

ZDZISŁAW SKUTNIK*

SYMULACJA NUMERYCZNA ZMIAN
STANU NASYCENIA I CIŚNIENIA WODY W PORACH
W RDZENIU ZAPORY CZORSZTYN PODCZAS
OBNIŻANIA POZIOMU WODY W ZBIORNIKU

NUMERICAL SIMULATIONS OF SATURATION
AND PORE WATER PRESSURE CHANGES WITHIN
THE CZORSZTYN DAM CORE DURING WATER LEVEL
DRAWDOWN

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych zmian stanu nasycenia i ciśnienia wody w porach rdzenia zapory Czorsztyn podczas obniżania poziomu wody w zbiorniku. Obliczenia stanowiły prognozę zachowania się rdzenia i możliwych zagrożeń wynikających z nierównomiernego rozpraszania się ciśnienia i zmian stanu nasycenia.

Słowa kluczowe: rdzeń zapory, ciśnienia wody w porach, stan nasycenia

Abstract

In this paper results of numerical simulations of saturation and pore water pressure changes within the Czorsztyn Dam core due to water level drawdown. Calculations that were carried out helped to predict the dam behavior and identify unfavorable phenomena within the core.

Keywords: the dam core, pore water pressure, a saturation state

* Dr inż. Zdzisław Skutnik, Katedra Geoinżynierii, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.

1. Wstęp

Instrukcja eksploatacji zbiornika czorsztyńskiego wyróżnia trzy rodzaje opróżniania: planowane, awaryjne i katastrofalne. Opróżnianie planowane związane jest z koniecznością przeprowadzenia oględzin całości obiektów stopnia piętrzącego i zostało zaplanowane po 10 latach eksploatacji. Ma ono na celu kontrolę techniczną obiektów, które w przypadku normalnego funkcjonowania zbiornika są niedostępne. Do tych obiektów należą sztolnie energetyczno-spustowe (fot. 1), wieże wlotów, betonowe ubezpieczenia na skarpie odwodnej, a także zapora boczna Frydman.



Fot. 1. Odwodnione sztolnie: energetyczna i spustowa [15]

Photo 1. Dewatered off-take drift [15]

2. Możliwe skutki obniżenia poziomu wody w zbiorniku

Opróżnienie zbiornika może spowodować takie zagrożenia, jak nierównomierne rozpraszanie się ciśnienia wody w porach gruntu rdzenia i korpusu, co może spowodować nierównomierne osiadania, możliwość uruchomienia zsuwów powierzchniowych w obrębie wzgórza zamkowego w Niedzicy oraz osiedla Zamajerz. W instrukcji rozruchu i eksploatacji zbiornika zaleca się, aby proces opróżniania przebiegał z zachowaniem dopuszczalnych wielkości dobowego obniżenia poziomu wody w zbiorniku, stabilizacji piętrzenia na określonych poziomach oraz utrzymania przepływów Dunajca poniżej zapory Sromowce Wyżne w rozmiarach nieprzekraczających wielkości dopuszczalnych. Wskazano, że najwłaściwszą porą do przeprowadzenia obniżenia jest okres od października do marca, ponieważ w tym czasie przepływy przekraczające $Q = 24,8 \text{ m}^3/\text{s}$ występują w 20% czasu.

Powstaje zatem pytanie, jak będzie przebiegał proces zmian ciśnienia wody w porach rdzenia zapory oraz zmian stopnia nasycenia na skutek obniżenia poziomu wody w zbiorniku. Istnieje wiele publikacji dotyczących zagadnienia zmian tych parametrów

