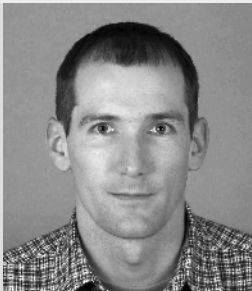


Prostorový zemní tlak na kruhové šachty



Ing. Michal Sedláček, Ph.D.

Vystudoval FSV ČVUT, obor konstrukce a dopravní stavby. V současné době působí jako projektant ve firmě KO-KA s.r.o. Je soudním znalcem pro podzemní stavby, autorizovaným inženýrem pro geotechniku, statiku a dynamiku staveb.
E-mail: sedlacek@ko-ka.cz

Cílem příspěvku je seznámit čtenáře s problematikou bezpečného, ale zároveň hospodárného návrhu specifických podzemních konstrukcí – kruhových šachet.

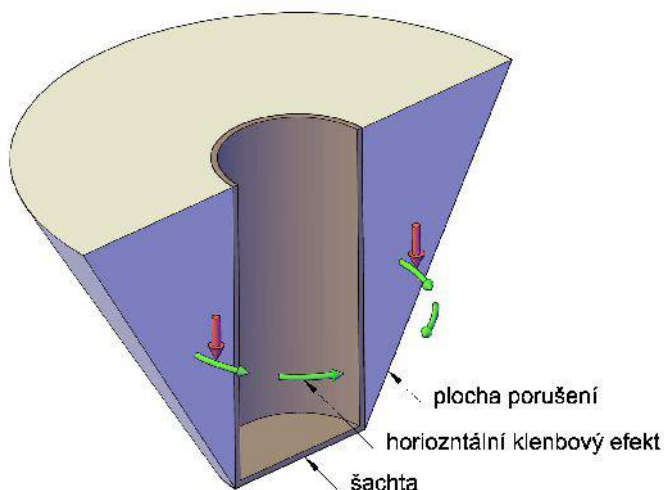
Šachty tvoří nedílnou součást podzemního stavitelství. Jedním z nejčastějších příkladů těchto konstrukcí jsou únikové či větrací šachty pro tunely dopravních staveb nebo šachty sloužící pro potřeby podzemních staveb městské infrastruktury (např. kolektory, kabelové tunely, kanalizace).

Základním předpokladem pro dlouhodobou životnost a provozuschopnost těchto konstrukcí je jejich bezpečný, ale současně hospodárný návrh. Takového návrhu se však dá docílit pouze v případě dostatečných odborných znalostí a zkušeností v této velmi specifické oblasti podzemního stavitelství. Stěžejním vstupním podkladem pro návrh šachty je určení zemního tlaku, který na danou konstrukci skutečně 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.

Prostorový zemní tlak

Výsledky provedených experimentů (např. [1], [2] a [4]) jednoznačně prokázaly, že vodorovná složka zemního tlaku u kruhových šachet nenarůstá lineárně s jejich hloubkou. Tato skutečnost se spojuje zejména s vytvořením horizontálního klenbového efektu v zemině. Na základě výše uvedeného je tedy možné definovat prostorový zemní tlak na kruhovou šachtu jako zemní tlak, který zohledňuje horizontální klenbový efekt zeminy.

▼ Model působení prostorového zemního tlaku na kruhovou šachtu – vytvoření horizontálního klenbového efektu



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

Pro určení prostorového zemního tlaku působícího 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.

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 tento uvedený vztah pro výpočet prostorového zemního tlaku na kruhovou opěrnou zeď:

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

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

Tyto vztahy jsou však podmíněny dostatečnou deformací konstrukce, na níž zemní tlak působí.

Typický příklad poddajné konstrukce představuje šachta prováděná pomocí stříkaného betonu nebo důlní výztuže. Při této technologii výstavby se nejprve odtěží zemina a následně se instaluje nosný prvek (stříkaný beton, důlní výztuž). Vlivem technologických prostojů (odtěžení zeminy, nástřik betonu či instalace důlní výztuže) dochází k určité časové prodlevě, během níž se přeskupí napětí v zemině v okolí šachty a výsledná intenzita zemního tlaku na vlastní konstrukci šachty bude blízká prostorovému aktivnímu zemnímu tlaku.

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:

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

Typickým příkladem tuhé konstrukce je šachta z převrtávaných pilot. Při této technologii výstavby se nejprve vybuduje vlastní konstrukce šachty (převrtávané piloty), a teprve potom odtěží zemina. 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.



▲ Příklad poddajné konstrukce: šachta prováděná pomocí stříkaného betonu nebo důlní výztuže



▲ Příklad tuhé konstrukce: šachta z předvrtávaných pilot

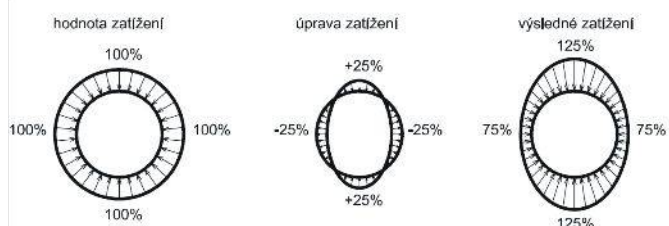


▲ Příklad polotuhé konstrukce: šachta z ocelových štětovic a po výšce je opatřena převážkami (vodorovnými ztužujícími nosníky).

