

PRACE NAUKOWO PRZEGLĄDOWE

RESEARCH REVIEW PAPERS

Przeгляд Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 63, 2014: 87–98
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 63, 2014)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 63, 2014: 87–98
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 63, 2014)

Anna SIECZKA, Kazimierz GARBULEWSKI

Katedra Geoinżynierii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

Stan graniczny zniszczenia hydraulicznego HYD w zaporach ziemnych według Eurokodu 7*

Limit state of hydraulic failure HYD in earth dams according to Eurocode 7

Słowa kluczowe: Eurokod 7, zniszczenie hydrauliczne, stan graniczny HYD

Key words: Eurocode 7, hydraulic failure, failure by heave (HYD)

Wprowadzenie

Według Eurokodu 7 (PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne) częścią projektu budowlanego powinien być projekt geotechniczny, w którym projektant konstrukcji budowlanej, współpracując z projektantem geotechnikiem, dokumentuje sprawdzenie wszystkich możliwych do wystąpienia stanów granicznych. Stany graniczne nośności (ULT) i użyteczności (SLS) zostały przedstawione w Eurokodzie 7 w sposób na tyle przystępny, że w zasadzie, poza

nielicznymi przypadkami konstrukcji budowlanych, są bez trudności powszechnie sprawdzane w projektowaniu budowli. Do stanów granicznych, które stwarzają poważne trudności projektantom ze względu na zbyt ogólne sformułowanie kryteriów i niepodanie szczegółowych zaleceń, zalicza się najczęściej stany graniczne nazwane w Eurokodzie 7 zniszczeniem hydraulicznym, do których zaliczono następujące:

- UPL – naruszenie równowagi budowli lub podłoża na skutek wyparcia przez ciśnienie wody lub inne pionowe oddziaływania (Dąbska i Gołębiowska, 2012, PN-EN 1997-1: 2008),
- HYD – hydrauliczne wypiętrzenie (ang. heave), nazywane również unoszeniem cząstek gruntu, wewnętrzną erozją lub przebiciem (ang. piping),

* Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2013 jako projekt badawczy NCN N N506 218039.

w podłożu gruntowym spowodowane gradientami hydraulicznymi (Dąbska i Gołębiowska, 2012, PN-EN 1997-1:2008)

Stany graniczne UPL i HYD mają dominujące znaczenie w przypadku projektowania budowli hydrotechnicznych (zapory, wały przeciwpowodziowe, obwałowania, jazy), które wymagają sprawdzenia oddziaływania spiętrzonyj wody na budowlę. Ponadto, stany te wymagają sprawdzenia w przypadku projektowania wykopów i fundamentów w podłożu, w którym występują zmienne warunki hydrauliczne związane z obecnością i przepływem wód podziemnych.

W artykule podano zasady sprawdzania stanu granicznego HYD – hydraulicznego unoszenia cząstek gruntu zgodnie z zaleceniami Eurokodu 7 i przykłady obliczeń projektowych zapór ziemnych. W obliczeniach do określenia sił filtracji wykorzystano siatki hydrodynamiczne (filtracyjne). Poza tym, w sprawdzaniu stanów granicznych HYD zastosowano metodę zaproponowaną przez Terzagiego i Pecka (1961).

Zasady sprawdzania stanu granicznego HYD według Eurokodu 7

Do sprawdzenia stanu granicznego HYD zaproponowano w Eurokodzie 7 następujące wzory:

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

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

gdzie:

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

$\sigma_{stb,d}$ – całkowite stabilizujące naprężenie pionowe (pionowa składowa tensora naprężenia na nieobciążonym korpusie zapory),

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

$G'_{stb,d}$ – ciężar gruntu z uwzględnieniem wyporu.