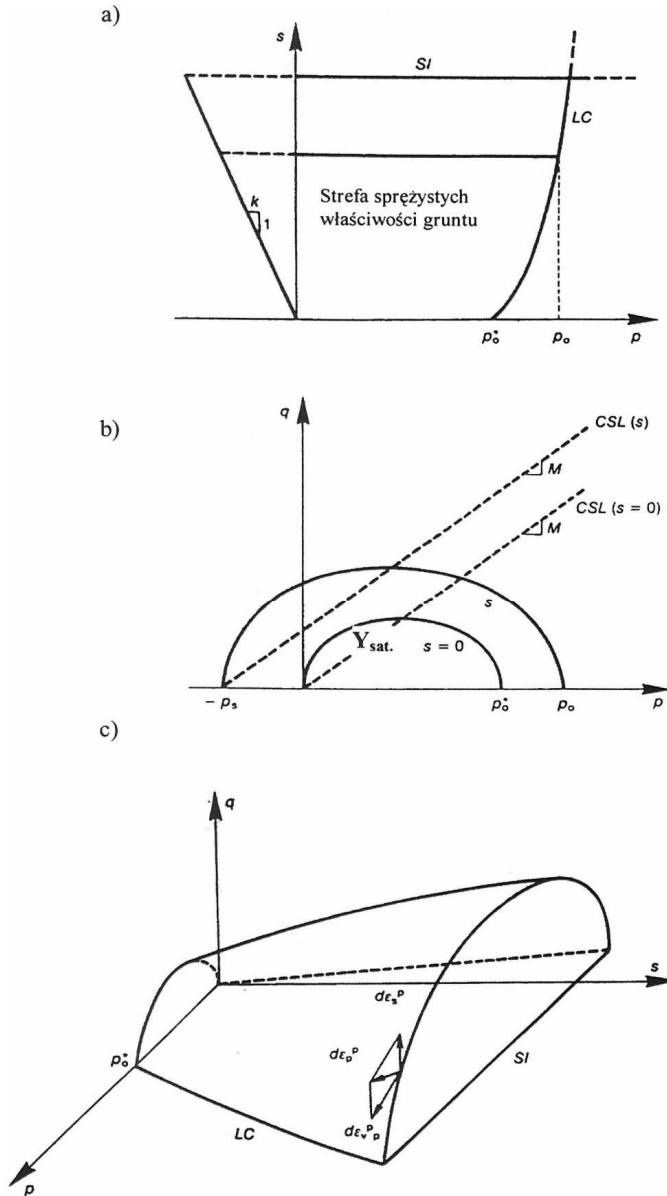
w podobnych konstrukcjach, ale dotyczą one okresu budowy i pierwszego piętrzenia wody w zbiorniku. Rdzenie zapór nasypowych wykonywane z drobnoziarnistych gruntów o małej przepuszczalności nie uzyskują stanu pełnego nasycenia podczas budowy [4, 6]. Zagęszczony grunt spoisty charakteryzuje się początkowym stopniem nasycenia wynoszącym ok. 80% [3].

Pomiary ciśnienia wody i ciśnienia powietrza w porach nasypu zapory Chelmarsh w Anglii, opisane w pozycji [9], potwierdziły występowanie ujemnego ciśnienia wody w porach, które w miarę postępu robót (wzrostu ciężaru nadkładu) zwiększa się, przechodząc na stronę wartości dodatnich. Alonso i inni przeprowadzili symulacje numeryczne wpływu wilgotności wbudowywania gruntu spoistego na stopień nasycenia rdzenia zapory i ciśnienia wody w porach. Na podstawie wyników obliczeń wykazano, że w rdzeniu zbudowanym z gruntu o wilgotności mniejszej od optymalnej, w którym $S_r \approx 0,8$, wzrost ciśnienia wody w porach jest nieznaczny (mniej niż 10 %), pomimo wzrostu wysokości rdzenia (tj. wzrostu naprężenia spowodowanego nadkładem). W przypadku gruntu wbudowywanego z wilgotnością większą od optymalnej, w którym $S_r \geq 0,9$, w miarę wzrostu wysokości rdzenia obserwuje się niemalże liniowy wzrost ciśnienia wody w porach.

Stopniowe nasycanie rdzenia wodą w czasie napełniania zbiornika może powodować odkształcenia mogące doprowadzić do uszkodzeń rdzenia (np. pęknięć, przebić). Analiza odkształcenia rdzenia zapory dla etapów końca budowy, pierwszego piętrzenia i eksploatacji [2] wykazała, że przemieszczenia rdzenia są największe podczas pierwszego piętrzenia. Prędkość nasycania rdzenia zależy od wielu parametrów, z których najważniejszy to przewodność hydrauliczna. Jak będzie przebiegał proces odwrotny? Odpowiedź na to pytanie powinny dać obliczenia numeryczne za pomocą programu CODE_BRIGHT [8], w którym zastosowano model Van Genuchtena [13] do prognozowania zachowania się gruntu nasyconego i nienasyconego, tj. obliczeń przepływu ustalonego i nieustalonego w czasie.

