

**Marzena LENDO-SIWICKA, Kazimierz GARBULEWSKI**

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie  
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

## **Stan graniczny wypiętrzenia dna wykopu według Eurokodu 7<sup>1</sup>** **Limit state of heave in excavation bottom according to** **Eurocode 7**

**Słowa kluczowe:** projektowanie, Eurokod 7, stany graniczne, zniszczenie hydrauliczne

**Key words:** design calculations, Eurocode 7, limit states, hydraulic failure

### **Wprowadzenie**

Stany graniczne, nazwane w normie Eurokod 7 (PN-EN-1997-1: 2008) zniszczeniem hydraulicznym, obejmują cztery rodzaje zniszczenia: wyparcie, wypiętrzenie, wewnętrzną erozję i przebicie hydrauliczne. W projektowaniu geotechnicznym sprawdzenie warunków wystąpienia zniszczenia hydraulicznego wymaga rozpoznania oddziaływań wynikających z obecności lub przepływu wody podziemnej i powierzchniowej, zwłaszcza siły filtracji, gradientów hydraulicznych i ciśnień wody w porach. Wymienione parametry należy określić,

biorąc pod uwagę: zmienność w czasie i w profilu podłoża przepuszczalności hydraulicznej, wahania w czasie poziomu wody gruntowej, wartości ciśnień wody w porach oraz zmiany w geometrii przepływu. Stan graniczny wypiętrzenia dna wykopu, analizowany w niniejszym artykule, powinien być sprawdzany w przypadku, kiedy podłoże zbudowane jest z gruntów przepuszczalnych, a przepływ wody gruntowej odbywa się w kierunku do wykopu. W takich warunkach istnieje niebezpieczeństwo utraty stateczności wykopu i wystąpienia awarii budowlanej. Sprawdzenie stanu granicznego wypiętrzenia dna wykopu jest zaliczane do jednego z trudniejszych zadań inżynierskich w projektowaniu geotechnicznym.

W artykule przedstawiono zasady sprawdzania stanu granicznego wypiętrzenia dna wykopu według Eurokodu 7,

---

<sup>1</sup>Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy nr N N506218039.

z uwzględnieniem oddziaływań wynikających z obecności lub przepływu w podłożu wody podziemnej. Stan graniczny sprawdzono zalecanymi w normie Eurokod 7 dwiema metodami, przyjmując warunki naprężeń całkowitych (wzór 2.9a, PN-EN 1997-1: 2008) i warunki naprężeń efektywnych (wzór 2.9b, PN-EN 1997-1: 2008). Obliczenia przeprowadzono dla wykopu zabezpieczonego ścianką szczelną, zakładając zmienne wartości głębokości ścianki szczelnej i położenia zwierciadła wody.

### Zasady sprawdzania stanu granicznego

Wypiętrzenie dna wykopu, określane również jako hydrauliczne unoszenie cząstek gruntu, ma miejsce wtedy, gdy skierowana do góry siła ciśnienia sphywowego, przeciwdziałając ciężarowi gruntu, zmniejsza efektywne naprężenie

pionowe do stanu granicznego (upłynienia gruntu). Cząstki gruntu są wtedy unoszone przez pionowy przepływ wody i następuje zniszczenie podłoża wykopu (rys. 1). Według Eurokodu 7 stan graniczny wypiętrzenia dna wykopu (HYD) należy sprawdzić, porównując wartość naprężenia całkowitego jako siły stabilizującej i ciśnienia wody w porach jako siły destabilizującej (wzór 1) lub wartość siły ciśnienia sphywowego jako siły destabilizującej i ciężar gruntu z uwzględnieniem wyporu jako siły stabilizującej (wzór 2):