Jak wynika ze wzorów (1) i (2), stan graniczny HYD można sprawdzić, przyjmując warunki naprężeń całkowitych (naprężenie pionowe od ciężaru gruntu i ciśnienie wody w porach) lub warunki naprężeń efektywnych (ciężar gruntu z uwzględnieniem wyporu i ciśnienie spływowe z uwzględnieniem gradientu hydraulicznego). Przy wyznaczaniu parametrów filtracyjnych (gradient hydrauliczny, ciśnienie wody w porach, siły filtracji) należy wziąć pod uwagę zmienność przepuszczalności gruntów, wahania poziomów wód podziemnych i ciśnień wody w porach i zmiany warunków brzegowych. We wzorach (1) i (2) należy stosować parametry obliczeniowe, które określa się, wprowadzając współczynniki częściowe. Wartości współczynników częściowych mogą być podane w załączniku krajowym. Zalecane w Eurokodzie 7 (tabela A.17) wartości współczynników do oddziaływań stałych i zmiennych niekorzystnych (destabilizujących) wynoszą odpowiednio 1,35 ($\gamma_{G,dst}$) i 1,50 ($\gamma_{Q,dst}$), natomiast do oddziaływań stałych korzystnych (stabilizujących) 0,90 ($\gamma_{Q,stb}$). Według Franka i in. (2004) oraz Orra (2005) współczynnik bezpieczeństwa w przypadku sprawdzania stanu granicznego HYD powinien wynosić co najmniej 1,50.

Wykorzystanie siatki hydrodynamicznej do określenia sił filtracji

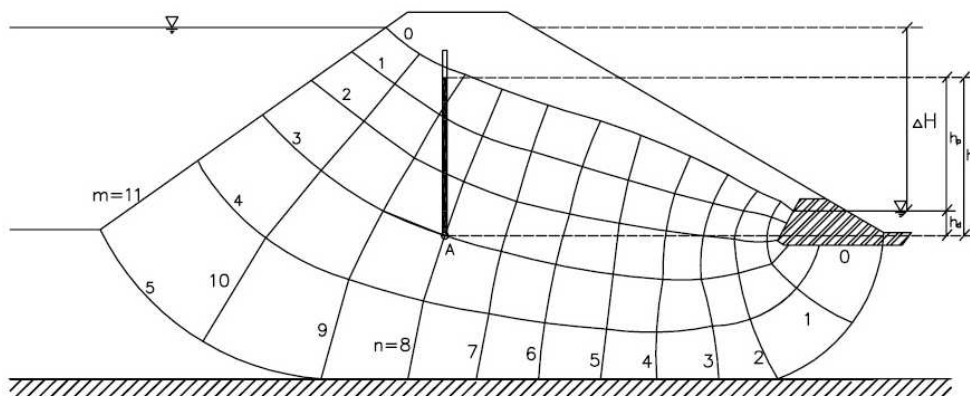
W sprawdzaniu stanu granicznego HYD, do określenia sił filtracji niezbędnych w sprawdzaniu stanu granicznego HYD może być wykorzystana siatka hydrodynamiczna (Anderson, Dunn i Kiefer, 1980, Smith, 1990, Craig, 1992, Gołębiowska, 2004). Przy opracowaniu siatki filtracyjnej należy określić warunki brzegowe, to znaczy dwie prostopadłe

Etap I – Wykreślenie siatki filtracyjnej (rys. 1)

Etap II – Wyznaczenie ciśnienia wody w porach, jako równe ciśnieniu piezometrycznemu w rozpatrywanym punkcie (h_u), ze wzoru:

$$h_u = h_d + h_p \quad (3)$$

h_d – wysokość ciśnienia od poziomu wody dolnej, równa głębokości położenia punktu, w którym określane jest ciśnienie poniżej zwierciadła wody dolnej [m],



RYSUNEK 1. Schemat siatki filtracyjnej
FIGURE 1. Scheme of the flow net

skrajne linie jednakowego naporu i prądu. Stosunek długości i szerokości odcinków środkowych w każdym elemencie siatki powinien być wielkością stałą. Siatki hydrodynamiczne (filtracyjne) dla różnych przypadków obliczeniowych przedstawionych w niniejszym artykule sporządzano drogą kolejnych przybliżeń, aż do momentu spełnienia warunków geometrycznych. Wszystkie siatki filtracyjne wykonano z wykorzystaniem programu AutoCAD.

Etapy sprawdzania stanu granicznego HYD z wykorzystaniem siatki hydrodynamicznej są następujące:

h_p – ciśnienie piezometryczne [m], wyznaczane ze wzoru:

$$h_p = \frac{\Delta H \cdot n}{m} \quad (4)$$

ΔH – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej [m],

n – linia jednakowego naporu (ekwipotencjalna), na której znajduje się punkt, w którym przeprowadzane są obliczenia [-],

m – numer ostatniej linii jednakowego naporu [-].

Ciśnienie wody w porach można obliczyć w kPa ze wzoru:

$$u = h_u \cdot \gamma_w \quad (5) \quad \gamma - \text{ciężar objętościowy gruntu [kN/m}^3\text{]}.$$

gdzie:

γ_w – ciężar objętościowy wody (powszechnie przyjmuje się 10 kN/m³).