3. Charakterystyka programu CODE_BRIGHT

Obliczenia numeryczne zachowania się gruntów nienasyconych w zaporach ziemnych można wykonać programem CODE_BRIGHT, który obok modeli liniowo i nieliniowo sprężystych zawiera również model sprężysto-plastyczny dla gruntów nienasyconych (BBM). Naukowcy z Politechniki Katalońskiej w Barcelonie [1] rozszerzyli koncepcję stanu granicznego i krytycznego również dla gruntów nienasyconych, proponując Barcelona Basic Model (BBM). Jednym z istotnych założeń tego modelu, będącego w zasadzie rozszerzeniem modelu Cam-Clay, jest obwiednia plastyczności nazwana LC (rys. 1), rozdzielająca sprężyste i plastyczne zachowanie się gruntu w zależności od stanu naprężenia i ciśnienia ssania. Jeżeli grunt jest w pełni nasycony, to linia stanu krytycznego jest przedstawiona jako Y_{sat} (rys. 1b). W przypadku wzrostu ciśnienia ssania obszar sprężystego zachowania się gruntu powiększa się, izotropowe naprężenie płynięcia zwiększa się zgodnie z linią LC (rys. 1a i c) i linią stanu krytycznego i przesuwają się jak pokazano na rys. 1b i c.



Rys. 1. Koncepcja modelu BBM – Barcelona Basic Model: a) i b) krzywe stanów granicznych i strefa sprężystych właściwości gruntu, c) powierzchnia płynięcia w przestrzeni naprężeń [1]

Fig. 1. Barcelona Basic Model (BBM) concept: a) and b) yield surfaces in (p, q, s) space, c) three-dimensional view of the yield surfaces in (p, q, s) space [1]

Zastosowanie modelu BBM wymaga wyznaczenia dodatkowych parametrów: p^c – naprężenia prekonsolidacji, r – parametru definiującego maksymalną sztywność

gruntu, β – wzrostu sztywności gruntu wraz ze wzrostem ciśnienia ssania, λ_s – sztywności gruntu w zależności od zmian ciśnienia ssania, κ_s – sztywności sprężystej w zależności od zmian ciśnienia ssania, k – parametru wzrostu spójności w zależności od wzrostu ciśnienia ssania, M – nachylenia linii stanu krytycznego.

Program numeryczny CODE_BRIGTH powstał w drugiej połowie lat 90. w ramach programów Unii Europejskiej na Politechnice Katalońskiej w Barcelonie. Jest to pakiet pozwalający na sprzężoną analizę odkształceń oraz przepływu gazu, wody i ciepła. Stąd nazwa programu (COupled DEformation, BRIne, Gas and Heat Transport). Jak większość współczesnych programów również CODE_BRIGTH wykorzystuje metodę elementów skończonych. Przygotowanie danych w tym geometrii, dyskretyzacja oraz wizualizacja wyników obliczeń odbywa się w środowisku GID.

Równania konstytutywne wykorzystywane w programie CODE_BRIGTH:

Ciepłne Przewodzenie ciepła: prawo Fouriera

$$i_c = -\lambda_t \nabla T \quad (1)$$

Przepływ ciepła i_c spowodowany gradientem temperatury T

$$\lambda_t = \lambda_s^{(1-n)} \lambda_l^{nS_l} \lambda_g^{n(1-S_l)} = \lambda_{sat}^{S_l} \lambda_{dry}^{1-S_l} \quad (2)$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \lambda_l^n \quad (3)$$

$$\lambda_{dry} = \lambda_s^{1-n} \lambda_g^n \quad (4)$$

gdzie:

- λ_t – całkowita przewodność cieplna,
- λ_s – przewodność cieplna szkieletu gruntowego,
- λ_l – przewodność cieplna wody gruntowej,
- λ_g – przewodność cieplna powietrza gruntowego,
- n – porowatość,
- S_l – stopień nasycenia.

Przewodność cieplna jest zatem funkcją: temperatury (czynnik cieplny), stopnia nasycenia (czynnik hydrauliczny), porowatości (czynnik mechaniczny).

Mechaniczne Naprężenie/odkształcenie – równanie konstytutywne

$$d\sigma = \mathbf{D}d\varepsilon + \beta dT + \mathbf{h}ds \quad (5)$$

- σ – naprężenie netto ($\sigma^* - P_g m$),
- σ^* – naprężenie całkowite,
- P_g – ciśnienie powietrza,
- P_l – ciśnienie wody,
- T – temperatura,
- m^T – wektor pomocniczy [1, 1, 1, 0, 0, 0],
- $s = (P_g - P_l)$ – ssanie,

- ε – tensor odkształcenia,
 \mathbf{D} – konstytutywna macierz sztywności,
– konstytutywna macierz temperatury,
 \mathbf{h} – konstytutywna macierz ciśnienia ssania.

Mechaniczne równanie konstytutywne jest zatem funkcją: temperatury (czynnik cieplny), ciśnienia ssania (czynnik hydrauliczny), charakterystyki naprężenie/odkształcenie (czynnik mechaniczny).

