

WODOPRZEPUSZCZALNOŚĆ GRUNTÓW SKARPY ABRAZYJNEJ ZBIORNIKA CZORSZTYN-NIEDZICA

Eugeniusz Zawisza, Kamil Klimek

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Artykuł zawiera wyniki badań wodoprzepuszczalności gruntów budujących skarpy abrazyjne fragmentu północnych obrzeży zbiornika czorsztyńskiego od strony Pienińskiego Parku Narodowego. Charakterystykę podstawowych właściwości geotechnicznych badanych gruntów opracowano na podstawie wyników badań wykonanych według procedur standardowych. Badania wodoprzepuszczalności gruntów wykonano metodami: polową według Giryńskiego w wykopach badawczych, laboratoryjną w aparacie średniowymiarowym oraz analityczną z zastosowaniem wzorów empirycznych opartych głównie na znajomości uziarnienia i porowatości gruntów. Analizę wyników badań przeprowadzono w aspekcie określenia optymalnej metody oznaczania wodoprzepuszczalności gruntów skarp abrazyjnych przedmiotowego obiektu oraz maksymalnej bezpiecznej prędkości obniżania poziomu wody w zbiorniku. Stwierdzono, że najbardziej właściwą metodą oznaczania wodoprzepuszczalności przedmiotowych gruntów była metoda Giryńskiego. Maksymalna dopuszczalna prędkość obniżania wody w zbiorniku powinna wynosić $0,103 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$.

Słowa kluczowe: zbiorniki wodne, abrazja, filtracja

WSTĘP

Zbiornik Czorsztyn-Niedzica należy do największych w Polsce zbiorników wodnych powstałych poprzez przegrodzenie rzeki zaporą ziemną. Utworzony został przez spiętrzenie wód górskiej rzeki Dunajec, gdzie ze względu na duże naturalne nachylenie zboczy mogą występować zjawiska erozji i abrazji prowadzące do utraty stateczności. Jedną z podstawowych właściwości gruntów zalegających w strefie skarp abrazyjnych i mających istotny wpływ na zachowanie się również wyżej położonych części zboczy, jest ich wodoprzepuszczalność. Prawidłowe oznaczenie wartości współczynnika wodo-

Adres do korespondencji – Corresponding autor – Eugeniusz Zawisza, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; Kamil Klimek – absolwent Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie; e-mail: kiwig@ur.krakow.pl, kiwig@ur.krakow.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

przepuszczalności (filtracji) ma zasadnicze znaczenie dla określenia dopuszczalnej prędkości obniżania poziomu wody w górskich zbiornikach zaporowych. Prędkość obniżania poziomu wody w zbiorniku ma wpływ na wystąpienia zjawiska ciśnienia spływowego, od którego zależy z kolei możliwość erozji zboczy poddanych jej działaniu i w konsekwencji utrata stateczności [Wacławski 1986].

Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy było określenie współczynnika filtracji gruntów zalegających w skarpach abrazyjnych wybranych fragmentów obrzeży zbiornika Czorsztyn-Niedzica od strony Pienińskiego Parku Narodowego i podanie optymalnej metody oznaczania tego parametru dla tego obiektu. Badania te stanowią kontynuację wcześniejszych badań prowadzonych przez Katedrę Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, a dotyczących określenia wpływu warunków geologicznych, geotechnicznych i hydrodynamicznych na procesy abrazji skarpi zbiornika czorsztyńskiego [Koziełska-Sroka i in. 2010, Zydroń i in. 2010]

MATERIAŁY I METODY

Zakres prac badawczych obejmował badania terenowe i laboratoryjne oraz obliczenia analityczne przy zastosowaniu wzorów empirycznych. Badania terenowe zlokalizowano na północnym brzegu zbiornika Czorsztyn-Niedzica stanowiącym zarazem południową granicę Pienińskiego Parku Narodowego. Wyznaczono dwa przekroje badawcze, z których pierwszy oddalony był o około 300 m od zapory czołowej zbiornika, a drugi o 85 m dalej (ryc. 1). W każdym przekroju wykonano wykop badawczy oddalony o około 15 m od granicy zwierciadła wody (ryc. 2). Skarpy abrazyjne oddalone były o około 3 m od wykopów badawczych. W wykopach tych o wymiarach około $1,0 \times 1,5 \times 1,0$ m przeprowadzono badania gęstości objętościowej i współczynnika filtracji oraz pobrano próbki gruntów do badań laboratoryjnych.