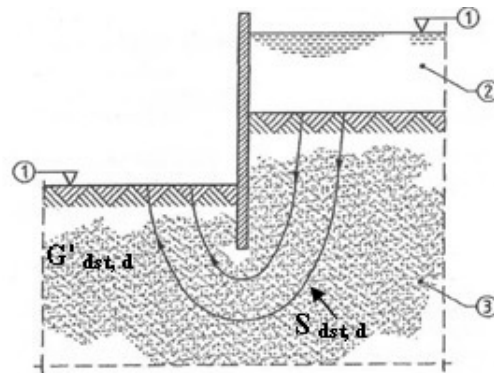
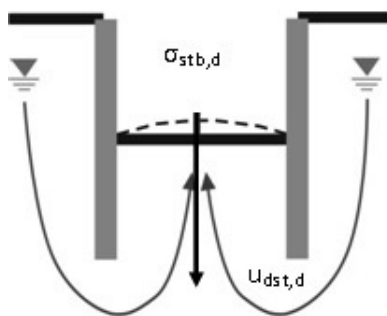
$$u_{dst,d} \leq \sigma_{stb,d} \quad (1)$$

$$S_{dst,d} \leq G'_{stb,d} \quad (2)$$

gdzie:

$u_{dst,d}$  – wartość obliczeniowa całkowitego destabilizującego ciśnienia wody w porach,

$\sigma_{stb,d}$  – wartość obliczeniowa całkowitego stabilizującego naprężenia pionowego,



1. Dno wykopu po lewej, zwierciadło wody po prawej / The bottom of the excavation on the left, the water table on the right
2. Woda / water
3. Piasek / Sand

RYSUNEK 1. Schematy stanu granicznego hydraulicznego wypiętrzenia dna wykopu  
FIGURE 1. Scheme of hydraulic failure heave of excavation bottom

$S_{dst,d}$  – wartość obliczeniowa siły ciśnienia sphywowego,

$G'_{stb,d}$  – wartość obliczeniowa ciężaru gruntu z uwzględnieniem wyporu.

Parametry obliczeniowe występujące w wzorach (1) i (2) należy określać, stosując współczynniki częściowe w sytuacji oddziaływań stałych i zmiennych (tab. 1).

## Analiza parametryczna

Sprawdzenie stanu granicznego wypiętrzenia dna wykopu przeprowadzono, wykorzystując wzory (1) i (2) oraz przyjmując wartości głębokości zwierciadła wody ( $\Delta H$ ) w zakresie od 2 do 6 m i zagłębienia ścianki szczelnej ( $d$ ) w zakresie od 2 do 12 m. W obliczeniach przyjęto schemat wykopu szerokoprzecznego, przedstawiony na rysunku 2.

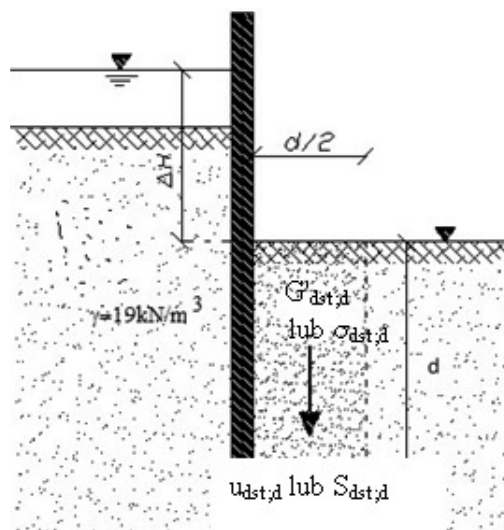
TABELA 1. Współczynniki częściowe do sprawdzenia stanu granicznego wypiętrzenia dna wykopu (HYD)

TABLE 1. Partial factors to check the limit state of hydraulic heave (HYD)

Oddziaływanie / Effect	Symbol / Symbol	Wartość / Value
Stałe / Constant permanently		
Niekorzystne <sup>a</sup> / Adverse	$\gamma_{G,dst}$	1,35
Korzystne <sup>b</sup> / Beneficial	$\gamma_{G,stb}$	0,90
Zmienne / Variables		
Niekorzystne <sup>a</sup> / Adverse	$\gamma_{Q,dst}$	1,50

<sup>a</sup> Destabilizujące / Destabilize.

<sup>b</sup> Stabilizujące / Stabilize.