Etap III – Wyznaczenie gradientu (spadku) hydraulicznego ze wzoru:

$$i = \frac{\Delta H}{m \cdot \Delta l} \quad (6)$$

gdzie:

i – gradient hydrauliczny [-],

Δl – odległość między sąsiednimi liniami jednakowego naporu [m],

pozostałe oznaczenia podano w opisie wzoru (4).

Etap IV – określenie ciśnienia sphywowego – j i siły filtracji – J (według Eurokodu 7 – S_k) ze wzorów:

$$j = i \cdot \gamma_w \quad (7)$$

$$J = i \cdot \gamma_w \cdot V \quad (8)$$

gdzie:

j – ciśnienie sphywowe [kPa],

J – siła filtracji [kN],

V – objętość gruntu, na którą działa siła filtracji [m³].

Do określenia naprężeń całkowitych – σ można wykorzystać wzory:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (9)$$

$$\sigma' = (\gamma - \gamma_w) \cdot h \quad (10)$$

gdzie:

σ – naprężenie całkowite [kPa],

σ' – naprężenie efektywne [kPa],

u – ciśnienie wody w porach [kPa],

h – odległość od powierzchni terenu do punktu, w którym obliczane jest naprężenie [m],

Etap V – Obliczenie sił destabilizujących i stabilizujących

– Do obliczenia sił destabilizujących stosuje się następujące wzory:

$$E_{d,dst} = \gamma_{dst} \cdot u_k \quad (11)$$

lub

$$E_{d,dst} = \gamma_{dst} \cdot S_k \quad (12)$$

gdzie:

γ_{dst} – współczynnik częściowy do oddziaływań destabilizujących, $\gamma_{dst} = 1,35$.

– Do obliczenia sił stabilizujących stosuje się następujące wzory:

$$E_{d,stab} = \gamma_{stab} \cdot \sigma_k \quad (13)$$

lub

$$E_{d,stab} = \gamma_{stab} \cdot G^2_k \quad (14)$$

gdzie:

γ_{stab} – współczynnik częściowy do oddziaływań stabilizujących, $\gamma_{stab} = 0,9$,

σ_k – naprężenie całkowite [kPa].

Bond i Harris (2008) zaproponowali, aby końcowe wyniki sprawdzania stanów granicznych wyrażać za pomocą stopnia wykorzystania według:

– Określenia stopnia wykorzystania na podstawie u_k i σ_k (wariant 1):

$$\Lambda_{HYD} = \frac{\gamma_{dst} \cdot u_k}{\gamma_{stab} \cdot \sigma_k} \quad (15)$$

– Określenia stopnia wykorzystania na podstawie S_k i G^2_k (wariant 2):

$$\Lambda_{HYD} = \frac{\gamma_{dst} \cdot S_k}{\gamma_{stab} \cdot G^2_k} \quad (16)$$

Etap VI – Wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa – F

W dotychczasowej praktyce do sprawdzenia stanu granicznego hydraulicznego wypiętrzenia stosowano następujący wzór do określenia współczynnika bezpieczeństwa:

$$F = \frac{i_{kr}}{i_k} \quad (17)$$

gdzie:

i_{kr} – krytyczny spadek hydrauliczny, według Craiga (1992), $i_{kr} = 1$,

i_k – spadek hydrauliczny wyznaczony na podstawie siatki hydrodynamicznej [-].

Przykłady obliczeniowe

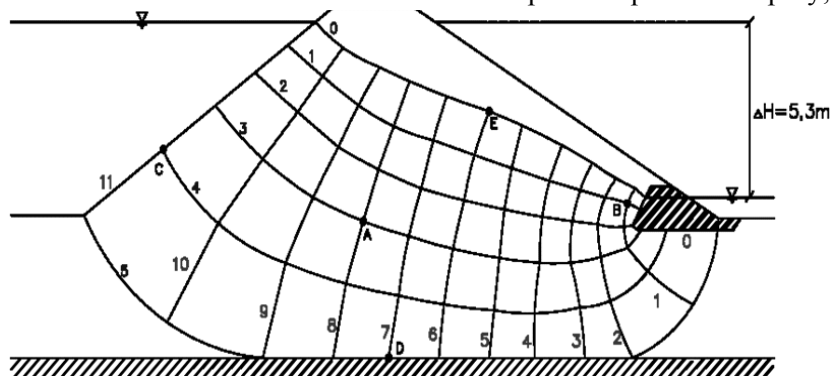
Sprawdzenie stanu granicznego z wykorzystaniem siatki hydrodynamicznej