Badania współczynnika filtracji przeprowadzono metodą Giryńskiego. Z powierzchni dna wykopu zagłębiono cylinder stalowy o średnicy wewnętrznej 38 cm na głębokość 25 cm (ryc. 3). Po wyrównaniu powierzchni gruntu wewnątrz cylindra wciśnięto go jeszcze 2 cm, po czym pokryto dno warstwą żwirku o grubości również 2 cm. Następnie doprowadzono wodę ze zbiornika ustawionego na brzegu wykopu, regulując wielkość dopływu wody do stabilizacji słupa wody w cylindrze na wysokości około 30 cm. Wówczas ilość wody infiltrującej w grunt jest równa wielkości wypływu wody ze zbiornika. Podczas badań dokonywano pomiarów temperatury wody. Współczynnik filtracji określono ze wzoru:

$$k_T = 10^{-5} \cdot Q \cdot \xi, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

k_T – współczynnik filtracji przy temperaturze wody T ,

Q – ustalony wypływ wody z cylindra, $\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,

ξ – współczynnik zależny od ustalonej wysokości słupa wody H w cylindrze, powiększonej o wartość podsiąku kapilarnego h_K oraz od średnicy cylindra.

Przyjęto: $H + h_K = 0,30$ m i dla tej wartości przyjęto $\xi = 2,42$ (dla średnicy cylindra 38 cm) [Michalski i Kawalec 1998].



Ryc. 1. Lokalizacja przekrojów badawczych

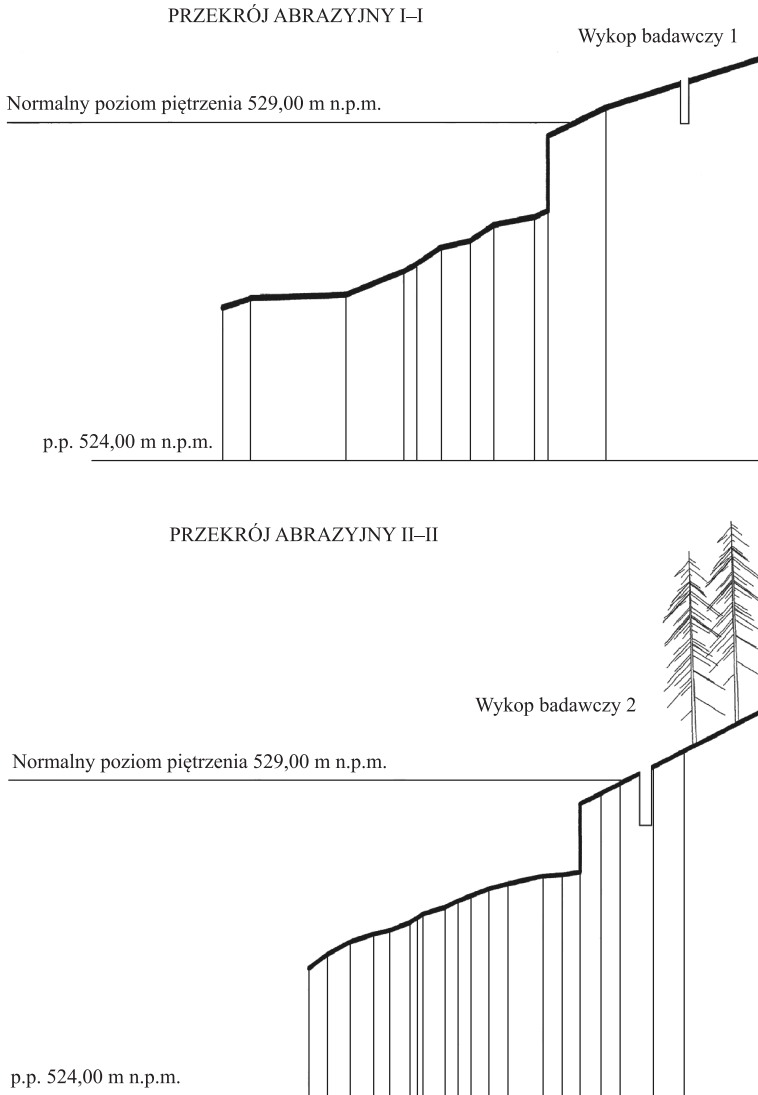
Fig. 1. Location of the test cross-sections

Wartość współczynnika filtracji przeliczono dla umownej temperatury 10°C ze wzoru:

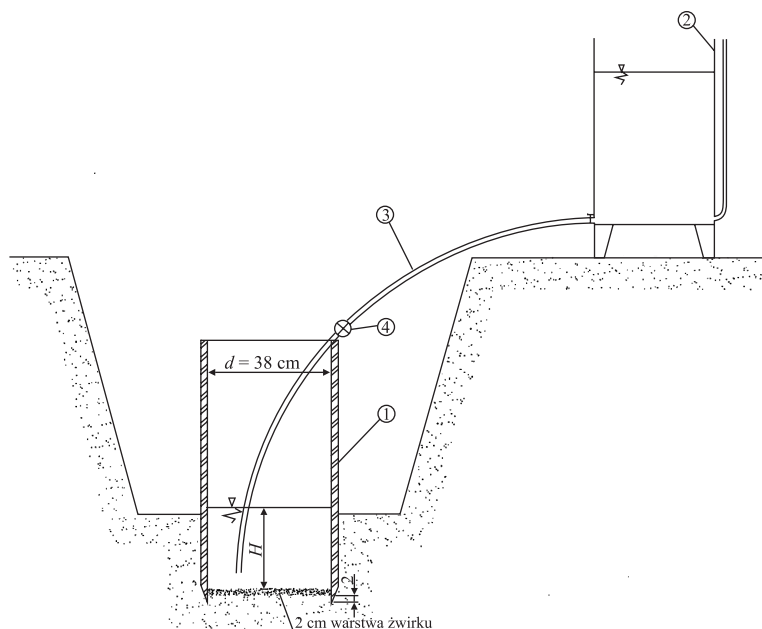
$$k_{10} = \frac{k_T}{0,7 + 0,03T}, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2)$$

