

SPRAWDZENIE STATECZNOŚCI JAZU NA ZNISZCZENIE HYDRAULICZNE

Marzena Lendo-Siwicka, Kazimierz Garbulewski, Piotr Siwicki
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Sprawdzenie warunków zniszczenia hydraulicznego, zwłaszcza spowodowanego przez unoszenie cząstek gruntu – stanu granicznego nośności określonego symbolem HYD, jest jednym z najtrudniejszych zadań dla projektantów wielu budowli, zarówno lądowych, jak i hydrotechnicznych. Stan graniczny HYD dotyczy zniszczenia, które jest niezwykle niebezpieczne i często inicjuje przebiecie hydrauliczne. Stan ten występuje zwykle w przypadku budowy głębokich wykopów, które wymagają obniżenia zwierciadła wody gruntowej i budowy konstrukcji hydrotechnicznych (np. jazów), projektowanych w celu spiętrzenia wody. Sprawdzenie warunków stanu granicznego HYD należy przeprowadzić zgodnie z wymaganiami normy Eurokod 7 [PN-EN 1997-1:2008], stosując dwie różne metody, w których zakłada się całkowite wartości ciśnienia wody w porach i naprężenia w podłożu lub siłę ciśnienia spływowego i ciężar przyzmy gruntu z uwzględnieniem wyporu. W celu sprawdzenia stanu granicznego HYD należy określić oddziaływania hydrauliczne, w tym: parcie wody, gradienty hydrauliczne i siłę ciśnienia spływowego. Niestety w normie PN-EN 1997-1:2008 nie podano, w jaki sposób oddziaływania te powinny być określone. W artykule zostaną przedstawione wyniki sprawdzenia warunków stateczności jazu Jaktorów zlokalizowanego w km 11+760 rzeki Pisia Tuczna. Wartości charakterystyczne wymaganych do sprawdzenia oddziaływań hydraulicznych zostały określone z wykorzystaniem siatki hydrodynamicznej przepływu, wygenerowanej programem numerycznym, przy założeniu najbardziej niekorzystnych warunków dotyczących zmienności położenia zwierciadła wody nad przyzmą gruntu, ciśnienia wody w porach i wyboju poniżej jazu. Wyniki sprawdzenia warunków stateczności pokazały, że proponowane w normie PN-EN 1997-1:2008 wzory prowadzą do różnego zapasu bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: stateczność jazu, zniszczenie hydrauliczne, stan graniczny nośności HYD

Adres do korespondencji – Corresponding author: Marzena Lendo-Siwicka, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: marzena_lendo_siwicka@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

WSTĘP

W projektowaniu głębokich wykopów fundamentowych, których wykonanie wymaga zwykle obniżenia zwierciadła wody gruntowej, jak również budowli hydrotechnicznych, których celem jest spiętrzenie wody, należy sprawdzić możliwość wystąpienia stanów granicznych nazwanych w Eurokodzie 7 [PN-EN 1997-1:2008] zniszczeniem hydraulicznym. Zakres sprawdzenia powinien uwzględniać następujące mechanizmy zniszczenia: wyparcie budowli (UPL), zniszczenie przez unoszenie cząstek gruntu (HYD), wewnętrzną erozję i przebicie hydrauliczne. Jednym z najtrudniejszych zadań dla projektantów jest sprawdzenie stanu granicznego HYD, w którym zniszczenie występuje wtedy, kiedy siły ciśnienia spływowego są większe od efektywnego ciężaru gruntu i powodują unoszenie cząstek gruntu lub wypiętrzenie masy gruntu. Do sprawdzenia warunków stanu granicznego HYD zaproponowano w Eurokodzie 7 dwa wzory, które wymagają określenia oddziaływań hydraulicznych, w tym: siły ciśnienia spływowego, parcia wody i gradientów hydraulicznych. W obliczeniach należy przyjąć niekorzystne warunki gruntowe i przepływu wody oraz uwzględnić zmienne w czasie parametry, w tym: poziom wody, ciśnienia wody w porach i wartości przepuszczalności hydraulicznej gruntów w podłożu. Niestety, oprócz wymagań ogólnych, nie podano w normie PN-EN 1997-1:2008 szczegółowych zasad określania potrzebnych do sprawdzenia stanu HYD oddziaływań hydraulicznych. Poza tym, jak wykazały dotychczasowe obliczenia, podane dwa wzory nie dają zbliżonych wyników, a nawet w niektórych przypadkach prowadzą do zupełnie przeciwstawnych wniosków dotyczących stateczności projektowanych budowli [Lendo Siwicka i in. 2011, Lendo-Siwicka i Garbulewski 2013]. W celu uzyskania porównywalnych warunków stateczności projektowanych budowli przy zastosowaniu wzorów (2.9a) i (2.9b) Orr [2005] zaproponował stosowanie współczynników częściowych we wzorze (2.9a) tylko do nadwyżki ciśnienia wody w porach (odziaływanie destabilizujące) i naprężeń efektywnych (odziaływanie stabilizujące). Ponadto uznał, że zastosowanie wzoru (2.9a) prowadzi do zbyt zachowawczych warunków stateczności. Warto zaznaczyć, że w załączniku krajowym do Eurokodu 7 [PN-EN 1997-1:2008/Ap2] podano zalecenie, aby stosować wzór (2.9b).