Hydrauliczne Przepływ wody q_l i gazu q_g : prawo Darcy'ego

$$q_l = -K_l (\nabla P_l - \rho_l g) \quad (6)$$

$$q_g = -K_g (\nabla P_g - \rho_g g) \quad (7)$$

Przepływ wody i gazu spowodowany gradientem ciśnienia.

Tensor przewodności K_α hydraulicznej wyrażony jest równaniem

$$K_\alpha = \frac{k_w k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} \quad (8)$$

k_w – tensor przewodności właściwej,

$k_{r\alpha}$ – przewodność względna,

μ_α – lepkość dynamiczna.

Przewodność względna:

Wody gruntowej

$$k_{rl} = f(S_l) \quad \text{lub} \quad k_{rl} = f(P_g - P_l) \quad (9)$$

Powietrza gruntowego (gazu)

$$k_{rg} = 1 - k_{rl} \quad (10)$$

Przewodność hydrauliczna jest, zatem funkcją: temperatury (lepkość wody – czynnik cieplny), stopnia nasycenia (przewodność względna – czynnik hydrauliczny), porowatości (przewodność właściwa – czynnik mechaniczny)

Krzywa retencji – model Van Genuchtena [12]

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (11)$$

S_e – nasycenie efektywne,

S_{rl} – nasycenie rezydualne,

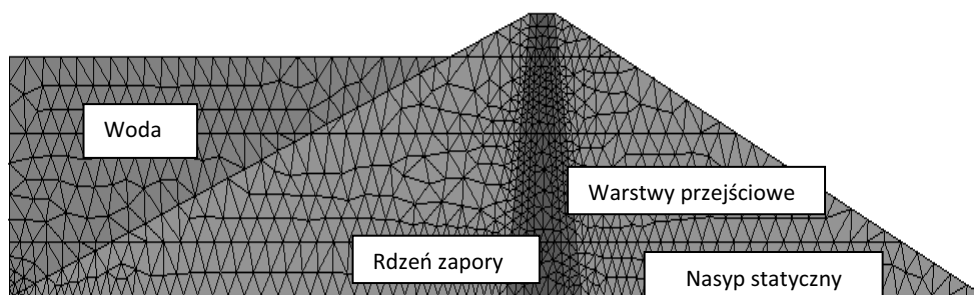
S_{ls} – pełne nasycenie,

P_g – ciśnienie powietrza,

- P_l – ciśnienie wody,
 λ – parametr empiryczny modelu.

4. Założenia i parametry przyjęte do obliczeń numerycznych

Wartości parametrów przyjęte dla poszczególnych elementów zapory, tj. rdzenia, warstw przejściowych oraz nasypu statycznego zostały wyznaczone na podstawie przeprowadzonych geotechnicznych badań laboratoryjnych i terenowych [12], a niektóre przyjęto z literatury dla podobnych gruntów. Krzywą retencji gliny, z której zbudowany jest rdzeń zapory w Czorsztynie wyznaczono na podstawie: krzywej uziarnienia oraz badań psychrometrem tranzystorowym, tensjometrem oraz w edometrze UPC. Na rys. 2 przedstawiono dyskretyzację numeryczną przekroju zapory oraz lokalizację poszczególnych elementów zapory, dla których przyjęto odpowiadające stałe materiałowe.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny zapory Czorsztyn – podział na materiały i dyskretyzacja numeryczna [3]

Fig. 2. The cross section of Czorsztyn Dam with finite element mesh [3]

Parametry poszczególnych materiałów przyjęte do obliczeń zestawiono w tabeli 1.

W obliczeniach zmian stanu nasycenia rdzenia zapory w trakcie opróżniania zbiornika jako stan wyjściowy przyjęto warunki ustalonego przepływu przez rdzeń, zakładając stan pełnego nasycenia rdzenia. Ciśnienia wody w porach w rdzeniu zapory przyjęto na podstawie pomiarów aparatury kontrolno-pomiarowej dla stanu ustalonego po 10 latach eksploatacji.