RYSUNEK 2. Schemat obliczeniowy  
FIGURE 2. Scheme of calculation

Sprawdzając stan graniczny według wzoru (2), założono, zgodnie z propozycją Terzagiego i Pecka (1996), strefę gruntu z uwzględnieniem wyporu szerokości równej połowie długości ścianki szczelnej ( $1/2d$ ). Obliczenia, których wyniki przedstawiono w tabeli 2,

przeprowadzono zgodnie z zasadami podanymi w Eurokodzie 7, jak również z zaleceniami Bonda i Harrisa (2008), którzy zaproponowali sprawdzać stany graniczne, obliczając tzw. stopień wykorzystania, według wzorów:

TABELA 2. Zestawienie wartości obliczonych stopni wykorzystania w stanie granicznym wypiętrzenia dna wykopu (HYD)

TABLE 2. Summary of the values of the degree of utilization for hydraulic heave (HYD)

Dane / Details				Obliczenia / Calculation					
Numer obliczenia Number of calculations	Głębokość zwierciadła wody Height of the water table	Zagłębienie ścianki szczelnej w gruncie Depth of sheet piling in the ground	Ciężar objętościowy gruntu Bulk soil unit weight	$E_{d,dst} = \gamma_{G,dst} \cdot u_{dst,d}$	$E_{d,sub} = \gamma_{G,sub} \cdot \sigma_{sub,d}$	Stopień wykorzystania The degree of utilization	$E_{d,dst} = \gamma_{G,dst} \cdot S_{dst,d}$	$E_{d,sub} = \gamma_{G,sub} \cdot G'_{sub,d}$	Stopień wykorzystania The degree of utilization
				Wzór 1 / Formula 1			Wzór 2 / Formula 2		
				$\Delta H$ [m]	$d$ [m]	$\gamma$ [kN·m <sup>-3</sup> ]	[kN·m <sup>-1</sup> ]	[kN·m <sup>-1</sup> ]	[%]
I	2	7	19	105,95	119,7	88,51	46,35	202,64	22,87
II	3	7		112,57	119,7	94,04	69,53	202,64	34,31
III	4	7		119,19	119,7	99,58	92,7	202,64	45,75
IV	5	7		125,81	119,7	105,11	115,88	202,64	57,19
V	6	7		132,44	119,7	110,64	139,06	202,64	68,62
VI	2	8	19	119,19	136,8	87,13	52,97	264,67	20,01
VII	2	9		132,44	153,9	86,05	59,6	334,98	17,79
VIII	2	10		145,68	171	85,19	66,22	413,55	16,01
IX	2	11		158,92	188,1	84,49	72,84	500,4	14,56
X	2	12		172,17	205,2	83,9	79,46	595,51	13,34
XI	2	6	19	92,7	102,6	90,36	39,73	148,88	26,96
XII	2	5		79,46	85,5	92,94	33,11	103,39	32,02
XIII	2	4		66,22	68,4	96,81	26,49	66,17	40,03
XIV	2	3		52,97	51,3	103,26	19,87	37,22	53,37
XV	2	2		39,73	34,2	116,17	13,34	16,54	80,06

$$\Lambda_{HYD} = \frac{u_{dst,d}}{\sigma_{stb,d}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\Lambda_{HYD} = \frac{S_{dst,d}}{G'_{stb,d}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rysunkach 3 i 4 jako zależności pomiędzy wartościami stopnia wykorzystania i zagłębieniem ścianki szczelnej oraz głębokością zwierciadła wody.