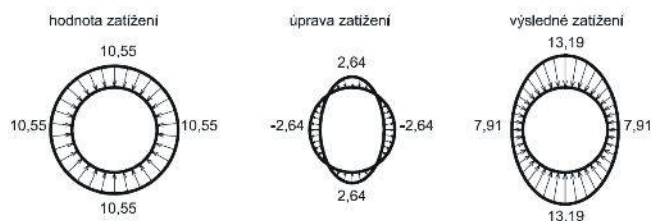
Polotuhá konstrukce šachty

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

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

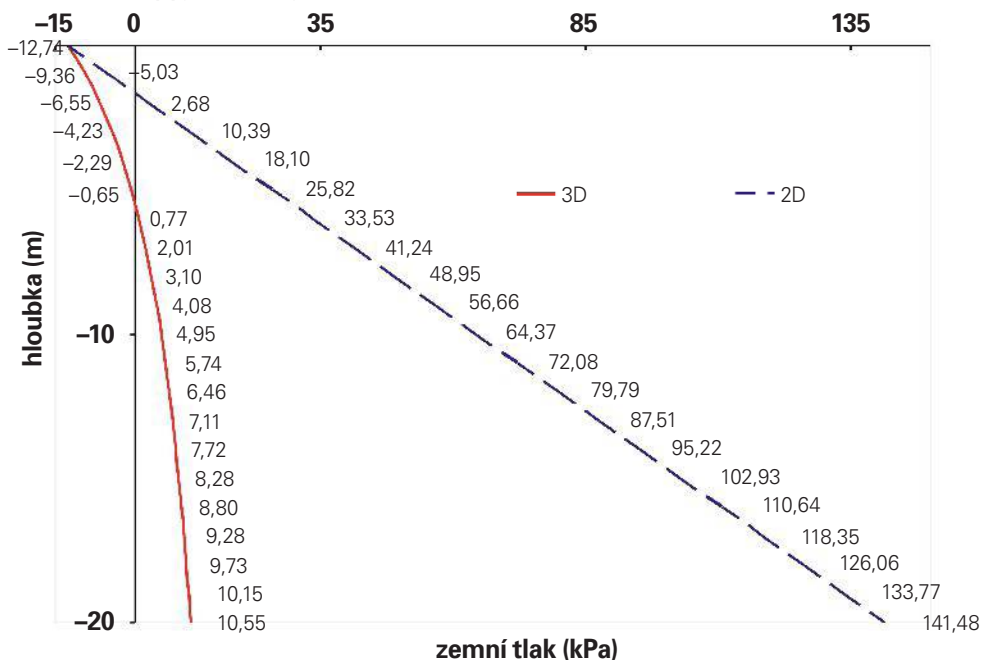


▲ Rozložení radiální složky prostorového zemního tlaku



▲ Schéma zatížení poddajné konstrukce kruhové šachty v hloubce 20 m (kPa)

▼ Výsledné zatížení poddajné konstrukce kruhové šachty. Prostorový zemní tlak (červená křivka), zemní tlak určený podle ČSN 73 0037 [3] (modrá křivka)



Aplikace zatížení

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 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 kosinového průběhu s příslušnou úpravou zatížení:

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

Příklady

Pro jasnou demonstraci rozdílu prostorového zemního tlaku (červená křivka) a zemního tlaku určeného podle ČSN 73 0037 [3] (modrá přímka) jsou uvedeny dva číselné příklady.

