solution with general tangential stress coefficient*. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 27 (1), 110-115.
- [8] Link, H., Lutgendorf, H, Stoss, K.: *Richtlinien zur Berechnung von Schachtauskleidungen in nicht standfestem Gebirge*, 1976
- [9] ČSN EN 1990 Eurokód: *Zásady navrhování konstrukcí*
- [10] Exner, K.: *Hloubení jam*, Vysoká škola báňská v Ostravě, 1986
- [11] Sedláček, M.: *Zatížení kruhových šachet prostorovým zemním tlakem*, konference Zakládání staveb 2014, Brno