

# Příspěvek ke stanovení bezpečné mocnosti nadloží při protlačování ve zvodněném horninovém prostředí

Josef Aldorf<sup>1</sup> a Hynek Lahuta<sup>1</sup>

## A contribution to the determination of the safe overburden thickness at the pipe jacking in a watery soil environment

The article deals with the question of setting up the safe thickness of an overburden for pipe jacking in the watery soil environment.

**Key words:** tunnelling, thrusting, effect by uplift pressure.

### Úvod

Protlačování ocelových nebo betonových trub (štol) ve zvodněném prostředí v blízkosti povrchu, případně pod dnem vodoteče, přináší s sebou řadu problémů, souvisejících s působením vztlačových sil na protlačovanou konstrukci. Spolehlivý návrh minimální mocnosti nadloží je dosud prováděn empiricky nebo poloempiricky, s využitím jednoduchých geotechnických modelů. Autoři příspěvku se problémem zabývali v širším kontextu procesu porušování nadloží protlačované konstrukce s využitím numerického modelování pomocí metody konečných prvků (MKP) a získané výsledky, uváděné v další části příspěvku, dávají možnost srovnání obou přístupů.

### Zjednodušený geotechnický model vlivů vztlaku na protlačovanou konstrukci

Zjednodušený geotechnický přístup, vycházející z predikce vzniku smykových ploch porušení v nadloží protlačované konstrukce, je znázorněn na obr. č. 1. Předpokládá se existence svislých ploch porušení, přičemž obecně platí nerovnice

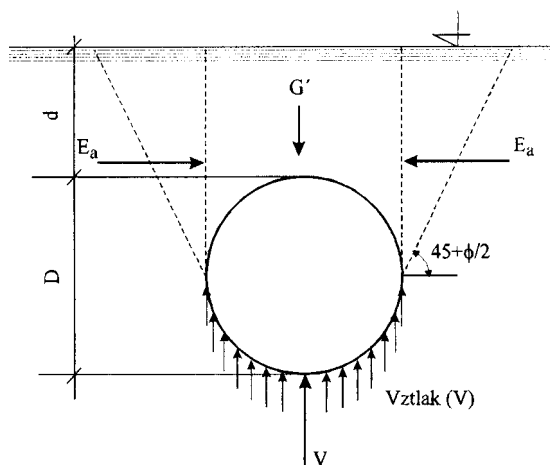
$$V < G' + G_k + P \quad (1)$$

$G'$  - tíha zeminového nadloží nad protlačovanou rourou (s uvažováním vlivu vztlaku na objemovou tíhu zeminy),

$G_k$  - tíha konstrukce

$P$  - pevnost na plochách předpokládaného porušení

$V$  - vztlačová síla na konstrukci



Obr.1. Zjednodušený geotechnický přístup v nadloží protlačované konstrukce.

Zanedbáme-li vliv vlastní tíhy konstrukce (platí především pro tenkostěnné ocelové roury), můžeme vztah (1) (na straně bezpečnosti), formulovat pro základní geotechnické skupiny zemín (nesoudržné, soudržné) rovnicemi:

<sup>1</sup> Prof. Ing. Jozef Aldorf, DrSc. a Ing. Dr. Hynek Lahuta, FAST - Katedra geotechniky a podzemního stavitelství VŠB-TU Ostrava (Recenzovali: Prof. Ing. Jozef Hatala, CSc. a Prof. Ing. Félix Sekula, DrSc. Revidovaná verzia doručená 27.10.1997)

→ nesoudržné zeminy

$$V \leq 2 \cdot E_a \cdot \operatorname{tg} \varphi + D \cdot d \cdot \gamma_{su}$$

d - mocnost nadloží, D - průměr roury,  $\gamma_w$  - objemová tíha vody,  $E_a$  - aktivní zemní tlak,  $\gamma_{su}$  - objemová tíha zeminy pod vodou.