Obliczenia stanu granicznego HYD spowodowanego hydraulicznym unoszeniem cząstek gruntu przeprowadzono, przyjmując siedem schematów filtracji wody przez zapory ziemne. Na rysunku

2–8 przedstawiono siatki filtracyjne wykreślone dla następujących warunków filtracji:

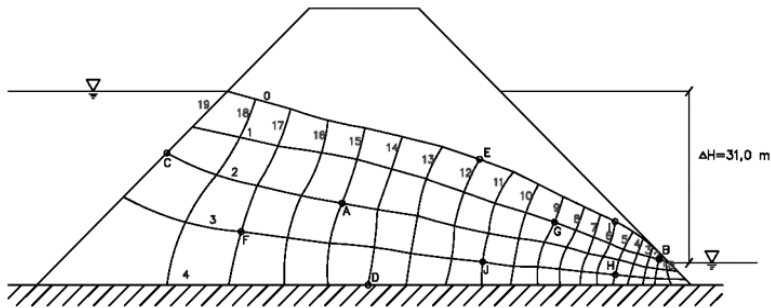
- korpus zapory i podłoże przepuszczalne (rys. 2),
- korpus zapory przepuszczalny, podłoże nieprzepuszczalne (rys. 3),
- korpus zapory przepuszczalny, podłoże nieprzepuszczalne z filtrem poziomym (rys. 4),
- korpus zapory nieprzepuszczalny, podłoże przepuszczalne (rys. 5),
- korpus zapory nieprzepuszczalny, podłoże przepuszczalne o różnych właściwościach filtracyjnych (rys. 6),
- korpus i podłoże przepuszczalne o przepuszczalności 10-krotnie mniejszej od zapory (rys. 7),
- korpus i podłoże przepuszczalne o przepuszczalności 10-krotnie większej od zapory (rys. 8).

Do sprawdzenia stanów granicznych zapory przepuszczalnej na podłożu przepuszczalnym wytypowano pięć punktów: A, B, C, D, E, których lokalizację przedstawiono na rysunku 2. W pozostałych obliczeniach sprawdzano stany graniczne w 10 punktach zlokalizowanych w korpusie i podłożu zapory; punkty



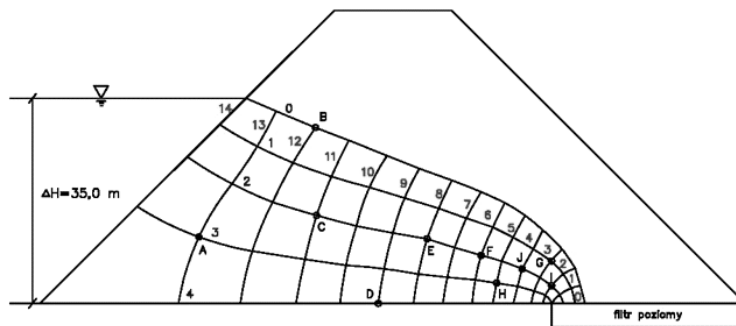
RYSunEK 2. Siatka hydrodynamiczna obszaru filtracji wody przez korpus i podłoże zapory (Sieczka, 2013)

FIGURE 2. Flow net of water seepage through dam body and dam foundation (Sieczka, 2013)



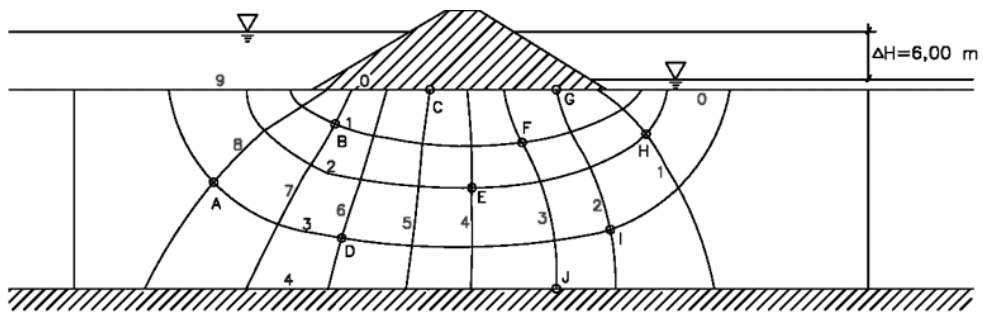
RYSUNEK 3. Siatka hydrodynamiczna obszaru filtracji wody przez korpus zapory – podłoże nieprzepuszczalne (Sieczka, 2013)