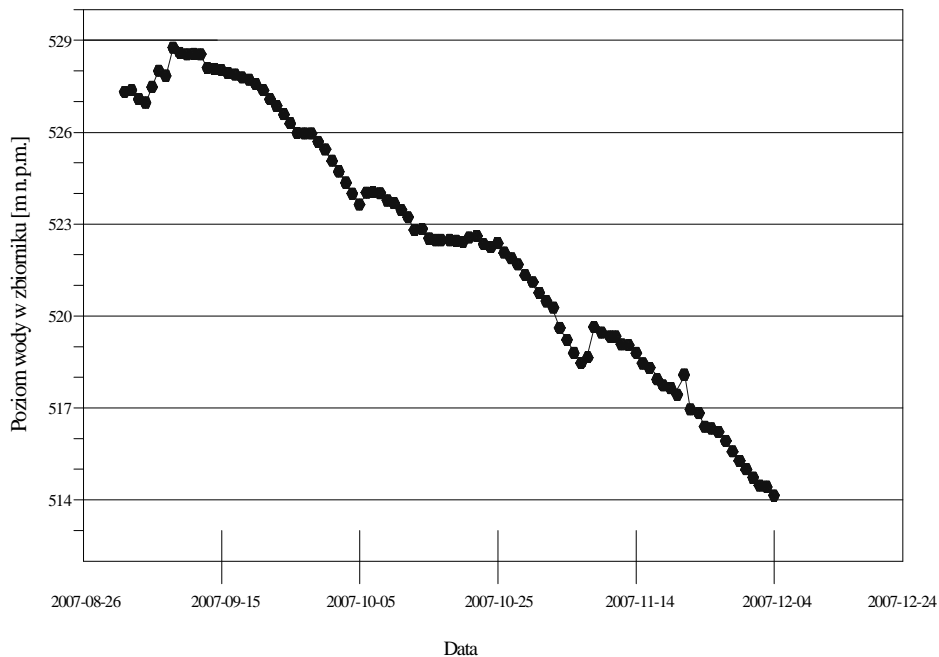
Obliczenia przeprowadzono, przyjmując bliskie rzeczywistemu tempo obniżania poziomu wody w zbiorniku, jak również przyjmując różne kroki czasowe oraz poziom piętrzonej w zbiorniku wody w celu zbadania wpływu tych czynników na zmiany ciśnień wody w porach i stan nasycenia rdzenia.

Rzeczywisty harmonogram opróżniania zbiornika, które odbywało się od 26.08.2007 r. do 24.12.2007 r. przedstawiono na rys. 3. Początkowo planowano obniżenie zwierciadła do rzędnej 512,00 m n.p.m., jednak zmieniono ją na rzędną 514,00 m n.p.m., gdyż już taki poziom zwierciadła wody umożliwił dostęp do wież wlotowych, dzięki zamontowaniu zastawek możliwe było odwodnienie sztolni.

Parametry przyjęte do obliczeń

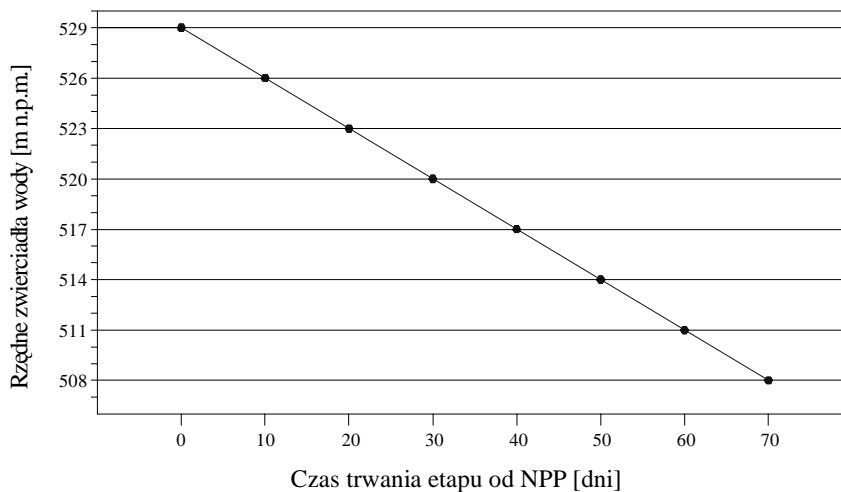
Parametry	Rdzeń zapory	Warstwy przejściowe	Nasyp statyczny
Mechaniczne			
Sprężyste			
E (MPa)	–	60	160
κ_0	0,01	–	–
κ_{s0}	0,0025	–	–
ν	0,40	0,25	0,25
λ_{is}	–0,003	–	–
λ_{ss}	–0,161	–	–
λ_{sp}	–0,03	–	–
Plastyczne			
$\lambda_{(0)}$	1,55	–	–
β (MPa ⁻¹)	0,05	–	–
k	0,1	–	–
M	1,5	–	–
p_0^* (MPa)	0	–	–
p^c (MPa)	0,1	–	–
α	0,395	–	–
Hydrauliczne			
k_0 (m ²)	$0,1 \times 10^{-13}$	$0,1 \times 10^{-10}$	$0,1 \times 10^{-8}$
n_{ref}	0,2	0	0
Krzywej retencji			
P_0 (MPa)	0,2	0,01	0,01
λ	0,2	0,6	0,6

Przebieg opróżniania zbiornika przyjęty w obliczeniach numerycznych zmian stanu nasycenia i ciśnienia wody w porach przedstawiono na rys. 4 oraz podano w tab. 2. Według zaproponowanego harmonogramu prędkość opróżniania wody w zbiorniku będzie wynosiła 0,3 m/dobę, co zostało odwzorowane w obliczeniach numerycznych. Przyjęto etapy obniżania zwierciadła wody o 3 m w ciągu 10 dni.