Badania laboratoryjne wykonane według procedur standardowych [Myślińska 1998, Wiłun 2000], obejmowały oznaczanie składu granulometrycznego, wilgotności naturalnej, granic konsystencji oraz parametrów zagęszczalności i wodoprzepuszczalności. Skład granulometryczny oznaczono metodą sitową z przemywaniem „na mokro” dla frakcji grubszych od 0,063 mm oraz areometryczną dla frakcji drobniejszych. Wilgotność naturalną oznaczono metodą suszarkową w temperaturze 105°C. Granice konsystencji oznaczono dla frakcji mniejszej od 2 mm: plastyczności metodą walczkowania, płynności metodą Casagrandego. Parametry zagęszczalności i wodoprzepuszczalności ze względu na zawartość w gruncie okruchów odpowiadających frakcji

zwirowej, oznaczono w aparatach średniowymiarowych na materiale o uziarnieniu mniejszym od 40 mm. Udział frakcji grubszej od 40 mm był stosunkowo nieduży (6%) dlatego można przyjąć, że parametry oznaczone na materiale o $d < 40$ mm są miarodajne dla gruntu o pełnym uziarnieniu. Maksymalną gęstość objętościową szkieletu i wilgotność optymalną oznaczono w średniowymiarowym aparacie Proctora o objętości cylindra $9,8 \text{ dm}^3$ ($h = 20 \text{ cm}$, $d = 25 \text{ cm}$), stosując standardową energię zagęszczenia ($E_z = 0,59 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$).



Ryc. 2. Przekroje badawcze z lokalizacją wykopów badawczych
Fig. 2. Cross-sections with location of research open pits



Ryc. 3. Schemat do oznaczania współczynnika filtracji metodą Girynskiego

1 – cylinder pomiarowy, 2 – zbiornik z rurką miarową, 3 – przewody gumowe, 4 – zacisk regulacyjny

Fig. 3. Scheme for determination of permeability coefficient by Girynski method

1 – measuring cylinder, 2 – tank with a measuring pipe, 3 – rubber hose, 4 – regulatory clamp

Współczynnik filtracji oznaczono w średniowymiarowym aparacie (ryc. 4), którego cylinder ma średnicę i wysokość po 36 cm i jest wyposażony w oprzyrządowanie do doprowadzania i odprowadzania wody, filtry rusztowe i króćce z rurkami piezometrycznymi. Próbkę formowano w cylindrze przez zagęszczanie gruntu warstwami o grubości 6 cm do łącznej wysokości 36 cm, do uzyskania wskaźnika zagęszczenia o wartości $I_s = 0,89$, odpowiadającego zagęszczeniu gruntu w warunkach naturalnych. Pomiary filtracji prowadzono przy dwu kierunkach przepływu wody przez próbkę: z dołu do góry (dla usunięcia pęcherzyków powietrza z próbki) oraz z góry na dół. Wartość współczynnika filtracji określono jako średnią z uzyskanych przy obydwu kierunkach przepływu, po jego ustabilizowaniu się przy stałym spadku hydraulicznym. Szczegółowy tok procedury badawczej oraz wymagane warunki, jakie spełnia aparat przy badaniu gruntów gruboziarnistych podano m.in. w pracy Zawiszy [2012]. Współczynnik filtracji obliczono ze wzoru:

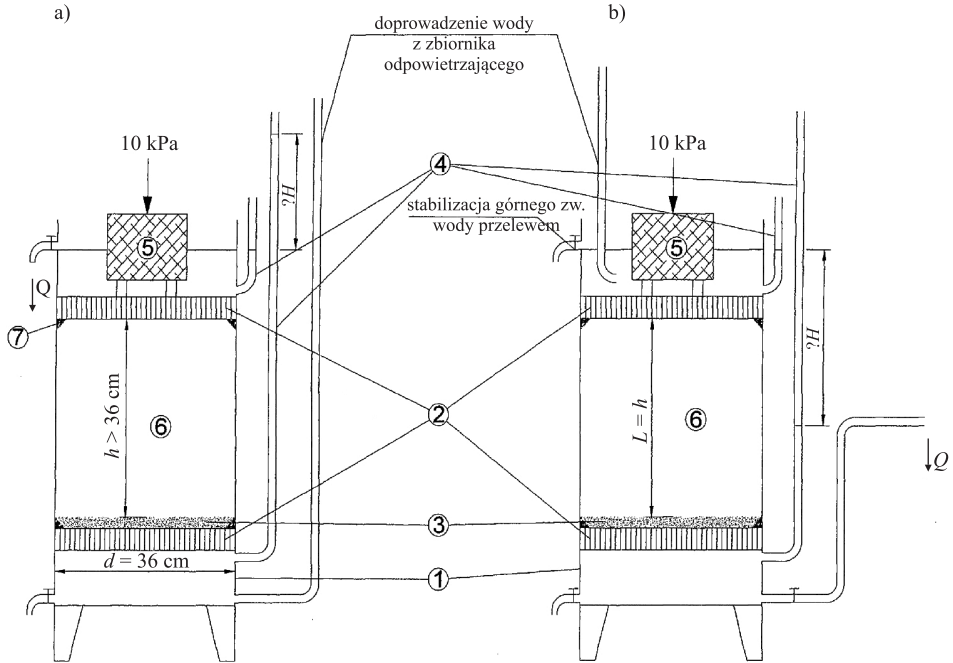
$$k_T = \frac{Q}{A \cdot I \cdot t}, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3)$$

