

## STANY GRANICZNE HYD W OBLICZENIACH STATECZNOŚCI DNA WYKOPU

Katarzyna Dołżyk, Zenon Szypcio

Politechnika Białostocka

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zagadnienie stateczności dna wykopu jako stanów granicznych HYD Eurokodu 7. Pokazano, że dla wykopów otoczonych ściankami szczelnymi dwa warunki stanów granicznych HYD podane w Eurokodzie 7 prowadzą do różnych wartości globalnego współczynnika bezpieczeństwa. Dla warunku stateczności wyrażonego w siłach działających na blok gruntu w sąsiedztwie ścianki szczelnej globalny współczynnik bezpieczeństwa  $F = 1,5$ , a dla warunku wyrażonego w naprężeniach efektywnych  $F = 3$ . Na przykładzie wykopu liniowego zilustrowano metodykę obliczeń stateczności dna wykopu zgodnie z EC7.

**Słowa kluczowe:** Eurokod 7, stany HYD, stateczność dna wykopu

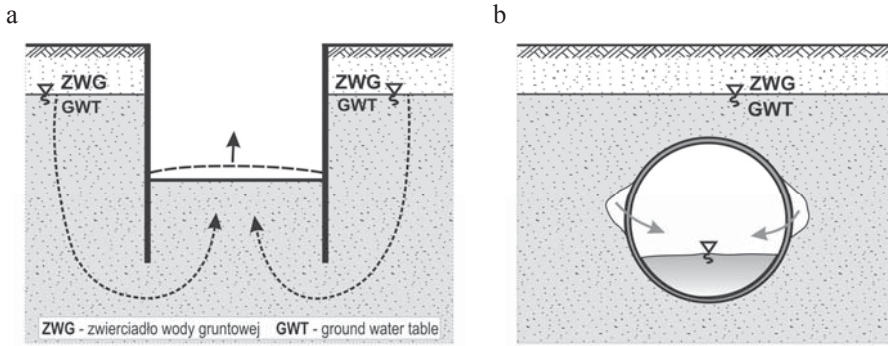
### WSTĘP

Eurokod 7 [PN-EN 1997-1] identyfikuje stany graniczne: GEO – zniszczenia lub nadmiernego odkształcenia podłoża, STR – zniszczenia lub nadmiernego odkształcenia elementów konstrukcji, wynikające ze współpracy budowli z podłożem, EQU – utraty równowagi statycznej konstrukcji, UPL – utraty równowagi lub nadmiernego odkształcenia wywołanego statycznym oddziaływaniem wody (wyporem, ciśnieniem pod warstwą nieprzepuszczalną), HYD – wynikające ze statycznego i kinematycznego oddziaływania wody spowodowane spadkiem hydraulicznym (przepływem wody w gruncie) [Bond i Harris 2010]. Typowym przykładem stanów HYD jest utrata stateczności dna wykopu i erozja wewnętrzna wywołana unoszeniem cząstek gruntu przez płynącą w gruncie wodę (rys. 1) [Bond i Harris 2010].

Z inżynierskiego punktu widzenia stany HYD są bardzo istotne przy wykopach poniżej poziomu zwierciadła wód gruntowych. W artykule przedstawiono metodykę obliczeń stateczności dna wykopu otoczonego ściankami szczelnymi zgodnie z Eurokodem 7 [PN-EN 1997-1].

---

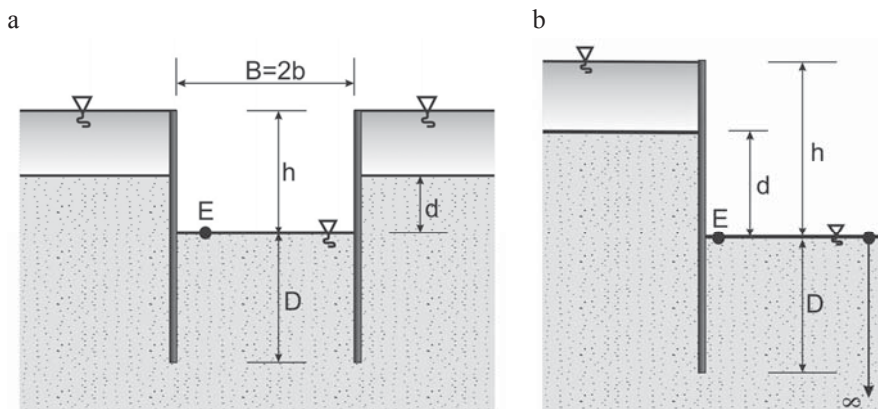
Adres do korespondencji – Corresponding authors: Katarzyna Dołżyk, Zenon Szypcio,  
Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zakład Geotechniki,  
ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok, e-mail: k.dolzyk@pb.edu.pl, e-mail: szypcio@pb.edu.pl