W artykule przedstawiono analizę warunków stateczności jazu Jaktorów, zlokalizowanego na rzece Pisia Tuczna w km 11+760, stosując podane w normie Eurokod 7 dwa wzory i przyjmując w obliczeniach normalny i maksymalny poziom wody w zbiorniku nad przyzmą gruntu w podłożu.

ZASADY EUROKODU 7

Hydrauliczne unoszenie cząstek gruntu, nazwane w Eurokodzie 7 HYD, ma miejsce, gdy skierowana do góry siła ciśnienia spływowego, przeciwdziałając ciężarowi gruntu, zmniejsza efektywne naprężenie pionowe do stanu granicznego. Cząstki gruntu są wtedy unoszone przez pionowy przepływ wody i następuje zniszczenie podłoża [PN-EN 1997-1:2008]. Stan graniczny hydraulicznego unoszenia cząstek gruntu należy sprawdzić dla każdego wybranego na podstawie analizy warunków gruntowych i hydraulicznych profilu gruntu w podłożu, porównując wartości obliczeniowe naprężenia

całkowitego jako siły stabilizującej i ciśnienia wody w porach jako siły destabilizującej (wzór 1) lub porównując wartość siły ciśnienia spływowego jako siły destabilizującej i ciężar gruntu z uwzględnieniem wyporu jako siły stabilizującej (wzór 2):

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

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

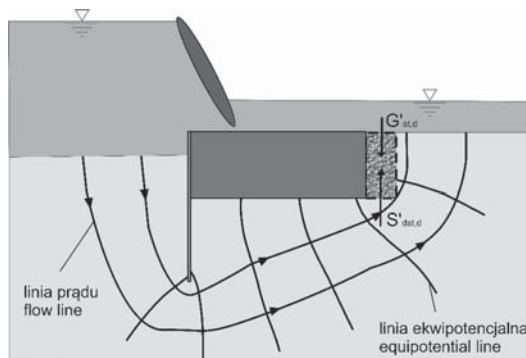
gdzie: $u_{dst,d}$ – wartość obliczeniowa całkowitego destabilizującego ciśnienia wody w porach,

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

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

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

Na rysunku 1 przedstawiono ideowy schemat stanu granicznego HYD dla wzoru (2).



Rys. 1. Ideowy schemat stanu granicznego HYD dla wzoru (2)

Fig. 1. Schematic diagram of limit state HYD for formula (2)

We wzorach (1) i (2) należy stosować współczynniki częściowe do $u_{dst,d}$, $\sigma_{stb;d}$, $S_{dst,d}$, G'_{stb} (tab. 2) dla sytuacji trwałych i przejściowych, które podane są w normie Eurokod 7-1 (zał. A.5). W końcowym etapie sprawdzania stanu granicznego HYD należy obliczyć współczynnik wykorzystania z następujących wzorów:

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

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

WYNIKI OBLICZENIA STATECZNOŚCI

Obliczenia stateczności zostały wykonane dla jazu Jaktorów, zlokalizowanego w km 11+760 rzeki Pisia Tuczna, w miejscowości Jaktorów. Jest to jaz żelbetowy o świetle $3 \times 1,7$ m (rys. 2). Projektowana rzędna piętrzenia dla zapewnienia poboru wody na uję-

ciu wynosi 102,50 m n.p.m. [Bajkowski i in. 2008]. Rzędna wody dolnej przy przepływie nienaruszalnym – 101,50 m n.p.m. W płycie jazu znajduje się niecka wypadowa o głębokości $d_n = 0,30$ m i długości $L_n = 3,80$ m. Długość płyty jazu wynosi 4,8 m. Jaz posiada zasuwowe zamknięcia główne. Prostopadłe skrzydełka jazu są wykonane jako monolityczne z przyczółkami. Budowla ma dwa filary szerokości 0,30 m. Górna ściana czołowa filara jest pionowa, a dolna jest odchylona od pionu w stosunku 5:1. Filary kończą się na długości niecki wypadowej. Na jazie znajduje się kładka służbowa szerokości 2,0 m, wykonana jako monolityczna, z konstrukcją filarów i przyczółków. Stanowisko dolne stanowi odcinek rzeki o przekroju trapezowym, umocniony płytami betonowymi.

a



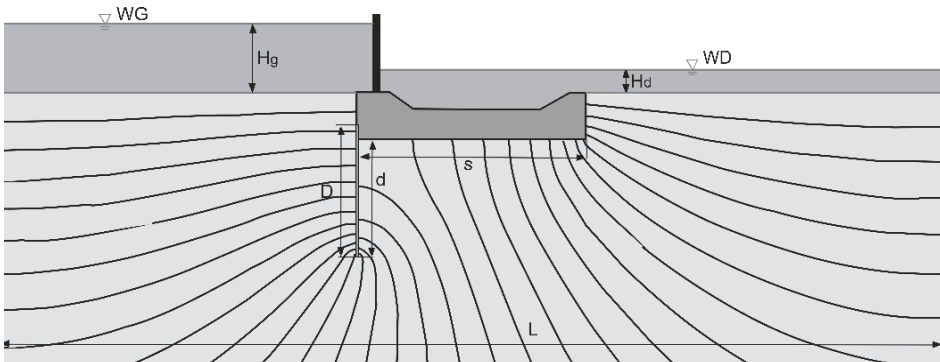
b



Rys. 2. Widok jazu: a – od strony wody górnej, b – od strony wody dolnej

Fig. 2. View of Jaktorów weir: a – from upstream, b – from downstream

Rozciągają się one od jazu do stopnia znajdującego się w odległości 9,4 m poniżej ściany czołowej skrzydełek dolnych. Sprawdzenie stanu granicznego zniszczenia hydraulicznego zostało wykonane dla schematu jazu przedstawionego na rysunku 3, w punkcie A.



Rys. 3. Siatka hydrodynamiczna pod jazem Jaktorów wykreślona w programie Hydraulik dla NPP

Fig. 3. Flow net beneath of Jaktorów weir from Hydraulik code for NPP

W sprawdzeniu możliwości unoszenia cząstek gruntu prowadzącego do przebicia hydraulicznego przyjęto normalny (NPP) i maksymalny (MaxPP) poziom piętrzenia, wynoszący odpowiednio 102,50 i 102, 85 m n.p.m. [Bajkowski i in. 2009]. Obliczenia stopnia wykorzystania przeprowadzono zgodnie z zasadami Eurokodu 7, przyjmując założenia podane przez Bond i Harris [2008]. W celu określenia wymaganego w obliczeniach spadku hydraulicznego wykreślono siatkę hydrodynamiczną (rys. 3), wykorzystując program Hydraulik, w którym do rozwiązania równań różniczkowych filtracji ustalonej w strefie nasyconej zastosowano metodę elementów skończonych (MES) [Sroka i in. 2004].

Na podstawie siatki filtracyjnej wyznaczono: m – liczbę linii ekwipotencjalnych oraz Δl – stosunek długości w wybranym elemencie siatki. Spadek krytyczny wyznaczono jako $(\gamma_k - \gamma_w)/\gamma_w$. Współczynniki częściowe dla stanu granicznego HYD i parametry do obliczeń zostały przedstawione w tabeli 1. Wyniki obliczeń zestawione są w tabeli 2.