Rys. 3. Rzeczywiste tempo opróżniania zbiornika czorsztyńskiego [3]

Fig. 3. The real emptying rate of the reservoir [3]



Rys. 4. Przyjęty w obliczeniach harmonogram opróżniania zbiornika czorsztyńskiego

Fig. 4. Assumed in numerical calculation the emptying rate of the reservoir

Harmonogram opróżniania zbiornika

Nr etapu	Czas trwania etapu od NPP [dni]	Piętrzenie wody w zbiorniku [m]	Rzędne zwierciadła wody [m n.p.m.]
1	0 – (NPP)	44	529,00
2	10	41	526,00
3	20	38	523,00
4	30	35	520,00
5	40	32	517,00
6	50	29	514,00
7	60	26	511,00
8	70	20	508,00

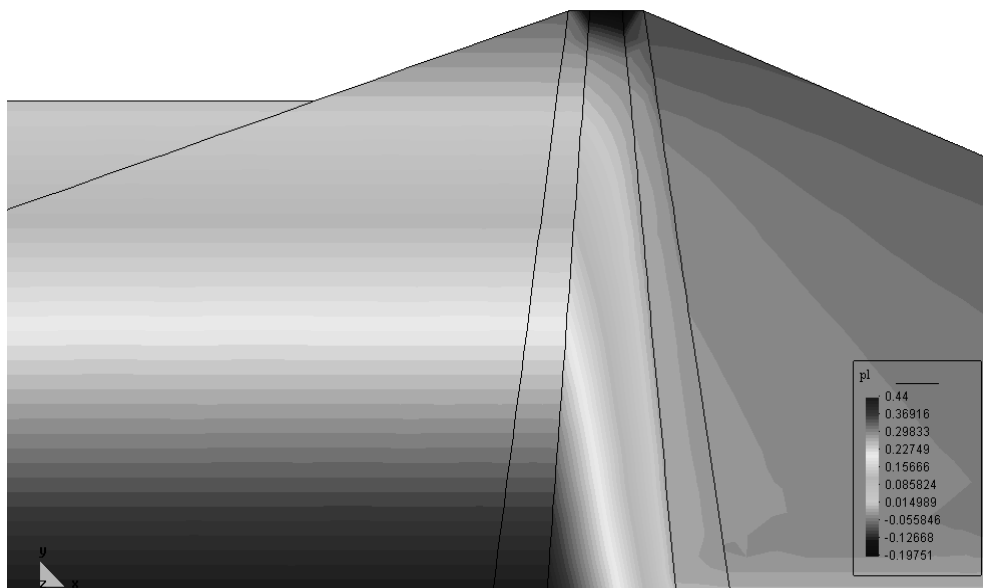
5. Wyniki obliczeń numerycznych

Wyniki obliczeń zmian ciśnienia wody w porach w rdzeniu zapory podczas opróżniania zbiornika w wybranych etapach przedstawiono na rys. 5, 7, 9, zaś zmiany stopnia nasycenia odpowiednio na rys. 6, 8, 10.

Otrzymane wyniki obliczeń ciśnienia wody w porach w rdzeniu zapory uzyskane programem CODE_BRIGHT wykazują, że zmiany ciśnienia wody w porach podczas opróżniania zbiornika są proporcjonalne do zmian poziomu zwierciadła wody w zbiorniku; reakcja gruntu na każdym z wytypowanych poziomów zachodzi niemalże natychmiast.