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma_{su} \cdot d^2 \cdot \operatorname{tg}^2(45 - \varphi / 2)$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \gamma_w$$

Po úpravě s aplikací součinitele spolehlivosti  $\gamma_{mp}$

$$d \geq \frac{D \left[ \sqrt{1 + \frac{F \cdot \pi \cdot \gamma_w}{\gamma_{su}}} - 1 \right]}{2F} \cdot \gamma_{mp} \quad (2)$$

$$F = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi / 2) \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

→ soudržné zeminy (pro  $\varphi \rightarrow 0$ )

$$V \leq 2 \cdot d \cdot c_u + D \cdot d \cdot \gamma_{su}$$

$c_u$  - soudržnost zeminy (totální)

Po úpravě a zavedení součinitele spolehlivosti

$$d \geq \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \gamma_w}{8c_u + 4D \cdot \gamma_{su}} \cdot \gamma_{mj} \quad (3)$$

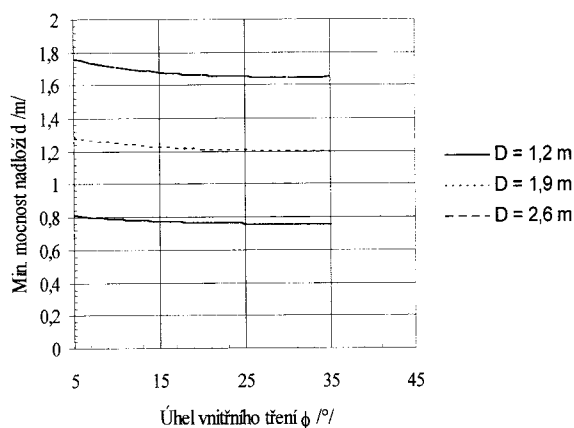
Velikost součinitelů spolehlivosti je možno přijmout ve velikosti

$$\gamma_{mp} = 1,3 - 1,5$$

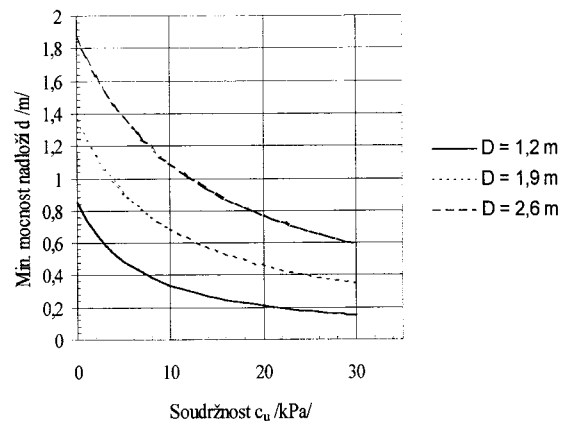
$$\gamma_{mj} = 1,5 - 2$$

s ohledem na spolehlivost stanovení jednotlivých složek pevnosti zeminy.

Grafy závislosti (2) a (3) jsou uvedeny na obr. č. 2 a 3 pro hodnoty  $\gamma_{mp} = \gamma_{mj} = 1$ .



Obr.2. Závislost'  $d/\varphi$  pro nesoudržné zeminy.



Obr.3. Závislost'  $d/c$  pro jílovité zeminy.

## Numerické modelování problému

Analýza napěťodeformačního stavu zemín v nadloží protlačování konstrukce při působení sil vztlaku vody byla realizována na modelech MKP pro průměry trub  $D = 1,2; 1,9$  a  $2,6$  m a pro různé poměry  $d/D$ . S ohledem na složité stavy vznikající při přetváření zemín nad mezí plasticity, na spolehlivost získaných údajů a praktickou nemožnost formulace kritérií pro stanovení „přípustného“ rozsahu oblastí plastického přetváření nebo porušení nadloží, byla přijata kritéria spolehlivosti ve tvaru:

$$\sigma_z^{(p)} \leq 0 \text{ - pro nesoudržné zeminy} \quad (4)$$

$$\sigma_3^{(p)} \leq \sigma_t \text{ - pro soudržné zeminy} \quad (5)$$

kde

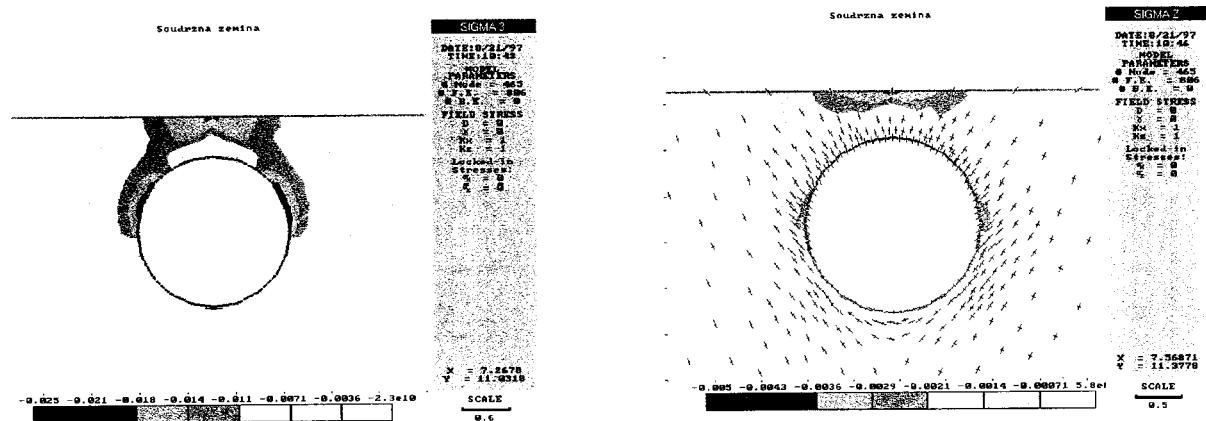
$\sigma_z^{(p)}$  - svislá složka napětí vznikající na povrchu nadložní vrstvy zeminy v důsledku působení vztlaku na protlačovanou troubu (znaménko - představuje tlak),

$\sigma_3^{(p)}$  - velikost hlavního  $\sigma_3$  působícího na povrchu nadložní vrstvy zeminy vznikající v důsledku působení

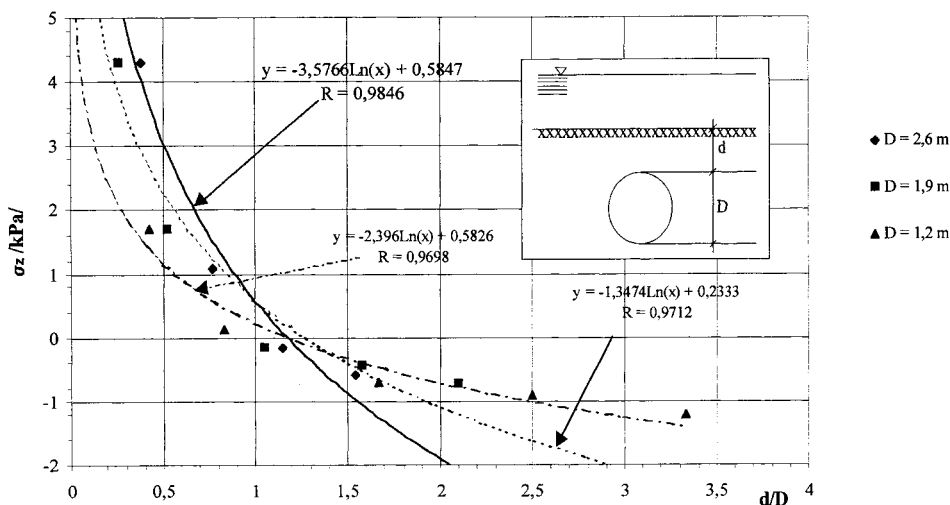
vztlaku na protlačovanou troubu,

$\sigma_t$  - tahová pevnost zeminy ( $\sigma_t \cong 2c$ ).

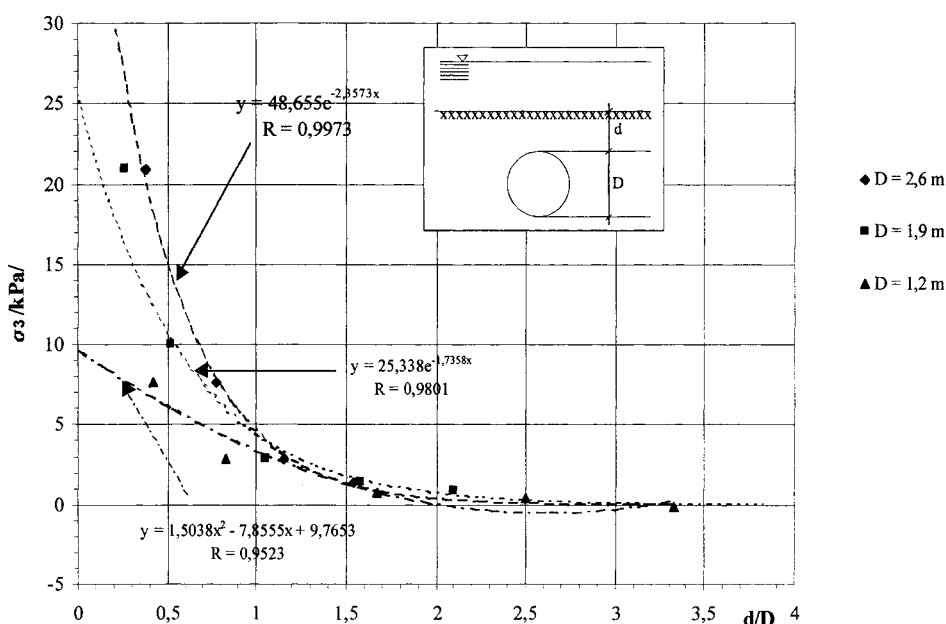
Podmínky (4) a (5), které musí být splněny, představují kritérium počínajícího porušování zeminy na povrchu. Vznik tahového porušení na povrchu (překročení pevnosti zeminy v tahu), nebo vznik „vznosu“ zeminy, může totiž vést k nekontrolovatelnému procesu porušování nadloží nad protlačovanou konstrukcí v oblasti odpovídající přibližně předpokladům zjednodušeného řešení (obr. 4).