gdzie:

k_T – współczynnik filtracji dla wody o danej temperaturze, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 Q – wydatek filtracji, cm^3 ,

- A – pole przekroju poprzecznego próbki, cm^2 ,
 I – spadek hydrauliczny, –,
 t – czas trwania pomiaru, s.

Uzyskaną ze wzoru (3) wartość współczynnika filtracji przeliczono do normowej temperatury 10°C według wzoru (2).



Ryc. 4. Schemat średniowymiarowego aparatu do oznaczania współczynnika filtracji: a) przepływ wody z dołu do góry, b) przepływ wody z góry do dołu, 1 – cylinder stalowy, 2 – ruszty stalowe z siatką, 3 – warstwa żwirku, 4 – rurki szklane, 5 – obciążenie, 6 – badany materiał, 7 – uszczelnienie krawędziowe.

Fig. 4. Scheme of medium size apparatus for permeability tests: a) water flow from bottom to top, b) water flow from top to bottom, 1 – steel cylinder, 2 – steel grates with mesh, 3 – gravel layer, 4 – glass tubes, 5 – load, 6 – material tested, 7 – edge sealing

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Skład granulometryczny próbek z obydwu wykopów był bardzo zbliżony i kwalifikuje badane grunty pod względem geotechnicznym jako pospółki gliniaste (wg PN-86/B-02480) lub ropy pyłaste ze żwirem (wg PN-EN ISO 14688-2:2006) (tab. 1). Uśrednione zawartości poszczególnych frakcji wynosiły: żwirowej ponad 34%, piaskowej ponad 18%, pyłowej ponad 38% a ilowej ponad 9%. Duża zawartość frakcji drobnych ($f_{\pi} + f_i > 46\%$) wskazuje na podatność gruntów na ich wymywanie, co może wpływać znacząco na procesy erozyjne powodujące abrazję skarp. Wskaźnik różnoziar-

nistości wynosił ponad 357 co świadczy, że są to grunty bardzo różnoziarniste. Odnosząc uzyskane wyniki do wyników wcześniejszych badań prowadzonych na analizowanym obrzeżu zbiornika, można stwierdzić, że są one ogólnie zbliżone [Koziełska-Sroka i in. 2010]. Według cytowanych badań skarpy abrazyjne budują grunty gruboziarniste – od rumoszy gliniastych do pospółek gliniastych o zawartości frakcji [wg PN-86/B-02480]: kamienistej od 0–17%, żwirowej od 8–50%, piaskowej od 12–61% i ilowej od 6–10%.

Tabela 1. Charakterystyka geotechniczna badanych gruntów
Table 1. Geotechnical characteristics of the tested soils

Parametr – Parameter	Wykop – Open pit		Wartość średnia Mean value
	1	2	
Zawartość frakcji – Fraction content, %:			
– żwirowa – gravel 63–2 mm	34,51	34,34	34,43
– piaskowa – sand 2–0,063 mm	16,74	19,40	18,07
– pyłowa – silt 0,063–0,002 mm	38,81	37,86	38,33
– ilowa – clay <0,002 mm	9,94	8,4	9,17
Nazwa wg – Name acc.to:			
– PN-86/B-02480	Żg	Żg	Żg
– PN-EN ISO 14688-2:2006	grsiCl	grsiCl	grsiCl
Wskaźnik różnoziarnistości – Uniformity coefficient, –	366,67	291,67	357,14
Gęstość objętościowa – Bulk density, $g \cdot cm^{-3}$			1,935
Wilgotność naturalna – Natural moisture content, %			14,7
Gęstość właściwa szkieletu – Density of solid particles, $g \cdot cm^{-3}$			2,68
Gęstość objętościowa szkieletu Dry density of solid particles, $g \cdot cm^{-3}$			1,69
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu Maximum dry density of solid particles, $g \cdot cm^{-3}$			1,874
Wilgotność optymalna – Optimum moisture content, %			14,75
Wskaźnik zagęszczenia – Degree of compaction, –			0,89
Granice konsystencji – Consistency limits, %:			
– granica plastyczności – plasticity limit			40,3
– granica płynności – liquid limit			20,9
Wskaźnik plastyczności – Plasticity coefficient, %			19,4
Stopień plastyczności – Liquidity index, –			–0,32
Porowatość – Porosity, –			0,369
Wskaźnik porowatości – Porosity coefficient, –			0,59