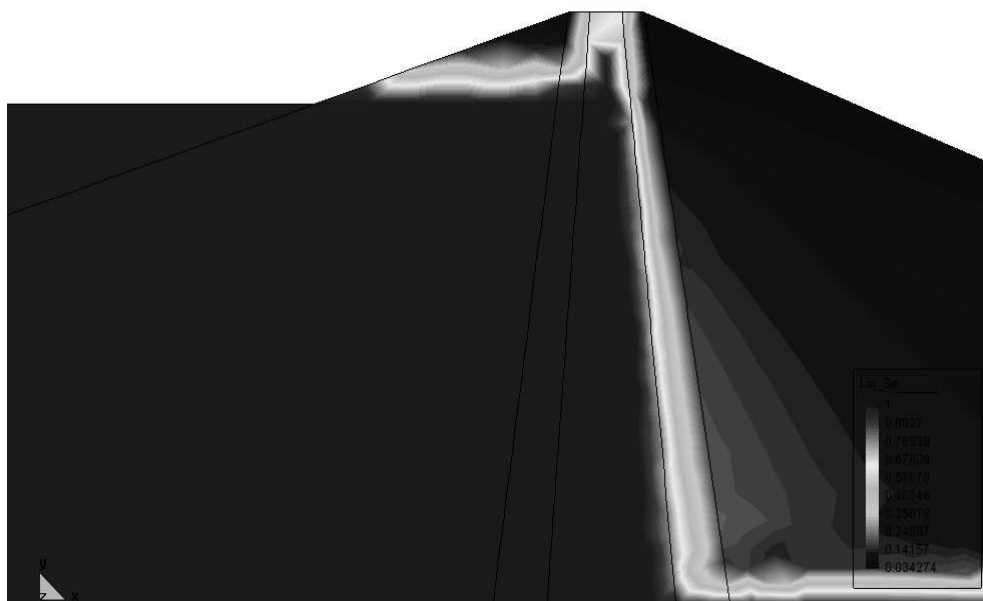
Wyniki obliczeń zmian stopnia nasycenia S_r , wykazują, że będący w stanie pełnego nasycenia ($S_r = 1$) rdzeń zapory (stan początkowy – NPP) podczas procesu opróżniania zbiornika o 0,3 m/dobę przez dłuższy czas pozostaje nasycony. Niezależnie od tego, że rzędne zwierciadła wody zmniejszają się o 3 m w ciągu 10 dni rdzeń zapory pozostaje nadal w pełni nasycony.

Weryfikację obliczeń ciśnienia wody w porach oparto na wynikach pomiarów ciśnienia wody w porach, jakie przeprowadzono za pomocą aparatury kontrolno-pomiarowej zainstalowanej w zaporze podczas napełniania zbiornika. Wyniki takiego porównania zestawiono na rys. 11, który przedstawia rozkład ciśnienia wody w porach dla piętrzenia 30 m. W bardzo krótkim czasie od spiętrzenia wody (dla każdego z etapów) obserwowano ustaloną filtrację przez rdzeń zapory. Pomierzone za pomocą czujników ciśnienia wody w porach zainstalowanych w rdzeniu zapory przy poziomie piętrzenia 515 m n.p.m. (odpowiada to wysokości piętrzenia 30 m) wartości ciśnień wody w porach bardzo dobrze korelują z wartościami obliczonymi.



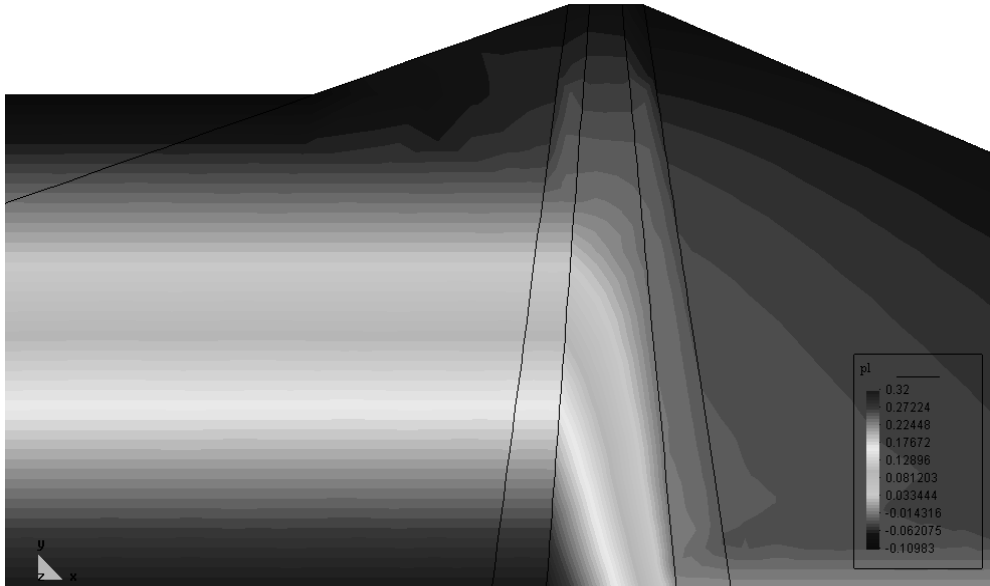
Rys. 5. Obliczony rozkład ciśnienia wody w porach – etap nr 1, normalny poziom piętrzenia (NPP)