Obr.4. Vznik tahového porušení, nebo vznik „vznosu“ zeminy.



Obr.5. Závislost mezi velikostí  $\sigma_z$  na povrchu nadložní vrstvy a poměrem  $d/D$  při protlačování ve zvodňelém zeminovém prostředí.



Obr.6. Závislost mezi velikostí  $\sigma_3$  na povrchu nadložní vrstvy a poměrem  $d/D$  při protlačování ve zvodňelém zeminovém prostředí.

Součinitel spolehlivosti je pro tyto případy možno přijmout ve velikosti  $\gamma_m = 1,1 - 1,3$  podle velikosti  $I_d$  a  $I_c$  (indexu hutnosti zeminy, číslo konzistence), přičemž pro vyšší hutnost nesoudržných zemin a konzistenci jílovitých zemin velikost  $\gamma_m$  klesá.

### Závěry

Zobecníme-li dosažené výsledky řešení, můžeme vyslovit tyto závěry:

- bez ohledu na velikost součinitelů spolehlivosti je stanovení potřebné mocnosti nadloží z výsledků numerického modelování na bezpečnější straně (dává vyšší míru spolehlivosti),
- v případě nesoudržných zemin, pro analyzovaný rozsah velikostí konstrukcí (průměr 1,2 – 2,6 m), leží spolehlivá mocnost nadloží v intervalu  $d \geq (1,2 \div 2,6) D \cdot \gamma_m$ . Aplikujeme-li součinitel spolehlivosti  $\gamma_{mp}$  u téže skupiny zemin a zjednodušeného řešení, je přiblížení výsledků obou metod inženýrsky únosné. Z hlediska pravděpodobného snadnějšího vzniku efektu vnosu zeminy, doporučujeme použití uvedeného vztahu se zohledněním vlivu hutnosti zeminy ( $I_d$ ),
- u soudržných zemin, jejichž tahová pevnost  $\sigma_t$  není menší než 5 kPa ( $c_u =$  cca 2,5 kPa) leží interval spolehlivé mocnosti nadloží v rozmezí  $d \geq (0,7 \div 1,0) D \cdot \gamma_m$ , tedy bezpečná mocnost nadloží je menší. Pro stanovení tahové pevnosti  $\sigma_t \cong 2c_u$  se doporučuje aplikovat součinitel spolehlivosti  $\gamma_{mc} = 2$ . Pak:

$$\sigma_t \cong \frac{2 \cdot c_u}{\gamma_{mc}} \cong c_u$$

Velikost  $\gamma_m$  má vazbu na číslo konzistence zeminy, obecně však, s ohledem na jeho proměnlivost s hloubkou, bude  $\gamma_m$  u soudržných zemin vyšší než u zemin nesoudržných ( $\gamma_m \rightarrow 1,3$ ). V úvahu lze vzít i vliv hloubky rozbředlých (rozměklých) zemin na povrchu území. Tyto otázky jsou mnohem složitější než u nesoudržných zemin a musí být posuzovány individuálně na základě podrobného IG průzkumu.

### Literatura

- Derski, W., Izbicki, R., Kisiel, I. & Mroz, Z.: Rock and Soil Mechanics. PWN Warszawa 1988.  
 Szechy, K.: The Art of Tunnelling. Akadémiai Kiadó, Budapest 1973.  
 Šimek, J., Jesenák, J., Eichler, J. & Vaniček, I.: Mechanika zemin. SNTL Praha 1990.

*Příspěvek byl zpracován v rámci řešení grantového úkolu č. 103/96/0755 za podpory Grantové agentury ČR.*