Tabela 1. Parametry jazu do obliczeń i współczynniki częściowe dla stanu granicznego HYD
Table 1. The weir parameters for the calculation and partial factors of limit state HYD

Parametr – Parameter	Symbol Symbol	Wartość Value	Jednostka Unit
Długość ścianki szczelnej, konstrukcyjna The length of sheet piling, structural	D	3,0	m
Długość ścianki szczelnej – czynna The length of sheet piling – open	d	2,5	m
Długość płyty jazu The length of the weir plate	S	4,8	m
Rozpatrywana długość profilu Considered the length of the profile	L	20	m
Woda górna dla NPP Upstream for NPP	$H_{g,NPP}$	1,5	m
Woda górna dla max PP Upstream for MaxPP	$H_{g,MaxPP}$	1,85	m
Woda dolna Downstream	H_d	0,5	m
Współczynnik filtracji Permeability coefficient	k	$1 \cdot 10^{-4}$	$m \cdot s^{-1}$
Ciężar objętościowy gruntu Dry unit weight soil	γ_k	19,5	$kN \cdot m^{-3}$
Ciężar objętościowy wody Unit weight of water	γ_w	10,0	$kN \cdot m^{-3}$
Współczynniki częściowe – Partial safety factors			
Oddziaływanie stałe, destabilizujące Permanent destabilising action	$Y_{G, dst}$	1,35	–
Oddziaływanie stałe, stabilizujące Permanent stabilising action	$Y_{G, stb}$	0,9	–
Oddziaływanie zmienne, destabilizujące Variable unfavourable destabilising action	$Y_{Q, dst}$	1,5	–

Tabela 2. Wyniki obliczeń stateczności jazu
Table 2. The results of stability calculations weir

Parametr – Parameter	Wzór – Formula	Jednostka Unit	Wynik – Result	
			NPP	MaxPP
Gradient hydrauliczny Hydraulic gradient	$i = \Delta H / (m \cdot \Delta l)$	–	0,18	0,22
Ciśnienie wody w porach Pore water pressure	$u_k = \gamma_w \cdot (1 + i) \cdot (D - d)$	kPa	11,54	11,91
Napężenie pionowe Vertical stress	$\sigma_k = \gamma_k \cdot (D - d)$	kPa	9,75	9,75
Siła filtracji Seepage force	$S_k = \gamma_w \cdot i \cdot (D - d) \cdot A$	kN	0,92	1,11
Ciężar gruntu z wyporem Submerged weight	$G'_k = (\gamma_k - \gamma_w) \cdot (D - d) \cdot A$	kN	4,75	4,75
Siła destabilizująca z wykorzystaniem u_k The design value of the effect of destabilizing actions using u_k	$E_{d,dst} = \gamma_{dst} \cdot u_k$	kPa	15,58	16,09
Siła stabilizująca z wykorzystaniem σ_k The design value of the effect of stabilizing actions using σ_k	$E_{d,stab} = \gamma_{stab} \cdot \sigma_k$	kPa	8,78	8,78
Stopień wykorzystania Verification of stability against hydraulic heave	$\Lambda_{HYD} = \frac{u_{dst}}{\sigma_{d,dst}} \cdot 100\%$	%	178,00	183,31
Siła stabilizująca z wykorzystaniem G'_k The design value of the effect of stabilizing actions using G'_k	$E_{d,stab} = \gamma_{stab} \cdot G'_k$	kN	4,28	4,28
Siła destabilizująca z wykorzystaniem S_k The design value of the effect of destabilizing actions using S_k	$E_{d,dst} = \gamma_{dst} \cdot S_k$	kN	1,24	1,50
Stopień wykorzystania Verification of stability against hydraulic heave	$\Lambda_{HYD} = \frac{S_{d,dst}}{G'_{d,dst}} \cdot 100\%$	%	29,00	35,06
Współczynnik bezpieczeństwa (tradycyjny) Global safety factor	$F = \frac{i_{kr}}{i}$	–	5,17	4,28

WNIOSKI

Analiza wyników sprawdzenia stanu granicznego HYD dla jazu w Jaktorowie uzasadnia podanie następujących wniosków:

1. Proponowane w normie PN-EN 1997-1:2008 zasady sprawdzenia stanu granicznego HYD są zbyt ogólne, a wzory oznaczone w niniejszym artykule jako (1) i (2) wyma-

gają zastosowania współczynników częściowych do odpowiednich oddziaływań geotechnicznych [Orr 2005]. Z obliczeń wzorem (1) wynika, że sprawdzany jaz jest niestateczny ($\Lambda_{HYD} > 100\%$) zarówno w przypadku normalnego, jak i maksymalnego piętrzenia wody, natomiast na podstawie obliczeń wzorem (2) można stwierdzić, że jaz jest stateczny ($\Lambda_{HYD} \ll 100\%$).