FIGURE 3. Flow net of water seepage through dam body – impermeable foundation (Sieczka, 2013)



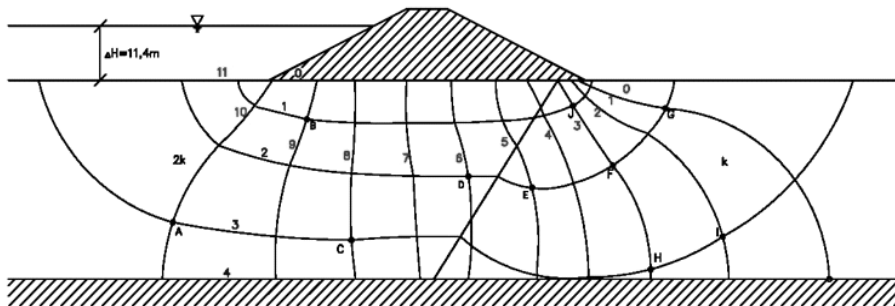
RYSUNEK 4. Siatka hydrodynamiczna obszaru filtracji wody przez korpus zapory z filtrem poziomym – podłoże nieprzepuszczalne (Sieczka, 2013)

FIGURE 4. Flow net of water seepage through dam body with horizontal filter – impermeable foundation (Sieczka, 2013)

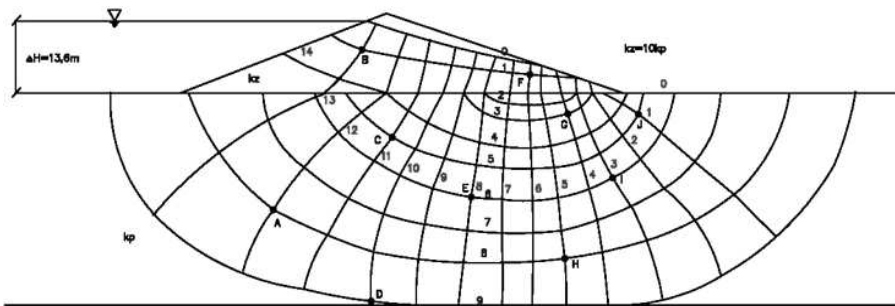


RYSUNEK 5. Siatka hydrodynamiczna obszaru filtracji wody przez podłoże zapory – korpus nieprzepuszczalny (Sieczka, 2013)

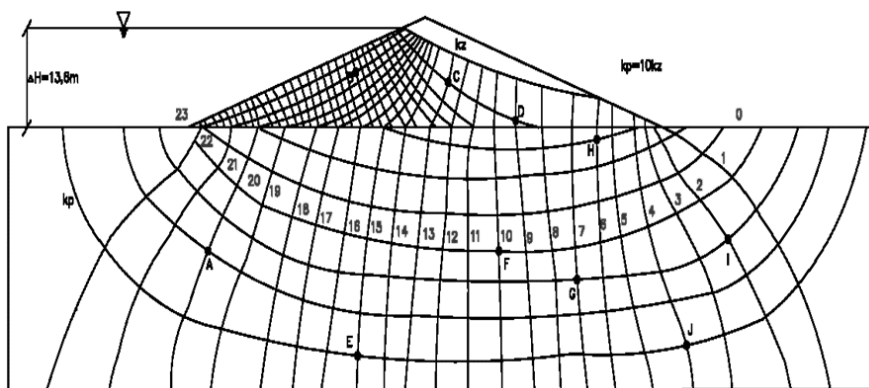
FIGURE 5. Flow net of water seepage through dam foundation – impermeable dam body (Sieczka, 2013)



RYSUNEK 6. Siatka hydrodynamiczna obszaru filtracji wody przez podłoże zapory zbudowane z gruntów o różnym współczynniku filtracji – korpus zapory nieprzepuszczalny (Sieczka, 2013)
 FIGURE 6. Flow net of water seepage through dam foundation with different coefficients of soil permeabilities – impermeable dam body (Sieczka, 2013)



RYSUNEK 7. Siatka hydrodynamiczna obszaru filtracji wody przez korpus i podłoże o przepuszczalności 10-krotnie mniejszej od zapory (Sieczka, 2013)
 FIGURE 7. Flow net of water seepage through dam and dam foundation with permeability 10-times lower than dam body (Sieczka, 2013)



RYSUNEK 8. Siatka hydrodynamiczna obszaru filtracji wody przez korpus i podłoże o przepuszczalności 10-krotnie większej od zapory (Sieczka, 2013)
 FIGURE 8. Flow net of water seepage through dam and dam foundation with permeability 10-times higher than dam body (Sieczka, 2013)

obliczeniowe zaznaczono na rysunkach 3–8.