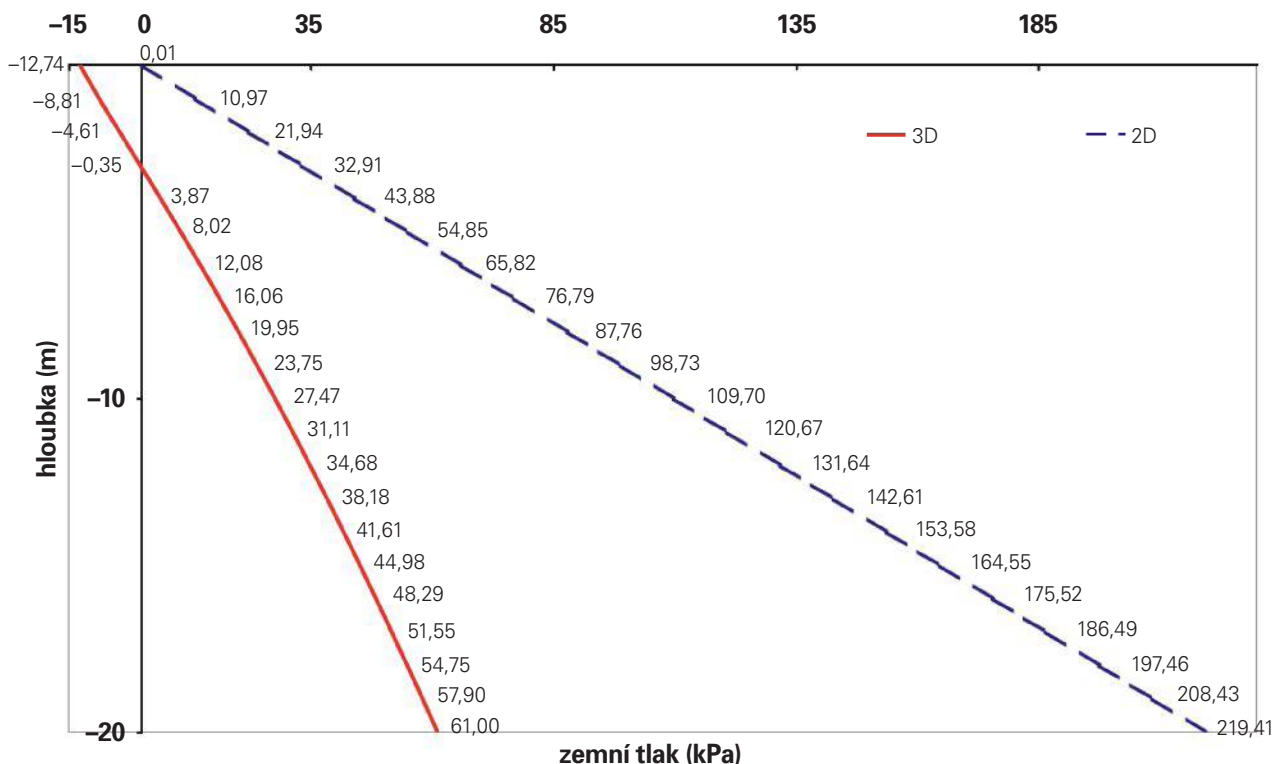
Příklad č. 1 – Poddajná konstrukce šachty

Jedná se o šachtu hlubokou 20 m, s průměrem výrubu 4,0 m. Parametry zeminy: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 25^\circ$, $c = 10 \text{ kPa}$.

Červená křivka představuje prostorový aktivní zemní tlak, modrá přímka pak aktivní zemní tlak podle ČSN 73 0037 [3].

Příklad č. 2 – Tuhá konstrukce šachty

Jedná se o stejnou šachtu jako v příkladu č. 1, tzn. o hloubce 20 m a průměru 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].



▲ Schéma zatížení tuhé konstrukce kruhové šachty v hloubce 20 m (kPa). Prostorový zemní tlak (červená křivka), zemní tlak určený podle ČSN 73 0037 [3] (modrá křivka).

Závěr

Podzemní stavby jsou pro investory vždy finančně velmi náročné, a z tohoto důvodu je žádoucí, aby se již při jejich návrhu zohlednily nejnovější poznatky a zkušenosti z oboru, které budou mít za následek snížení ceny díla, ovšem při zachování požadované bezpečnosti a provozuschopnosti.

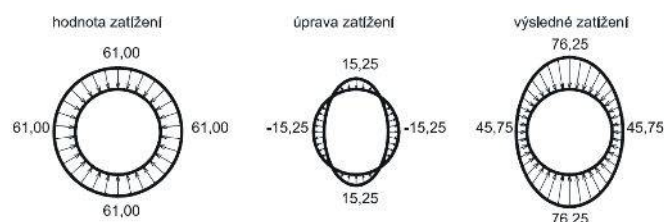
Jedním z takovýchto poznatků je prokázat existenci prostorového zemního tlaku, zapříčiněného horizontálním klenbovým efektem zemin. Lze ho vyjádřit pomocí matematických vztahů.

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].

Pro rychlejší implementaci výše uvedených poznatků do stavební praxe byl vyvinut software GEO5 – Šachta, který by měl přispět k bezpečnému, ale současně i k hospodárnějšímu návrhu kruhových šachet a tím ke snížení nákladů na cenu díla. ■

Použitá literatura:

- [1] Walz, B.; Pulsfort, M.: Raumlische 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.; Hu, Y. Y.: 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, 2005.



▲ Schéma zatížení tuhé konstrukce kruhové šachty v hloubce 20 m (kPa)

- [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 – TU v Ostravě, 1986.
- [11] Sedláček, M.: Zatížení kruhových šachet prostorovým zemním tlakem, konference Zakládání staveb 2014, Brno.

english synopsis

Spatial Earth Pressure Acting on Circular Shaft

The article presents a method for estimation of spatial earth pressure acting on circular shafts, and it also gives recommendations for safe and economical design.

klíčová slova:

kruhové šachty, prostorový zemní tlak

keywords:

circular shaft, spatial earth pressure