2. Biorąc pod uwagę obecny stateczny stan jazu w Jaktorowie, można stwierdzić, że za poprawną analizę warunków zniszczenia hydraulicznego HYD należy uznać stosowanie wzoru (2). Wynikiem tej analizy jest potwierdzenie dużego zapasu bezpieczeństwa ($\Lambda_{HYD} = 30\text{--}40\%$), co jest zgodne z wynikami analizy stateczności metodą tradycyjną [Terzaghi i Peck 1996] ($F = 5,2$ i $4,3$) dla normalnego i maksymalnego poziomu piętrzenia wody.

PIŚMIENNICTWO

- Bajkowski, S., Siwicki, P., Urbanski, J. (2008). Stan techniczny jazu Jaktorów. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, XVII, 4 (42), 181–189.
- Bajkowski, S., Siwicki, P., Urbanski, J. (2009). Charakterystyka hydrauliczna jazu Jaktorów na rzece Pisia Tuczna. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, XVIII, 2 (44), 38–46.
- Bond, A., Harris, A. (2008). *Decoding Eurocode 7*. The Cornwell Press, Wiltshire.
- Lendo-Siwicka, M., Garbulewski, K. (2013). Stan graniczny wyparcia dna wykopu według Eurokodu 7. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 22 (2), 168–174.
- Lendo-Siwicka, M., Garbulewski, K., Łada N. (2011) Stany graniczne budowli w ekstremalnych warunkach hydraulicznych wg Eurokodu 7. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 58, 3, 11, 55–62.
- Orr, T. (2005). Evaluation of uplift and heave designs to Eurocode 7. *Proceedings of the International Workshop on the Evaluation of Eurocode 7*. Trinity College, Dublin, 147–158.
- PN-EN 1997-1: 2008. Eurokod 7 Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-1:2008/Ap2. Załącznik krajowy do postanowień krajowych w zakresie przedmiotowym EN 1997–1:2004.
- Sroka, Z., Walczak, Z., Wosiewicz, J. (2004). *Analiza ustalonych przepływów wód gruntowych metodą elementów skończonych*. Oprogramowanie inżynierskie. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań.
- Terzaghi, K., Peck, R. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. A Wiley – Interscience Publication, New York.

VERIFICATION OF WEIR SAFETY AGAINST HYDRAULIC FAILURE

Abstract. Generally the verification of resistance to hydraulic failure, particularly to failure by hydraulic heave – ultimate limit state named HYD, is considered as the most difficult task for designers of many civil and hydraulic works. Moreover, this limit state is a kind of failure with very high hazard potential because of initiating failure by piping. The hydraulic heave typically occurs in the construction of deep excavation pits demands to lowering the groundwater level and in the construction of hydraulic structures (e.g. weirs) to storage of water in reservoirs. The verification of resistance within the HYD can be done according to the Eurocode 7 [PN-EN 1997-1:2008] using two different ways assuming the total pore pressure and the total vertical stress (eq. 2.9a) or the seepage force and submerged weight of

soil prism (eq. 2.9b). In order to check the HYD state the seepage pressure, hydraulic gradients and flow forces should be determined. However, the way how to determine the seepage forces is not specified in PN-EN 1997-1:2008. This paper presents the results of verification against hydraulic heave for weir Jaktorów located in km 11+760 of Pisia Tuczna river. The characteristic values of the required actions have been determined using flow net by the use of numerical simulations with taken into account possible unfavorable conditions as variations in water levels above the soil prism and pore pressure in time as well as downstream excavation. The verification of HYD state shows an enormous influence of assumed condition and applied procedure on weir safety.

Key words: weir stability, hydraulic failure, ultimate limit state HYD

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 12.06.2016

Cytowanie: Lendo-Siwicka, M., Garbulewski, K., Siwicki, P. (2016). Sprawdzenie stateczności jazu na zniszczenie hydrauliczne. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (2), 129–136.