Wilgotność naturalna (14,7%) była zbliżona do wilgotności optymalnej, co wskazuje na dobre warunki do zagęszczania gruntu w stanie naturalnym. Wartość gęstości objętościowej wynosiła około $1,94 g \cdot cm^{-3}$ i jest dość typowa dla żwirów lub pospółek gliniastych. Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego wynosiła $1,69 g \cdot cm^{-3}$, a maksymalna

gęstość objętościowa szkieletu ponad $1,87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, stąd wskaźnik zagęszczenia gruntu w stanie naturalnym określono na 0,89. Analiza makroskopowa frakcji mniejszej od 2 mm wykazała, że wypełniaczem badanych gruntów była glina piaszczysta lub pylasta. Oznaczone dla tej frakcji wartości granic konsystencji wynosiły: plastyczności – 20,9%, płynności – 40,3%. Stopień plastyczności wynosił 0,32, a więc grunt ten był w stanie półzwarłym/zwarłym. Wskaźnik porowatości przy przyjętej wartości gęstości właściwej szkieletu gruntowego równej $2,69 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ wynosił 0,59. Współczynnik filtracji, oznaczony metodą Giryńskiego w wykopach badawczych, wynosił: $3,65 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ w wykopie 1 i $2,87 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ w wykopie nr 2. Wartość współczynnika filtracji oznaczona laboratoryjnie w aparacie średniowymiarowym przy wskaźniku zagęszczenia $I_S = 0,89$, odpowiadającemu zagęszczeniu w warunkach naturalnych (w dniu wykopów badawczych, gdzie oznaczono współczynnik filtracji metodą Giryńskiego) wynosiła $1,55 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. 2). Przy bardzo dużym zagęszczeniu ($I_S = 1,0$) przepływ filtracyjny przez próbkę nie wystąpił; wartość współczynnika filtracji można oszacować na rząd wielkości $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Badania Drysia [2007] wykonane na gruncie pobranym w pobliżu wykopów badawczych i w tym samym aparacie, co prezentowany w niniejszej pracy, przy wskaźniku zagęszczenia $I_S = 0,84$ wykazały wartość współczynnika filtracji równą $9,7 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Tabela 2. Wyniki badań współczynnika filtracji gruntów skarp abrazyjnych zbiornika
Table 2. Results of tests of permeability coefficient of soils from abrasive slopes of the reservoir

Metoda – Method	Nazwa – Name	Współczynnik filtracji Permeability coefficient, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Polowa – In situ	Wykop badawczy – Open pit 1	$2,87 \cdot 10^{-5}$
	Wykop badawczy – Open pit 2	$3,65 \cdot 10^{-6}$
Laboratoryjna Laboratory	Wskaźnik zagęszczenia Compaction index	0,84
		0,89
		1,00
Analityczna wg wzoru Analytic acc. to formula	Krügera 1	$1,11 \cdot 10^{-20}$
	Krügera 2	$1,11 \cdot 10^{-6}$
	Kozeny	$4,17 \cdot 10^{-8}$
	Hazena	$8,46 \cdot 10^{-8}$
	Seelheima	$2,28 \cdot 10^{-5}$
	Zieschanga	$2,67 \cdot 10^{-8}$
	BSC	$6,70 \cdot 10^{-6}$
	Zamarina	$2,73 \cdot 10^{-7}$
	Zamarina 1	$7,33 \cdot 10^{-6}$
	Zamarina 2	$1,48 \cdot 10^{-10}$

* Dryś 2006

Wartość współczynnika filtracji określono również na drodze analitycznej z wykorzystaniem wzorów bazujących głównie na znajomości parametrów uziarnienia (średnic miarodajnych dla różnych procentowych zawartości określonych ziaren gruntu)

i porowatości. Zastosowano wzór Krügera 2, który najlepiej uwzględnia cechy uziarnienia badanego gruntu, a także wzory: Kozeny, Hazena, Seelheima, Zieschanga, BSC (Bureau of Soil Classification, USA) oraz Zamarina. Ze względu na dużą liczbę wzorów nie zostały one tutaj podane, są to jednak wzory ogólnie znane i można je znaleźć w pracach Wieczystego [1970] lub Kowalskiego [1998]. Wzory te zalecane są przeważnie dla gruntów niespoistych, równoziarnistych i raczej gruboziarnistych, tym niemniej zostały one wykorzystane w niniejszej pracy do celów porównawczych z metodą polową i laboratoryjną.

