

ZATÍŽENÍ KRUHOVÝCH ŠACHET PROSTOROVÝM ZEMNÍM TLAKEM

Ing. Michal Sedláček, Ph.D.

ko-ka s.r.o., Thákurova 7, Praha 6

Spatial earth pressure on circular shaft

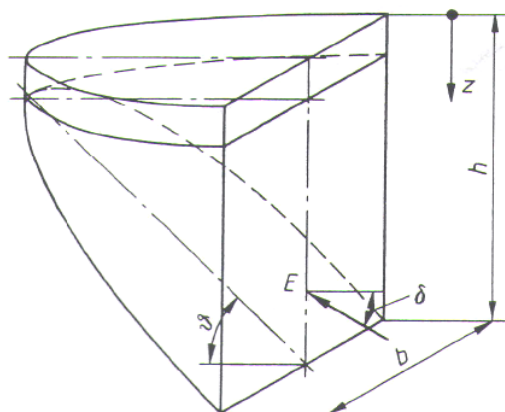
The paper present a method for estimation spatial earth pressure on circular shafts and concurrently safe and economical deisgn.

1. ÚVOD

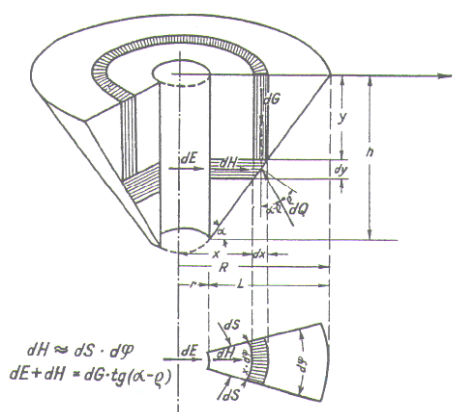
Příspěvek je zaměřen na působení prostorového zemního tlaku na kruhové šachty. Výsledky provedených experimentů, které jsou uvedeny např. v [1], [2], [5] jednoznačně ukazují, že vodorovná složka zemního tlaku nenarůstá lineárně s hloubkou šachty a velikost zemního tlaku je diametrální odlišná od zemních tlaků na půdorysně nezakřivené konstrukce. Tato skutečnost je spojována s vytvořením „klenbového účinku“ zeminy ve vodorovném směru, obdobně jako u horizontálních podzemních děl, kde však klenba vzniká ve svislém směru.

2. PROSTOROVÝ ZEMNÍ TLAK

V odborné literatuře je prostorový zemní tlak řešen např. v ČSN 73 0037 [3]. V této normě se předpokládá porušení tělesa zeminy podle teorie Piaskovski-Kowalewski, při níž je těleso ohraničeno stěnou výkopu a parabolickým válcem, který je ve spodní části zkosený (Obr. 1). Tato teorie je úspěšně používána např. při návrhu podzemních stěn podle DIN 4085 [4].



Obr. 1 Schéma kluzného klínu [4]

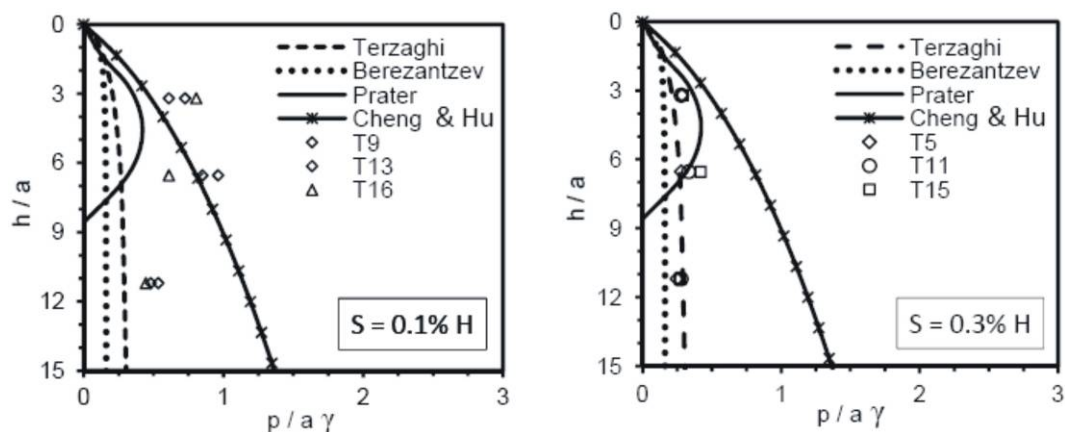


Obr. 2 Kuželová smyková plocha [1]