Rys. 1. Typowe stany graniczne HYD: a – utrata stateczności dna wykopu, b – erozja wewnętrzna  
 Fig. 1. Typical ultimate limit states HYD: a – loss of excavation bottom stability, b – internal erosion

## METODYKA OBLICZEŃ

Schematycznie geometrię zagadnienia pokazano na rysunku 2. Wykop szerokości  $B$  ( $B = 2b$ ) wykonywany jest w gruncie jednorodnym o znacznej wodoprzepuszczalności na głębokość  $d$  poniżej poziomu terenu i  $h$  poniżej poziomu wody otaczającej wykop lub poziomu zwierciadła wody gruntowej. Wykop obustronnie zabezpieczony jest ścianką szczelną zapuszczoną na głębokość  $D$  poniżej dna wykopu. W artykule przyjęto, że wykopem wąskim jest wykop o  $b/D \leq 10$ , a wykopem szerokim – wykop o  $b/D > 10$ . Taki podział wykopów wynika z możliwości wykorzystania wykresów określających maksymalne wartości spadków hydraulicznych ( $I_E$ ) w poziomie dna wykopu w sąsiedztwie ścianki szczelnej (punkt  $E$  na rys. 2) [Lancellotta 1995]. Z punktu widzenia stateczności dna wykopu istotne jest określenie głębokości ( $D$ ) zapuszczania ścianki szczelnej. Głębokość zapuszczania ścianki szczelnej zabezpieczającej stateczność ścian wykopu jest



Rys. 2. Geometria zagadnienia: a – wykop wąski, b – wykop szeroki

Fig. 2. Geometry of the issue: a – narrow excavation, b – wide excavation

określona z rozwiązań stanów granicznych GEO, a wymiary elementów ścianki szczelnej – z rozwiązań stanów granicznych STR [PN-EN 1997-1].

Przy weryfikacji stateczności dna wykopu Eurokod 7 [Bond i Harris 2010, Lendo-Siwicka i in. 2011, Kłosiński 2013] zaleca sprawdzenie dwóch nierówności:

$$S_d \leq G'_d \quad (1)$$

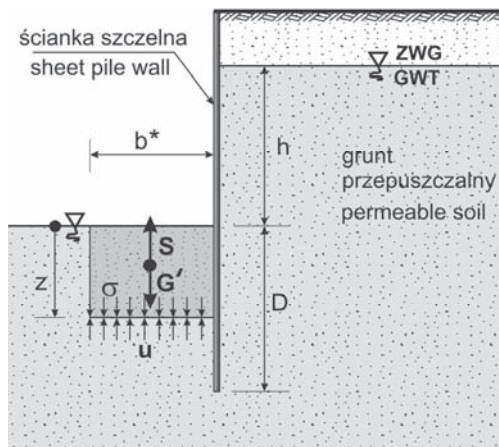
$$u_d \leq \sigma_d \quad (2)$$

gdzie:  $G'_d$  – obliczeniowa (projektowa) wartość ciężaru rozważanego bloku gruntu z uwzględnieniem wyporu wody (rys. 3),

$S_d$  – wartość obliczeniowa (projektowa) siły ciśnienia sphywowego oddziałującego destabilizująco na blok,

$\sigma_d$  – wartość obliczeniowa (projektowa) całkowitych naprężeń pionowych na rozważanym poziomie poniżej dna wykopu (rys. 3)

$u_d$  – wartość obliczeniowa (projektowa) ciśnienia wody na tym poziomie (rys. 3).