W obliczeniach stanu granicznego zapory przepuszczalnej na podłożu przepuszczalnym przyjęto, że zarówno zapora, jak i jej podłoże zbudowane są z piasków średnich o współczynniku filtracji $-k = 2,3 \cdot 10^{-3}$ m/s i porowatości $-n = 0,34$.

Dane niezbędne do sprawdzenia stanu granicznego HYD w punkcie A odczytano z rysunku 2 wykonanego w skali: $\Delta H = 5,3$ m, $h_d = 0,72$ m, $n = 8$, $m = 11$, $\Delta l = 1,6$ m, $h_p = 6,48$ m.

Sprawdzanie stanu granicznego HYD w punkcie A wykonywano zgodnie z procedurą opisaną w części trzeciej artykułu. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Sprawdzanie stanu granicznego HYD w pozostałych punktach (B–D) przeprowadzono analogicznie do punktu A. Dane wyjściowe oraz wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

W punkcie B zapory współczynnik bezpieczeństwa $F = 1,04$ jest mniejszy od wymaganego $F = 1,50$, podawanego w literaturze (Frank i in., 2004, Orr, 2005) oraz współczynnik wykorzystania (wariant 2) jest większy od 100%. Wyniki te świadczą o możliwości wystąpienia stanu granicznego HYD w tym punkcie zapory.

Sprawdzanie stanu granicznego HYD dla wcześniej wymienionych przypadków zapór, podobnie jak we wcześniejszym przykładzie, wykonywano zgodnie z metodyką opisaną w trzeciej części artykułu. W rezultacie otrzymano

TABELA 1. Sprawdzanie stanu granicznego HYD w punkcie A zapory
TABLE 1. Checking the limit state of hydraulic failure in A point of earth dam

Parametr/Parameter	Symbol	Jednostka/ Unit	Wynik/ Result
Ciśnienie wody w porach/Pore pressure	u_k	kPa	45,70
Gradient hydrauliczny/Hydraulic gradient	i_k	–	0,30
Współczynnik bezpieczeństwa/Factor of safety	F	–	3,33
Siła filtracji/Seepage force	S_k	kN	7,68
Naprężenie całkowite/Total stress	σ_k	kPa	123,26
Ciężar gruntu z uwzględnieniem wyporu/Weight of the soil including buoyancy	G'_k	kN	33,02
Siła destabilizująca z wykorzystaniem u_k /Destabilizing force using u_k	E_{d-dst}	kPa	67,70
Siła stabilizująca z wykorzystaniem σ_k /Stabilizing force using σ_k	E_{d-stb}	kPa	110,93
Stopień wykorzystania z uwzględnieniem u_k i σ_k /Degree of utilization including u_k and σ_k	Λ_{HYD}	%	61
Siła stabilizująca z wykorzystaniem G'_k /Stabilizing force using G'_k	E_{d-stb}	kPa	29,72
Siła destabilizująca z wykorzystaniem S_k /Destabilizing force using S_k	E_{d-dst}	kPa	10,37
Stopień wykorzystania z uwzględnieniem G'_k i S_k /Degree of utilization including G'_k and S_k	Λ_{HYD}	%	35

TABELA 2. Wyniki sprawdzania stanu granicznego HYD w punktach B, C, D, E zapory przepuszczalnej na podłożu przepuszczalnym
 TABLE 2. Results of checking the limit state of hydraulic failure HYD in B, C, D, E points of earth dam