Pro kruhové šachty však tuto teorii nelze použít z důvodu relativně velkého půdorysného zakřivení konstrukce, při němž je plocha porušení (Obr.2) odlišná od teorie Piaskowski-Kowalewski (Obr.1). Podle ČSN 73 0037 [3] musí být aktivní zemní tlak na půdorysně zakřivenou konstrukci o poloměru zakřivení r , řešen individuálně jako prostorový problém, jestliže výška konstrukce $h > 0,2r$.

Pro určení prostorového zemního tlaku, který působí na kruhovou šachtu má zásadní vliv možnost deformace konstrukce šachty. Tuhá konstrukce neumožňuje deformaci a proto je

vystavena většímu zatížení, než konstrukce poddajná. Naopak poddajná konstrukce umožní dostatečnou deformaci a je tedy namáhána mnohem nižším zatížením, než konstrukce tuhá.



Obr. 3 Velikost prostorového zemního tlaku v závislosti na deformaci konstrukce [5]

2.1 PODDAJNÁ KONSTRUKCE ŠACHTY

Jedním z prvních autorů, který se zabýval problematikou prostorového zemního tlaku na půdorysně zakřivenou konstrukci byl V.G. Berezantzev [7]. V roce 1958 publikoval níže uvedený vztah pro výpočet prostorového zemního tlaku na kruhovou opěrnou zeď.

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

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

Na základě provedených experimentálních měření [1], [2] a [5] bylo zjištěno, že tento vztah je podmíněn dostatečnou deformací konstrukce na niž zemní tlak působí (poddajná konstrukce).

Typickým příkladem poddajné konstrukce je šachta, která je prováděná hornickým způsobem. Při této technologii výstavby dochází nejprve k odtěžení zeminy a následně k instalaci primární výztuže. Vlivem technologických prostožů (odtěžení zeminy, nástřik betonu či instalace důlní výztuže) dochází k určité časové prodlevě, během níž je dojde k přeskupení napětí v zemině v okolí šachty a výsledná intenzita zemního tlaku na konstrukci šachty bude blízká aktivnímu zemnímu tlaku. Je tedy vhodné použít přístup V.G. Berezantseva, neboť jsou splněny požadavky na dostatečnou deformaci konstrukce.

2.2 TUHÁ KONSTRUKCE ŠACHTY

Pro konstrukce, které neumožňují deformaci (tuhé konstrukce) nebyly vztahy uváděné V.G. Berezantzevem dostatečně výstižné a proto byly modifikovány tak, aby reflektovaly chování tuhé konstrukce (Cheng a Hu [8]).

$$P_a = r_0 \gamma \frac{\sqrt{K_a}}{\eta - 1} \left(1 - \frac{1}{r_b^{\eta-1}} \right) + q \frac{1}{r_b^\eta} K_a - \cot g \varphi \left[\frac{1 - \lambda + \eta}{\eta} - \frac{\varepsilon}{r_b} K_a \right] c$$

Typickým příkladem tuhé konstrukce je šachta z převrtávaných pilot. Při této technologii výstavby dojde nejprve k vybudování vlastní konstrukce šachty a teprve potom dochází k odtěžení zeminy. Vlivem tuhé konstrukce (minimální deformace) nedojde k přeskupení napětí v zemině v okolí šachty a intenzita zemního tlaku bude odpovídat zemnímu tlaku v klidu. V tomto případě je tedy vhodné použít vztahy, které odvodily autoři Cheng a Hu.