Rys. 3. Analizowany blok gruntu

Fig. 3. The block of soil under analysis

Z praktyki inżynierskiej wynika, że szerokość analizowanego bloku  $b^* = D/2$  [Bond i Harris 2010], a miąższość  $0 < z \leq D$ . Stosując definicję naprężeń efektywnych Terzagiego, nierówność (2) może być zapisana w postaci:

$$\sigma_d - u_d = \sigma'_d \geq 0 \quad (3)$$

co znaczy, że wartość obliczeniowa (projektowa) naprężeń efektywnych na żadnym z rozważanych poziomów nie może być ujemna.

W stanach granicznych HYD współczynniki cząstkowe oddziaływań stałych i zmiennych pokazano w tabeli 1 [PN-EN 1997-1, PN-EN 1997-1:2008/ Ap 2].

Tabela 1. Współczynniki cząstkowe oddziaływań w stanach HYD  
 Table 1. Partial factors of action In ultimate limit states HYD

Oddziaływanie Actions		Współczynniki Partial factors	
		oznaczenie sign	wartość value
Stałe Permanent	destabilizujące unfavourable	$\gamma_{G,dst}$	1,35
	stabilizujące favourable	$\gamma_{G,stb}$	0,90
Zmienne Variable	destabilizujące unfavourable	$\gamma_{Q,dst}$	1,50
	stabilizujące favourable	$\gamma_{Q,stb}$	0,00

Wartość charakterystyczna ciężaru rozważanego bloku z uwzględnieniem wyporu wody wynosi:

$$G'_k = \gamma' \cdot b^* \cdot z \quad (4)$$

a wartość obliczeniowa

$$G'_d = \gamma_{G,stb} \cdot G'_k \quad (5)$$

Wartość charakterystyczna siły ciśnienia spływowego oddziałującej na blok wynosi:

$$S_k = \gamma_w \cdot i \cdot b^* \cdot z \quad (6)$$

a wartość obliczeniowa

$$S_d = \gamma_{G,dst} \cdot S_k \quad (7)$$

W obliczeniach zwykle przyjmuje się, że wartość spadku hydraulicznego ( $i$ ) jest wartością maksymalną występującą w sąsiedztwie ścianki szczelnej, oznaczoną jako  $I_E$ . Ciężar objętościowy wody symbolizuje  $\gamma_w$ , a gruntu z uwzględnieniem wyporu wody  $\gamma'$ .

Nierówność (1) jest spełniona, gdy:

$$i = I_E \leq \frac{\gamma_{G,stb}}{\gamma_{G,dst}} \cdot \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{G,stb}}{\gamma_{G,dst}} \cdot i_{kr} \quad (8)$$

gdzie  $i_{kr} = \gamma' / \gamma_w$  jest krytyczną wartością spadku hydraulicznego równą jedności.

Ponieważ, zgodnie z Eurokodem 7 [PN-EN 1997-1:2008/Ap 2],  $\gamma_{G,stb} = 0,9$ , a  $\gamma_{G,dst} = 1,35$ , zatem nierówność (8) ma postać:

$$i = I_E = 0,75 \cdot i_{kr} = \frac{i_{kr}}{1,5} = \frac{1}{1,5} = 0,67 \quad (9)$$

stąd z warunku (1) globalny współczynnik bezpieczeństwa  $F = 1,5$ .

Z równania Bernoulliego wynika, że wartość charakterystyczna ciśnienia wody na głębokości poniżej dna wykopu wynosi:

$$u_k = \gamma_w \cdot z \cdot (1+i) \quad (10)$$

a wartość obliczeniowa

$$u_d = \gamma_{G,dst} \cdot u_k \quad (11)$$

Charakterystyczna wartość naprężeń całkowitych na głębokości poniżej dna wykopu wynosi:

$$\sigma_k = \gamma_{sr} \cdot z \quad (12)$$

a wartość obliczeniowa

$$\sigma_d = \gamma_{G,sbt} \cdot \sigma_k \quad (13)$$

gdzie  $\gamma_{sr}$  jest ciężarem objętościowym gruntu przy całkowitym nasyceniu porów wodą.