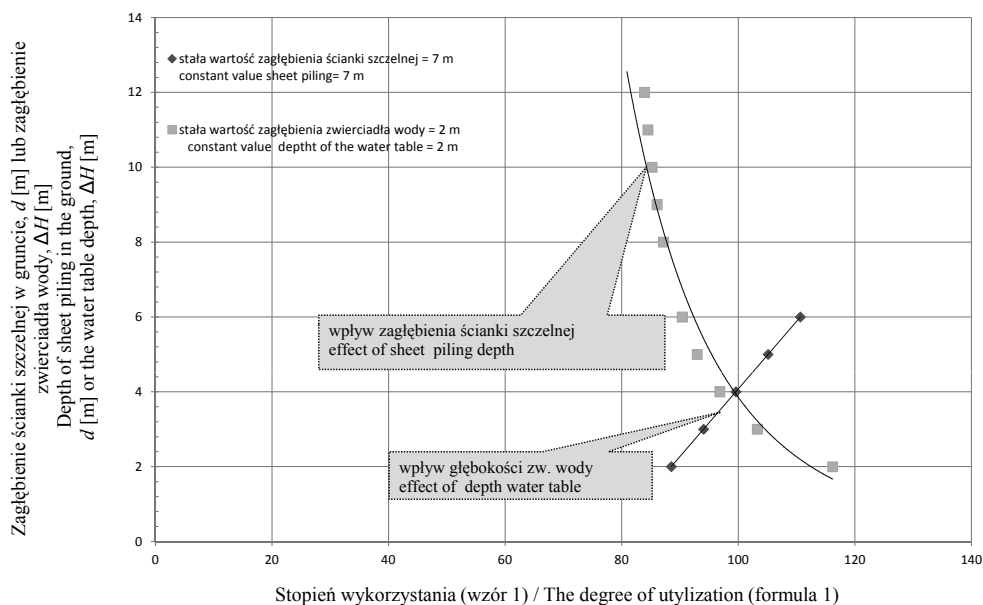
## Wnioski

Analiza parametryczna, której wyniki przedstawione są w niniejszym artykule, pozwala ustalić następujące wnioski:

1. Zalecane do sprawdzenia stanu granicznego wypiętrzenia dna głębokiego wykopu (HYD) wzory (1) i (2) nie są równorzędne. Stopień wykorzystania obliczony ze wzoru (1) jest od 1,4–6,2 razy większy od stopnia wykorzystania obliczonego ze wzoru (2), zależnie od wartości zagłębienia ścianki szczelnej i głębokości zwierciadła wody.

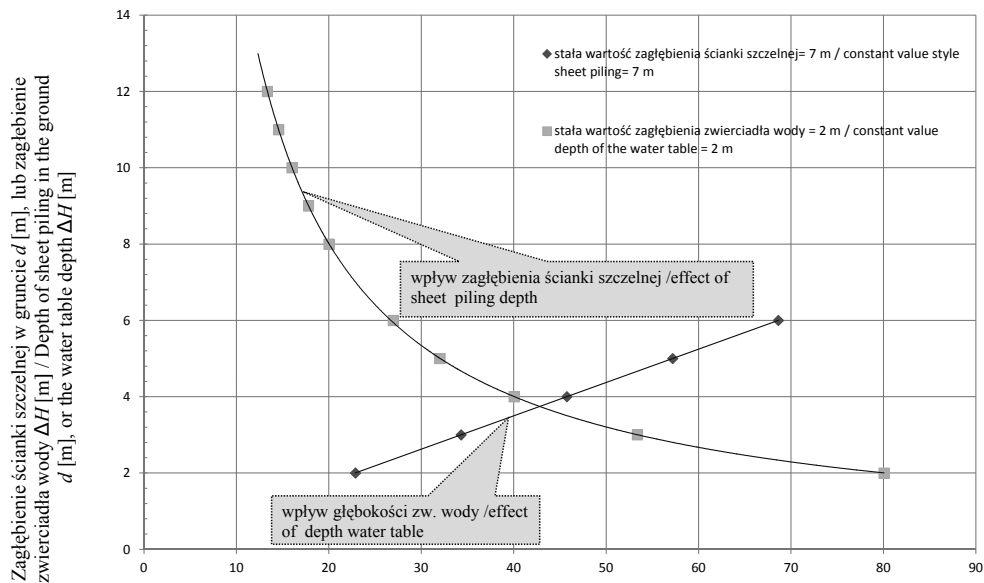
2. Biorąc pod uwagę niepewność założeń projektowych, zaleca się do sprawdzania stanu granicznego wypiętrzenia dna wykopu (HYD) stosować wzór (1); daje on większy zapas bezpieczeństwa.