Obr. 4 Poddajná konstrukce šachty



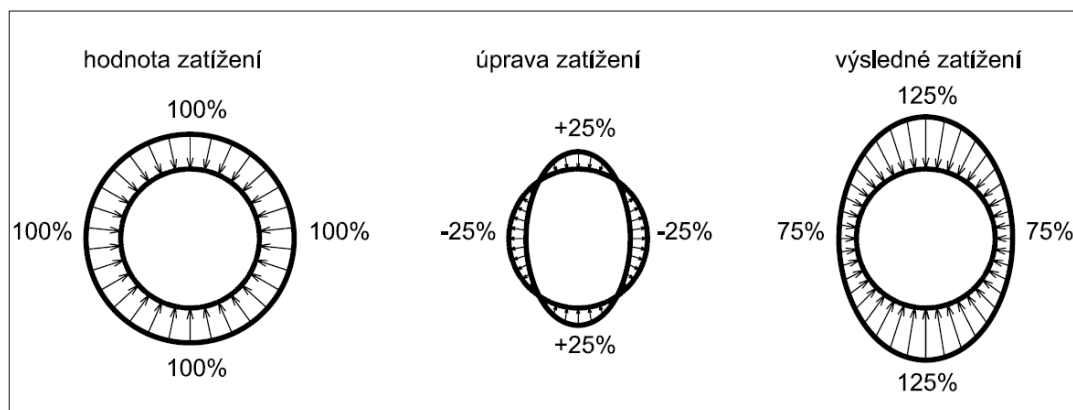
Obr. 5 Tuhá konstrukce šachty [12]

3. APLIKACE ZATÍŽENÍ

Zemní tlak určený v závislosti na interakci statického systému šachta – zemina, podle teorií [7] a [8], lze považovat za charakteristickou hodnotu zatížení (F_k) ve smyslu ČSN EN 1990 [10]. Pokud uvažujeme součinitel kombinace zatížení $\psi = 1,0$, 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 [10] uvažovat dílčí součinitel stálého zatížení hodnotou $\gamma_G = 1,35$.

Pokud bychom však aplikovali toto zatížení na kruhovou konstrukci šachty jako rovnoměrné, bylo by ostění namáháno pouze normálovou silou. Tento předpoklad je značně nereálný, proto [9] a [11] doporučuje rozložení zemního tlaku jako radiální zatížení cosinového průběhu s příslušnou úpravou zatížení (Obr. 6).

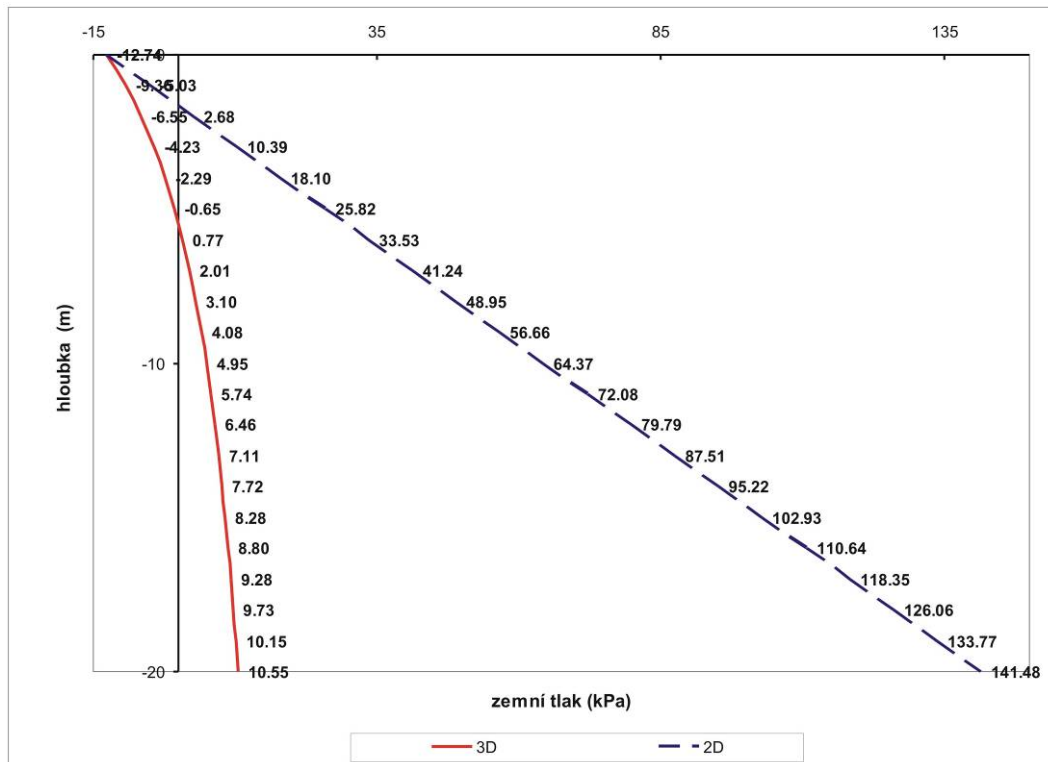
$$F_d = \gamma_G F_k = \gamma_G (P + 0,25P \cos 2\varphi)$$