Analizując wartość współczynnika filtracji uzyskane z metod polowej, laboratoryjnej i analitycznej można stwierdzić, że charakteryzują się one dużą zmiennością (tab. 3). Wartości tego parametru oznaczane metodą polową różnią się o jeden rząd wielkości (10^{-5} i 10^{-6} m · s⁻¹), co może wynikać z różnej zawartości głównie drobnych frakcji uszczelniających – pyłowej i ilowej w punktach wykonywania badania w wykopach badawczych. Wartość omawianego parametru oznaczona metodą laboratoryjną przy wskaźniku zagęszczenia odpowiadającym warunkom naturalnym była rzędu wielkości odpowiadającej niższemu z oznaczonych metodą polową (10^{-6} m · s⁻¹). Wyniki badań laboratoryjnych wskazują na zależność współczynnika filtracji od zagęszczenia gruntu. Wartości współczynnika filtracji określone metodą analityczną przy użyciu różnych formuł empirycznych wykazały bardzo duże zróżnicowanie. Wartości otrzymane na podstawie wzoru Seelheima były tego samego rzędu jak wyższa wartość z metody polowej (10^{-5} m · s⁻¹ – wykop 1), wartości otrzymane ze wzorów Krügera 2, BSC i Zamarina 1 były tego samego rzędu jak niższa wartość z metody polowej (10^{-6} m · s⁻¹ – wykop 2) i z metody laboratoryjnej. Ze wzorów Kozeny, Hazena, Ziechanga otrzymano wartości

Tabela 3. Wyniki obliczeń maksymalnej bezpiecznej prędkości obniżania poziomu wody w zbiorniku

Table 3. Tests results of calculations of the maximum safe velocity of lowering water level in the reservoir

Spadek hydrauliczny Hydraulic gradient –	Maksymalna bezpieczna prędkość obniżania poziomu wody w zbiorniku przy współczynniku filtracji, m · s ⁻¹ Maximum safe velocity of lowering water level in the reservoir at permeability coefficient, m · s ⁻¹	
	2,87 · 10 ^{-5*}	1,55 · 10 ^{-6**}
5	1,44 · 10 ⁻⁵	2,75 · 10 ⁻⁶
2	5,74 · 10 ⁻⁵	3,10 · 10 ⁻⁶
1	2,87 · 10 ⁻⁵	1,55 · 10 ⁻⁶
0,8	2,30 · 10 ⁻⁵	1,24 · 10 ⁻⁶
0,6	1,72 · 10 ⁻⁵	9,30 · 10 ⁻⁷
0,4	1,15 · 10 ⁻⁵	6,20 · 10 ⁻⁷
0,2	5,74 · 10 ⁻⁶	3,10 · 10 ⁻⁷
0,1	2,87 · 10 ⁻⁶	1,55 · 10 ⁻⁷

* wg metody Giryńskiego przy $I_S = 0,89$ – acc. to Giryński method at $I_S = 0.89$

** wg metody laboratoryjnej przy $I_S = 0,89$ – acc. to laboratory method at $I_S = 0.89$

współczynnika filtracji zaniżone o dwa rzędy wielkości, a z wzoru Zamarina o jeden rząd wielkości niż otrzymane z metody polowej (wykop 2) i laboratoryjnej, a ze wzorów Krügera 1 i Zamarina 2 były tak zaniżone (odpowiednio rzędu $\cdot 10^{-20}$ i $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), że uznano je za nierealistyczne. Z przeprowadzonej analizy wynika, że za przydatne do wstępnego określenia współczynnika filtracji gruntów budujących skarpy abrazyjne zbiornika czorszyńskiego można uznać wzory Seelheima, Krügera 2, BSC i Zamarina 1, charakteryzujące się łatwością uzyskania danych potrzebnych do obliczeń (krzywa uziarnienia, podstawowe parametry fizyczne gruntu), jak i prostą procedurę obliczeniową.

Określenie maksymalnej bezpiecznej prędkości obniżania zwierciadła wody w zbiorniku

Dla warunków eksploatacji zbiornika ustala się maksymalną prędkość obniżania zwierciadła wody, aby nie dopuścić do wystąpienia ciśnienia spływowego w gruntach zalegających na brzegach zbiornika oraz wbudowanych w korpus zapory. Wystąpienie ciśnienia spływowego może doprowadzić do naruszenia stateczności zboczy i wpłynąć na nasilenie zjawisk erozyjnych.

Określając prędkość przepływu wody w ośrodku gruntowym:

$$V = k \cdot i, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4)$$

gdzie:

k – współczynnik filtracji, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

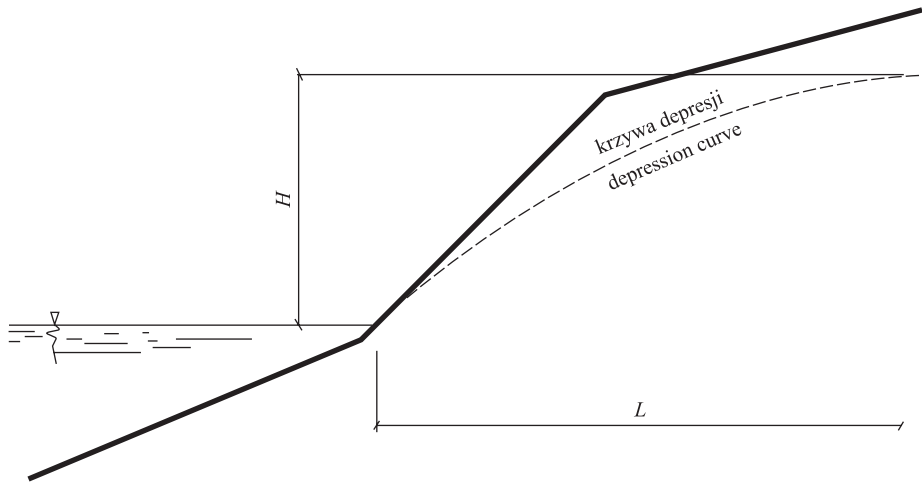
i – spadek hydrauliczny

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (5)$$

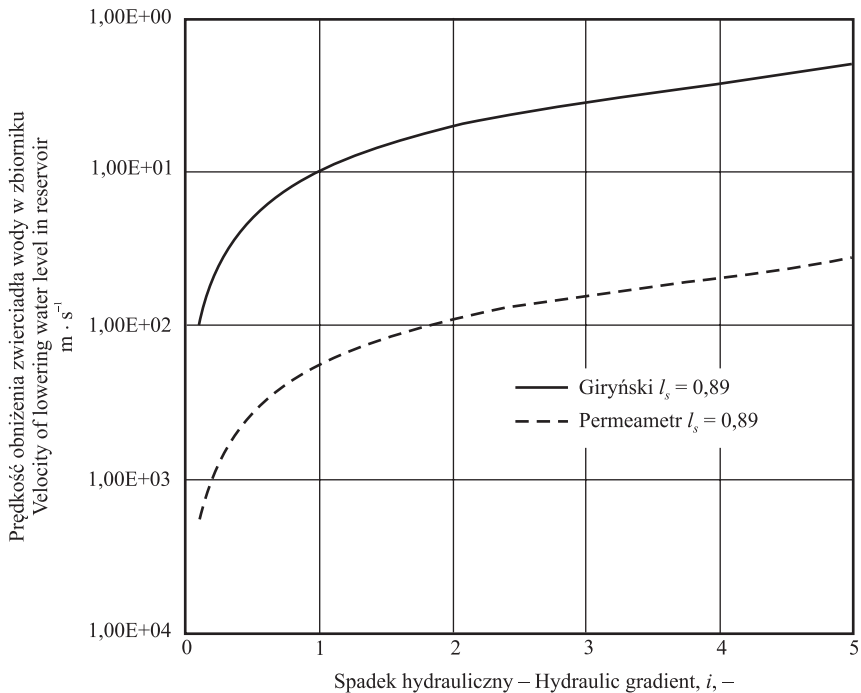
ΔH – różnica poziomów wody, m,

L – długość, na której następuje zmiana poziomu wody, m,

można ją porównać z prędkością obniżania zwierciadła wody w zbiorniku. Schemat obliczeniowy przedstawiono na ryc. 5. Ze względu na brak rzeczywistych danych o położeniu krzywej depresji w strefie przybrzeżnej zbiornika, a tym samym niemożności określenia spadku hydraulicznego, obliczenia wykonano dla różnych wartości spadku hydraulicznego wynoszących: 5, 2, 1, 0,8, 0,6, 0,4, 0,2, 0,1. Do obliczeń przyjęto wartości współczynnika filtracji otrzymane z metody polowej Giryńskiego $k = 2,87 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz z metody laboratoryjnej $k = 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Wyniki obliczeń podano w tabeli 3 oraz zobrazowano na wykresie (ryc. 6) który wskazuje, że prędkość bezpiecznego obniżenia zwierciadła wody zależy od spadku hydraulicznego; im większy jest spadek hydrauliczny, tym prędkość jest większa. Przy spadku hydraulicznym równym 1 i współczynnikowi filtracji uzyskanym według metody Giryńskiego, prędkość bezpiecznego obniżania poziomu wody w zbiorniku określono na $0,103 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. Wykresy te świadczą także, że wartości maksymalnej bezpiecznej prędkości obniżenia zwierciadła wody w zbiorniku przy danym spadku hydraulicznym są różne i zależą od wartości współczynnika filtracji. Można więc stwierdzić, że prawidłowe oznaczenie wartości współczynnika filtracji ma zasadnicze znaczenie przy określeniu bezpiecznej prędkości obniżania wody w zbiorniku.



Ryc. 5. Schemat obliczeniowy do określenia bezpiecznej prędkości obniżania zwierciadła wody w zbiorniku.
 Fig 5. Scheme for calculation of safe velocity of lowering water level in the reservoir



Ryc. 6. Wykres zależności maksymalnej dopuszczalnej prędkości obniżania wody w zbiorniku od spadku hydraulicznego dla współczynnika filtracji uzyskanego metodą Girynskiego.
 Fig. 6. Relationship between maximum safe velocity of lowering water level in the reservoir and hydraulic gradient for permeability coefficient of Girynski method

PODSUMOWANIE

Skarpy brzegowe zbiornika Czorsztyn-Niedzica od strony Pienińskiego Parku Narodowego budują twory czwartorzędowe, sklasyfikowane jako bardzo różnoziarniste rumosze, żwiry i pospółki gliniaste (wg PN-86/B-02480) lub żwiry ilaste, ily pylaste ze żwirem (wg PN-EN ISO 14688-2:2006), średnioprzepuszczalne o współczynniku filtracji rzędu 10^{-5} – 10^{-6} m · s⁻¹.