Nierówność (3), po prostych przekształceniach, może być zapisana w postaci:

$$I_E = i \leq \frac{\gamma_{G,stab}}{\gamma_{G,dst}} \cdot i_{kr} + \frac{\gamma_{G,stab}}{\gamma_{G,dst}} - 1 \quad (14)$$

$$\text{gdzie } i_{kr} = \frac{\gamma_{sr} - \gamma_w}{\gamma_w}.$$

Dla  $\gamma_{G,sbt} = 0,90$  i  $\gamma_{G,dst} = 1,35$  i  $i_{kr} = 1$  nierówność (14) jest spełniona, gdy:

$$I_E = i = 0,667 \cdot i_{kr} - 0,33 = \frac{i_{kr}}{1,5} - 0,33 = 0,33 \quad (15)$$

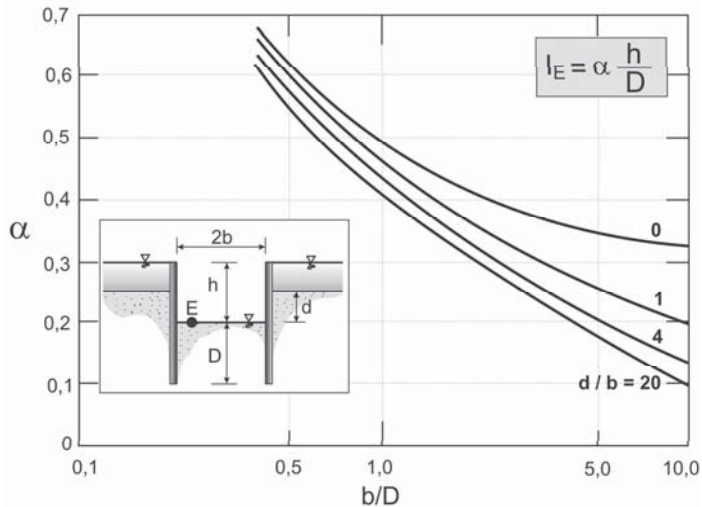
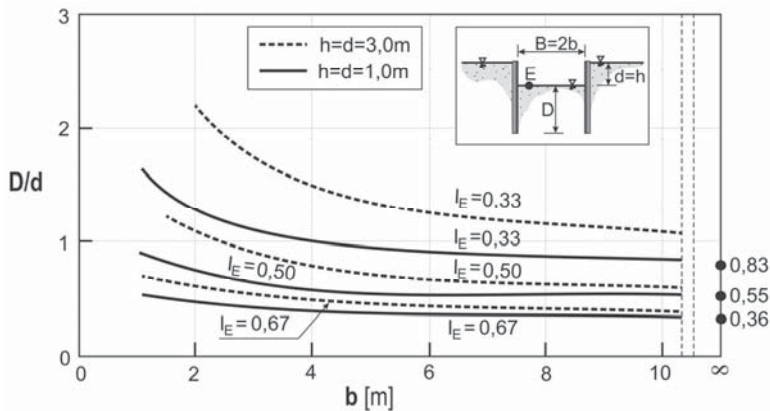
Globalny współczynnik bezpieczeństwa wynikający z nieujemności naprężeń efektywnych, gdy spełniona jest nierówność (3), wynosi  $F = 3$ . Zauważmy, że warunki stateczności podane w Eurokodzie 7 [PN-EN 1997-1] prowadzą do znacząco różnych wartości globalnego współczynnika bezpieczeństwa. I tak z warunku (1) globalny współczynnik bezpieczeństwa  $F = 1,5$  ( $I_E = 0,67$ ), a z warunku (2)  $F = 3$  ( $I_E = 0,33$ ). Podobnie przedstawili w swych pracach Bond i Haris [2010], Lendo-Siwicka i inni [2011] i Kłosiński [2013].

Norma [PN-81/B-03020] zaleca przyjęcie globalnego współczynnika bezpieczeństwa  $F = 2$ .

## PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Dla wykopu o długości znacznie większej od szerokości ( $L \gg B$ ), poziomie wody gruntowej na poziomie terenu ( $h = d$ ) i głębokości  $d = 1$  i  $3$  m znaleziono głębokość wbięcia ścianki szczelnej ( $D/d$ ) dla  $I_E = 0,33$  ( $F = 3$ ),  $I_E = 0,50$  ( $F = 2$ ) i  $I_E = 0,67$  ( $F = 1,5$ ).

Korzystając z wykresów podanych przez Lancellottę [1995] (rys. 4), metodą prób znaleziono wartości  $D/d$  dla różnych szerokości wykopu, które pokazano na rysunku 5.