Obr. 6 Rozložení radiální složky zemního tlaku

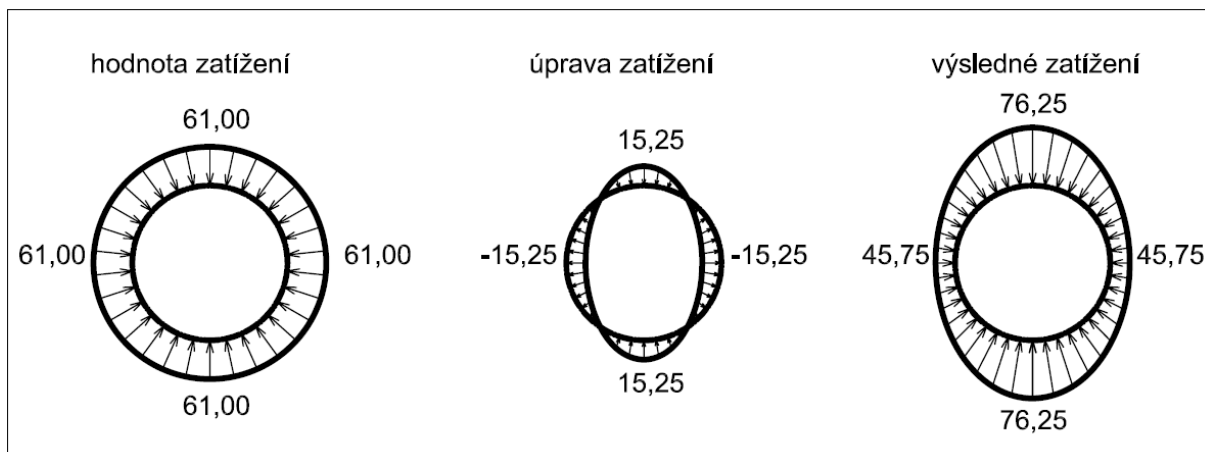
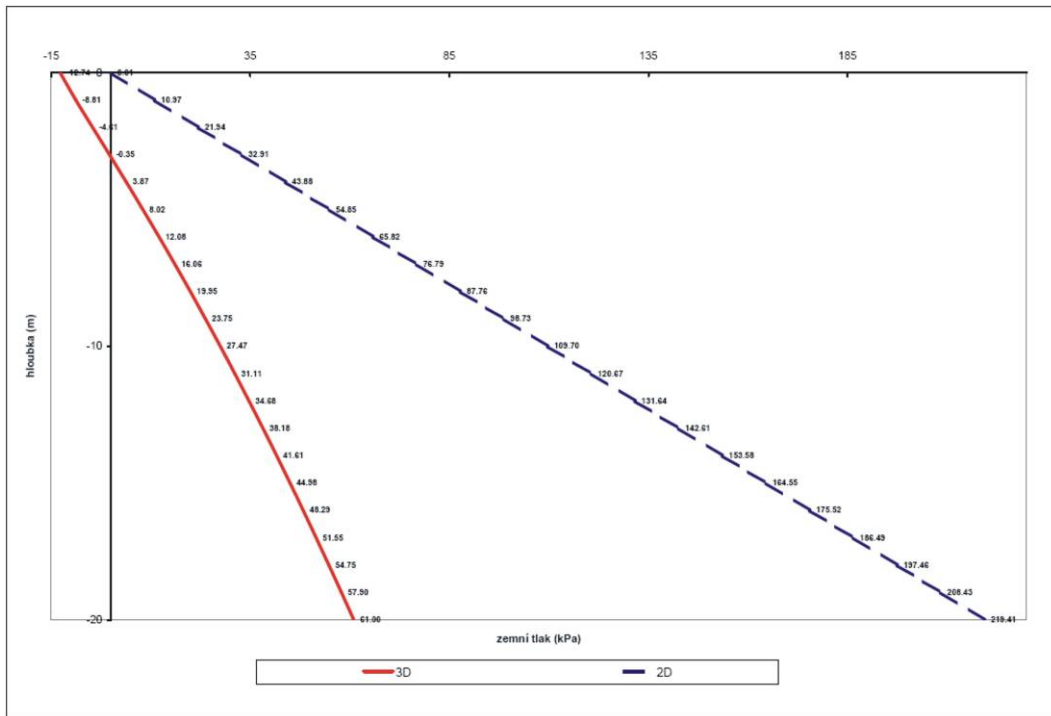
4.1 PŘÍKLAD Č.1 – PODDAJNÁ KONSTRUKCE ŠACHTY