Parametr/Parameter	Jednostka/ /Unit	B	C	D	E
h_d	m	0,18	1,46	4,86	2,61
n	–	1	11	7	6
m	–	11	11	11	11
Δl	m	0,5	2,6	1,7	1,3
h_1	m	0,89	0,00	1,95	1,57
h_2	m	0,56	3,85	8,67	2,61
h_u	m	0,66	3,84	8,23	0,28
u_k	kPa	6,618	38,400	82,327	2,809
i_k	–	0,964	0,185	0,283	0,371
F	–	1,04	5,40	3,53	2,70
j_k	kN	9,636	1,853	2,834	3,706
J_k	kPa	2,409	12,527	8,191	6,264
σ'_k	kPa	22,675	36,575	120,390	55,410
σ_k	kPa	29,293	74,975	202,717	58,219
G'_k	kN	3,225	87,204	37,281	21,801
$E_{d\text{-dst}}(u_k)$	kPa	8,935	51,840	111,142	3,792
$E_{d\text{-stb}}$	kPa	26,364	67,478	182,446	52,397
Λ_{HYD} (wariant 1)	%	34	77	61	7
$E_{d\text{-stb}}(G'_k)$	kPa	2,903	78,484	33,553	19,621
$E_{d\text{-dst}}(S_k)$	kPa	3,252	16,912	11,058	8,456
Λ_{HYD} (wariant 2)	%	112	22	33	43

stopnie wykorzystania (Λ_{HYD}) w dwóch wariantach: wariant 1 uwzględniającym ciśnienie wody w porach i naprężenie pionowe oraz wariant 2 uwzględniającym siłę filtracji i ciężar gruntu z uwzględnieniem wyporu, na których podstawie można wnioskować o możliwości wystąpienia stanu granicznego spowodowanego hydraulicznym unoszeniem cząstek gruntu w analizowanych punktach korpusu i/lub podłoża zapory. Wyniki obliczeń sprawdzania stanu granicznego HYD dla schematów filtracji

przedstawionych na rysunkach 3–8 zestawiono w tabeli 3.

Sprawdzenie stanu granicznego metodą Terzagiego i Pecka

Według metody Terzagiego i Pecka (1961), możliwość wystąpienia stanu granicznego sprawdza się, obliczając tzw. współczynnik bezpieczeństwa jako stosunek ciężaru gruntu z uwzględnieniem wyporu do siły filtracji:

$$F = \frac{G'_k}{S_k} \quad (18)$$

gdzie:
 F – współczynnik bezpieczeństwa [-],

G'_k – ciężar gruntu z uwzględnieniem
wyporu [kN/m],
 S_k – siła filtracji [kN/m].

TABELA 3. Zestawienie wyników sprawdzania stanu granicznego HYD dla schematów filtracji przedstawionych na rysunkach 3–8

TABLE 3. List of checking the limit state of hydraulic failure for seepage schemes presented on figures 3–8

Punkt obliczeniowy/Calculation point	Stopień wykorzystania/Degree of utilization	Przypadek obliczeniowy/Calculation case					
		Korpus zapory (rys. 3)/ Dam body (Fig. 3)	Korpus zapory z filtrem poziomym (rys. 4)/Dam body with horizontal filter (Fig. 4)	Podłoże zapory (rys. 5)/ Dam foundation (Fig. 5)	Podłoże zapory z gruntów o różnym współczynniku filtracji (rys. 6)/ Dam foundation with different coefficients of soil permeabilities (Fig. 6)	Korpus i podłoże o przepuszczalności 10-krotnie mniejszej od zapory (rys. 7)/Dam body and dam foundation with permeability 10-times lower than dam body (Fig. 7)	Korpus i podłoże o przepuszczalności 10-krotnie większej od zapory (rys. 8)/Dam body and dam foundation with permeability 10-times higher than dam body (Fig. 8)
A	Δ HYD1	30	61	93	72	80	91
	Δ HYD2	24	35	9	6	9	9
B	Δ HYD1	80	4	85	75	69	93
	Δ HYD2	136	45	16	13	17	43
C	Δ HYD1	51	31	29	65	63	21
	Δ HYD2	17	42	14	8	19	23
D	Δ HYD1	42	36	77	52	71	43
	Δ HYD2	28	49	9	9	12	13
E	Δ HYD1	3	18	49	66	70	72
	Δ HYD2	32	59	10	13	19	13
F	Δ HYD1	64	15	48	81	67	64
	Δ HYD2	23	76	11	18	53	13
G	Δ HYD1	48	1	35	81	76	70
	Δ HYD2	43	83	13	10	37	13
H	Δ HYD1	64	19	80	78	76	69
	Δ HYD2	70	79	8	8	15	21
I	Δ HYD1	50	6	79	77	80	75
	Δ HYD2	59	126	9	8	18	9
J	Δ HYD1	41	11	70	76	83	76
	Δ HYD2	33	88	10	41	18	8

Z obliczeń wzorem (18) uzyskano dla wszystkich analizowanych schematów zapór wartości współczynników bezpieczeństwa większe od 2,5, co świadczy, że w zaporach tych nie wystąpi stan graniczny HYD.