Rys. 4. Wartości  $I_E$  dla wykopów o różnym  $d/b$  [Lancellotta 1995]Fig. 4. The value  $I_E$  for excavation with different  $d/b$  [Lancellotta 1995]Rys. 5. Zależność  $D/d$  od szerokości wykopuFig. 5. The  $D/d$  dependency on excavation width

Dla małych szerokości  $b/D < 0,4$  nie można korzystać z wykresów pokazanych na rysunku 4 – konieczne jest korzystanie z zależności i wykresów podanych w literaturze (np. Sokółowski i Żbikowski [1993]) lub należy wyznaczyć spadki hydrauliczne na dnie wykopu, rozwiązując równanie filtracji graficznie lub numerycznie.

Aby zapewnić stateczność dna wykopu, konieczne jest wbicie ścianki szczelnej poniżej dna wykopu, zależnie od wymaganego współczynnika bezpieczeństwa, głębokości wykopu i poziomu zwierciadła wody gruntowej. Dla globalnego współczynnika bezpieczeństwa  $F = 3$  ( $I_E = 0,33$ ), głębokości wykopu  $d = 3,0$  m i szerokości  $B < 4,0$  m ( $b < 2,0$  m) wymagana głębokość wbicia ścianki poniżej dna wykopu jest ponad dwukrotnie większa od głębokości wykopu ( $D/d > 2$ ).

## PODSUMOWANIE

Dwa warunki równowagi granicznej podane w Eurokodzie 7 przy analizie stateczności dna wykopu prowadzą do różnych wartości globalnego współczynnika bezpieczeństwa. Dla warunku stateczności wyrażonego w siłach działających na blok gruntu w sąsiedztwie ścianki szczelnej globalny współczynnik bezpieczeństwa  $F = 1,5$ , a dla warunku wyrażonego w naprężeniach efektywnych  $F = 3$ . Zapewnienie stateczności dna wykopu wykonywanego w gruntach o znacznej przepuszczalności, otoczonego ściankami szczelnymi, wymaga znacznych głębokości ich wbicia poniżej dna wykopu. W wielu przypadkach głębokość wbicia ścianki szczelnej, wynikająca z warunku zapewnienia stateczności dna wykopu, może być większa niż wynikająca z zapewnienia stateczności ścian wykopu.

Należy pamiętać, że zapewniając stateczność dna i ścian wykopu, konieczne jest sprawdzenie, czy prędkości wody gruntowej nie będą unosić cząstek gruntu i prowadzić do awarii ścianki szczelnej.

## PIŚMIENNICTWO

- Bond A., Harris A., 2010. Decodong Eurocode 7. Taylor & Francis, London – New York.
- Kłosiński B., 2013. Zasady i problemy projektowania stateczności dna głębokich wykopów. Seminarium IBDiM i PZWFS, „Głębokie wykopu 2013”. Warszawa, 23–36.
- Lancellotta R., 1995. Geotechnical engineering. Balkema A.A., Rotterdam.
- Lendo-Siwicka M., Łada A., Garbulewski K., 2011. Projektowanie budowli według Eurokodu 7 z uwzględnieniem warunków hydraulicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska 58 (3/11/II), 55–62.
- PN-EN 1997-1 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-1:2008/Ap. 2 Poprawka do polskiej normy PN-EN 1997-1, wrzesień 2010.
- PN-81/B-03020 Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- Sokołowski J., Żbikowski A., 1993. Odwodnienia budowlane osiedlowe. Wydaw. SGGW, Warszawa.

## THE ULTIMATE LIMIT STATE HYD IN CALCULATIONS OF EXCAVATION BOTTOM STABILITY

**Abstract.** The present paper addresses the issues of excavation bottom stability as ultimate limit state HYD of the Eurocode 7. It has been shown that with excavations surrounded by sheet pile walls, the two conditions for ultimate limit state HYD as provided in EC7 procedure different values of the global safety factor. For the stability condition expressed in forces and weights affecting the column of soil at a sheet pile wall, the global safety factor is  $F = 1.5$ , while for the condition expressed terms of effective stresses this factor is  $F = 3$ . The methodology of calculating the excavation bottom stability according to EC7 was exemplified by a linear excavation.

**Key words:** EuroCode 7, ultimate limit state HYD, excavation bottom stability

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.06.2013