Najbardziej właściwą metodą określenia współczynnika filtracji gruntów na przedmiotowym obiekcie jest metoda polowa, w prezentowanych badaniach była to metoda Giryńskiego, polegająca na zalewaniu wykopów/szybków badawczych. W przypadku braku możliwości wykonania metody polowej można stosować metodę laboratoryjną, przy czym ze względu na gruboziarnisty charakter badanych gruntów, należy stosować aparaturę co najmniej średniowymiarową. Do przybliżonego określenia wartości współczynnika filtracji gruntów można stosować metodę analityczną z wykorzystaniem wzorów opartych na znajomości składu uziarnienia. W badanym przypadku najbardziej odpowiedni był wzór Seelheima, z którego uzyskano wartość współczynnika filtracji zbliżoną do wartości otrzymanej z badania metodą polową Giryńskiego.

Obliczenie maksymalnej bezpiecznej prędkości obniżania poziomu wody w zbiorniku powinno opierać się na oznaczonym współczynniku filtracji i w tym przypadku dla współczynnika filtracji $k_{10} = 2,87 \cdot 10^{-5}$ m · s⁻¹ otrzymanego z badań metodą Giryńskiego oraz spadku hydraulicznego $I = 1,00$, maksymalna dopuszczalna prędkość obniżania zwierciadła wody w zbiorniku czorsztyńskim powinna wynosić $v_{\max} = 0,103$ m · h⁻¹.

PIŚMIENNICTWO

- Dryś, D. (2007). Analiza wpływu czynników geotechnicznych i hydrologiczno-meteorologicznych na przebudowę nieubezpieczonych brzegów Jeziora Czorsztyńskiego. Praca magisterska. Maszynopis. Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego AR w Krakowie.
- Kowalski, J. (1998). Hydrogeologia z podstawami geologii. Wyd. 2. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
- Kozielska-Sroka, E., Michalski, P., Zydrón, T. (2010). Uwarunkowania geotechniczne i hydrodynamiczne transformacji północnej strefy brzegowej zbiornika Czorsztyn-Niedzica w trakcie jego eksploatacji. Pieniny – Zapory – Zmiany – Monografie Pienińskie 2, 63–82.
- PN-86/B-02480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa.
- PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Michalski, P., Kawalec, B. (1998). Instrukcja wykonania polowych i laboratoryjnych badań odpadów powęglowych do celów budownictwa ziemnego. Maszynopis, Kraków.
- Myślińska, E. (1998). Laboratoryjne badania gruntów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Wacławski, M. (1986). Niektóre zagadnienia abrazji brzegów karpaccich zbiorników wodnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej. Bud. Wodne Inżyn. Sanit., 37, 1–105.
- Wieczysty, A. (1970). Hydrologia inżynierska. PWN, Warszawa – Kraków.
- Wiłun, Z. (2000). Zarys geotechniki. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Zawisza, E. (2012). Odpady hutnicze jako antropogeniczne grunty budowlane. Metody badań i właściwości geotechniczne. Wydawnictwo UR, Kraków.

Zydroń, T., Kozielska-Sroka, E., Michalski, P., Dryś, D., Kruk, E., Płonka, M. (2010). Badania postępu procesu abrazji brzegów zbiornika Czorsztyn-Niedzica. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 34(2), 663–673.

WATER PERMEABILITY OF SOILS OF AN ABRASIVE SLOPE OF THE CZORSZTYN-NIEDZICA RESERVOIR

Abstract. The paper presents the results of water permeability tests of soils forming north abrasive slopes of the Czorsztyn-Niedzica reservoir from the side of the Pieniny National Park. The basic geotechnical characteristics of the tested soils were determined basing on the results of the tests carried out according to standard procedures. The tests of water permeability of the soils were carried out using methods: in situ according to Giryński – in open pits, in laboratory – in a medium size apparatus, and analytic method using empirical formulas basing on the grain size distribution and porosity of soils. The analysis of the tests results was conducted in terms of possibility of determination of the optimum method of testing the permeability of soils forming abrasion slopes of the tested reservoir and maximum safe velocity of lowering the water level in the reservoir. It was found that the most appropriate method for determination of the water permeability of the tested soils was a Giryński's method. The maximum allowable speed of lowering the water in the reservoir should be $0.103 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$.

Keywords: water reservoirs, abrasion, filtration

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.12.2016

Do cytowań – For citation: Zawisza, E., Klimek, K. (2016). Wodoprzepuszczalność gruntów skarpy abrazyjnej zbiornika Czorsztyn-Niedzica. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(4), 395–407.