Wnioski

Zaproponowane w Eurokodzie 7 dwa wzory do sprawdzenia stanu granicznego HYD nie są równorzędne. W przypadku stosowania wzoru (1) we wszystkich sprawdzanych punktach uzyskano wartości stopnia wykorzystania mniejsze od 100%, co świadczy o bezpiecznym stanie analizowanych zapór. W przypadku zastosowania wzoru (2) uzyskano w kilku punktach zapory wartości stopnia wykorzystania większe od 100%. Punkty, w których wartości stopnia wykorzystania są większe od 100% występują w strefie odpowietrznej zapory lub podłoża. Wartości stopnia wykorzystania zależą nie tylko od zastosowanego wzoru, ale również od schematu analizowanej zapory.

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych obliczeń, należy uznać za zasadny wniosek o podaniu w załączniku krajowym Eurokodu 7 warunków i zakresów stosowania proponowanych wzorów do sprawdzenia stanu granicznego HYD – unoszenie cząstek gruntu.

Z obliczeń metodą Terzagiego i Pecka uzyskane współczynniki bezpieczeństwa $F > 2,5$ świadczą o bezpiecznym stanie analizowanych zapór.

Literatura

- Anderson, L.R., Dunn, I.S. i Kiefer, F.W. (1980). *Fundamentals of geotechnical analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Bond, A.J., Harris, A.J. (2008). *Decoding Eurocode 7*. London: Taylor and Francis.
- Craig, R.F. (1992). *Soil Mechanics. 5th ed.* London: Chapman and Hall.
- Dąbska, A., Gołębiewska, A. (2012). *Podstawy geotechniki. Zadania według Eurokodu 7*. Warszawa: Wydawnictwo OW.PW.
- Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T. i Schuppener, B. (2004). *Designers' guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical design – General rules*. London: Thomas Telford Ltd.
- Gołębiewska, A. (2004). *Mechanika gruntów*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Orr, T.L.L. (2005). *Proceedings of the International Workshop on the Evaluation of Eurocode 7*. Dublin: Trinity College Dublin.
- PN-EN 1997-1: 2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- Sieczka, A. (2013). *Sprawdzanie stanów granicznych budowli piętrzących wodę według Eurokodu 7*. (Praca magisterska). Warszawa: Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
- Smith, G.N. i Smith, I.G.N. (1990). *Elements of Soil Mechanics. 7th ed.* Edinburgh: Blackwell Science.
- Terzaghi, K. i Peck, R. (1961). *Die Bodenmechanik in der Baupraxis*. Berlin: Springer Verlag.

Streszczenie

Stan graniczny zniszczenia hydraulicznego HYD w zaporach ziemnych według Eurokodu 7. W artykule podano zasady sprawdzania stanu granicznego HYD – hydraulicznego unoszenia cząstek gruntu zgodnie z zaleceniami Eurokodu 7 i przykłady obliczeń projektowych dla różnych

warunków filtracji wody przez zapory ziemne. W obliczeniach siedmiu schematów filtracji wody do określenia sił filtracji wykorzystano siatki hydrodynamiczne (filtracyjne) wykreślone za pomocą programu AutoCAD. Poza tym, w sprawdzaniu stanów granicznych HYD zastosowano metodę zaproponowaną przez Terzagiego i Pecka (1961). Wyniki obliczeń wskazują na konieczność podania w załączniku krajowym Eurokodu 7 warunków stosowania wzorów podanych w Eurokodzie 7 jako równorzędne.

Summary

Limit state of hydraulic failure HYD in earth dams according to Eurocode 7. This paper presents rules for verification of limit state HYD – hydraulic failure in accordance with the recommendations of Eurocode

7 and examples of design calculations. To determine the seepage forces the seven patterns of water flow through the dams were used. The seepage grids were plotted using AutoCAD. Moreover, in checking the limit state HYD the method proposed by Terzaghi and Peck (1961) was applied. The calculations presented in this paper showed different results. Therefore, the scope of proposed formulas for checking the limit state HYD should be specified in the national appendix.

Authors' address:

Anna Sieczka, Kazimierz Garbulewski
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
e-mail: anna_sieczka@sggw.pl
kazimierz_garbulewski@sggw.pl
Poland