Jedná se o šachtu hlubokou 20m, průměr výrubu 4,0m. Zemina $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 25^\circ$, $c = 10 \text{ kPa}$. Pro srovnání je uveden aktivní zemní tlak vypočtený dle vztahu: $\gamma h K_a - 2c(K_a)^{0,5}$.



4.1 PŘÍKLAD Č.2 – TUHÁ KONSTRUKCE ŠACHTY

Jedná se o stejnou šachtu jako v případě č.1, tzn. hloubka 20m, průměr výrubu 4,0m. Zemina $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 25^\circ$, $c = 10 \text{ kPa}$. Pro srovnání je uveden klidový zemní tlak vypočtený dle vztahu: $\gamma h K_0$.



Obr. 9 Schéma zatížení kruhové šachty v hloubce 20m (kPa)

5 ZÁVĚR

Šachty jsou nedílnou součástí podzemního stavitelství. Výstižné určení zatížení působícího na danou konstrukci by mělo být základním předpokladem pro její bezpečný a současně hospodárný návrh. Prostorový zemní tlak působící na kruhové šachty je diametrálně odlišný od „rovinného“ zemního tlaku. V uvedeném prvním příkladu je maximální hodnota „rovinného“ zemního tlaku zhruba **14 x větší**, než při uvažování působení prostorového zemního tlaku. V druhém uváděném příkladu je hodnota „rovinného“ zemního tlaku přibližně **3,5 x větší**.

Na základě úspěšné spolupráce s firmou FINE s.r.o. byly tyto poznatky z oblasti působení prostorového zemního tlaku na kruhové šachty implementovány do nového programu GEO5 Šachta, který by měl přispět k hospodárnějšímu návrhu a tím ke snížení nákladů na cenu díla.

6. LITERATURA

- [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] DIN 4085: *Berechnung des Erddrucks*, 1987
- [5] Tobar, T., Meguid, M.: *Distribution of active earth pressure on vertical shafts*, Geo Halifax, 2009
- [6] Snášelová, K.: *Hloubení a vyztužování jam v extrémních podmínkách*, ODIS VTEI pro uhelný průmysl, 1987
- [7] Berezantzev, V.G.: *Earth pressure on the cylindrical retaining walls*, Brussels conference 1958 on Earth pressure problems
- [8] 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.
- [9] Link, H., Lutgendorf, H, Stoss, K.: *Richtlinien zur Berechnung von Schachtauskleidungen in nicht standfestem Gebirge*, 1976
- [10] ČSN EN 1990 Eurokód: *Zásady navrhování konstrukcí*
- [11] Exner, K.: *Hloubení jam*, Vysoká škola báňská v Ostravě, 1986
- [12] <http://www.zakladani.cz>
- [13] Dokumentace k programu GEO5 Šachta, FINE s.r.o., 2014

Ing. Michal Sedláček, Ph.D., sedlacek@ko-ka.cz, ko-ka s.r.o., Thákurova 7, Praha 6