3. Przyjmując stałą wartość zagłębienia ścianki szczelnej, wynoszącą 7 m, uzyskuje się według wzoru (1) stan graniczny wyrażony stopniem wykorzystania równym 100%, przy głębokości wody



RYSunEK 3. Zależność między stopniem wykorzystania obliczonym ze wzoru (1) a głębokością ścianki szczelnej i położeniem zwierciadła wody

FIGURE 3. The relationship between the degree of utilization calculated by formula (1) and the depth of the sheet pile and the position of the water table



Stopień wykorzystania (wzór 2) / The degree of utilization (formula 2)

RYСУNEK 4. Zależność między stopniem wykorzystania obliczonym ze wzoru (2) a głębokością ścianki szczelnej i położeniem zwierciadła wody

FIGURE 4. The relationship between the degree of utilization calculated by formula (2) and the depth of the sheet pile and the position of the water table

wynoszącej 4 m; po przekroczeniu tej wartości dno wykopu jest niestateczne.

4. Wartości stopni wykorzystania określone za pomocą wzoru są do zaakceptowania przez projektanta, ponieważ wynoszą poniżej 100%.

## Literatura

- BOND A., HARRIS A. 2008: Decoding Eurocode 7. The Cormwell Press, Wiltshire.
- PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- TERZAGHI K., PECK R. 1996: Soil mechanics in engineering practice. A Wiley-Interscience Publication, New York.

## Streszczenie

**Stan graniczny wypiętrzenia dna wykopu według Eurokodu 7.** W artykule przedstawiono zasady sprawdzania stanu granicznego wypiętrzenia dna wykopu według Eurokodu 7, z uwzględnieniem oddziaływań wynikających z obecności lub przepływu w podłożu wody podziemnej. Stan graniczny wypiętrzenia sprawdzono za pomocą obliczenia stopnia wykorzystania na podstawie obliczenia wartości siły filtracji ( $S_d$ ) i ciężaru gruntu z uwzględnieniem wyporu ( $G'_d$ ) oraz obliczenia stopnia wykorzystania na podstawie obliczonej wartości ciśnienia wody w porach ( $u_d$ ) i całkowitego naprężenia pionowego ( $\sigma_{vd}$ ), przyjmując schemat zabezpiec-

czenia wykopu ścianką szczelną. Z obliczeń dla różnych wartości wysokości zwierciadła wody ( $\Delta H$ ) i zagłębienia ścianki szczelnej ( $d$ ) wynika, że stopień wykorzystania określony ze wzoru (1) jest większy w stosunku do stopnia wykorzystania obliczonego ze wzoru (2). W obliczeniach projektowych należy sprawdzać stan graniczny wypiętrzenia dna wykopu, stosując wzór (1), który zapewnia dodatkowy zapas bezpieczeństwa.

## Summary

**Limit state of heave in excavation bottom according to Eurocode 7.** This paper presents the approaches used for limit state verification in case of hydraulic failure mode called in Eurocode 7 HYD (heave of excavation bottom), taking into account effects due to the presence or movement of ground water

in the ground. Limit state were checked by calculating the degree of utilization based on the seepage force ( $S_d$ ), and the weight of the soil ( $G'_d$ ), and based on the pore water pressure ( $u_d$ ) and total vertical stress ( $\sigma_{vd}$ ). Calculations for different values of the water level ( $\Delta H$ ) and the piling depth ( $d$ ) indicated the degree of utilization obtained using  $u_d$  and  $\sigma_{vd}$  actions significantly greater in comparison to the second approach ( $S_d, G'_d$  actions). Therefore, the approach with application of  $u_d$  and  $\sigma_{vd}$  actions is recommended in geotechnical design.

### Authors' address:

Marzena Lendo-Siwicka, Kazimierz Garbulewski  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Geoinżynierii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland  
e-mail: marzena\_lendo\_siwicka@sggw.pl