Fig. 5. Calculated pore water pressure distribution – 1st stage, normal water level (NWL)



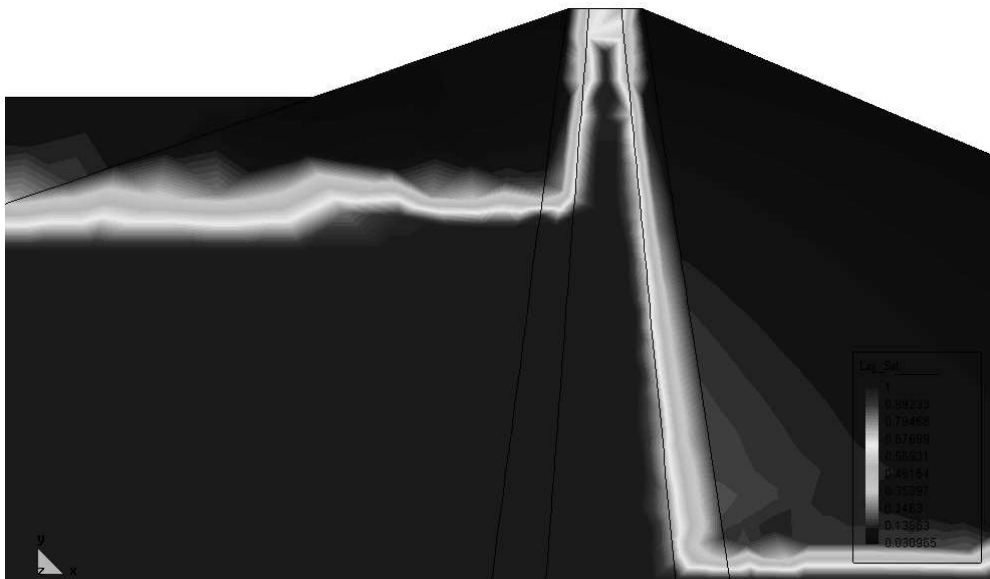
Rys. 6. Obliczony rozkład stanu nasycenia – etap nr 1, stan początkowy (NPP)

Fig. 6. Calculated water saturation state – 1st stage, initial stage (NWL)



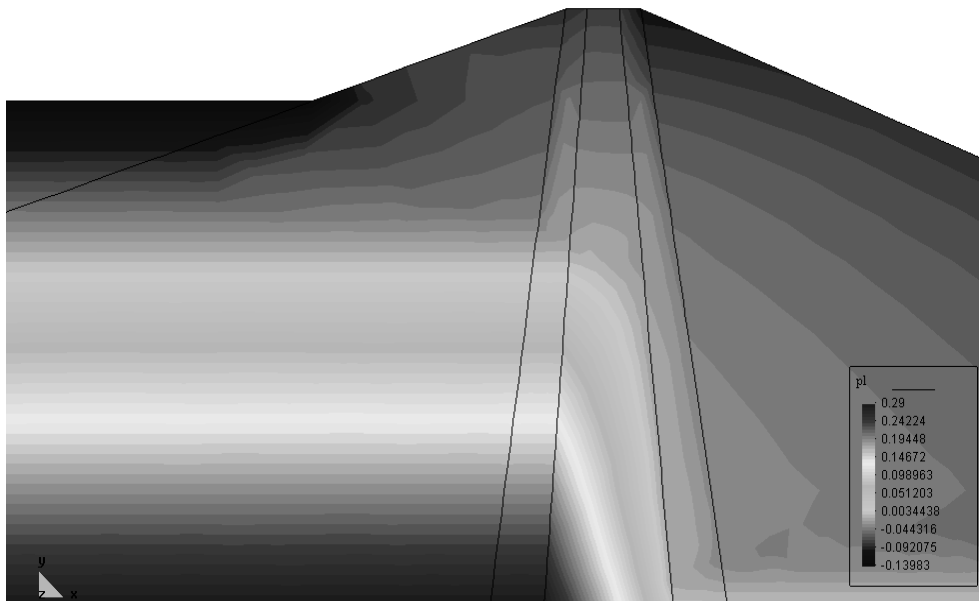
Rys. 7. Obliczony rozkład ciśnienia wody w porach – etap nr 5 (rzędna zw. wody 517,00 m n.p.m.)

Fig. 7. Calculated pore water pressure distribution – 5st stage (water level 517,00 m a.s.l.)



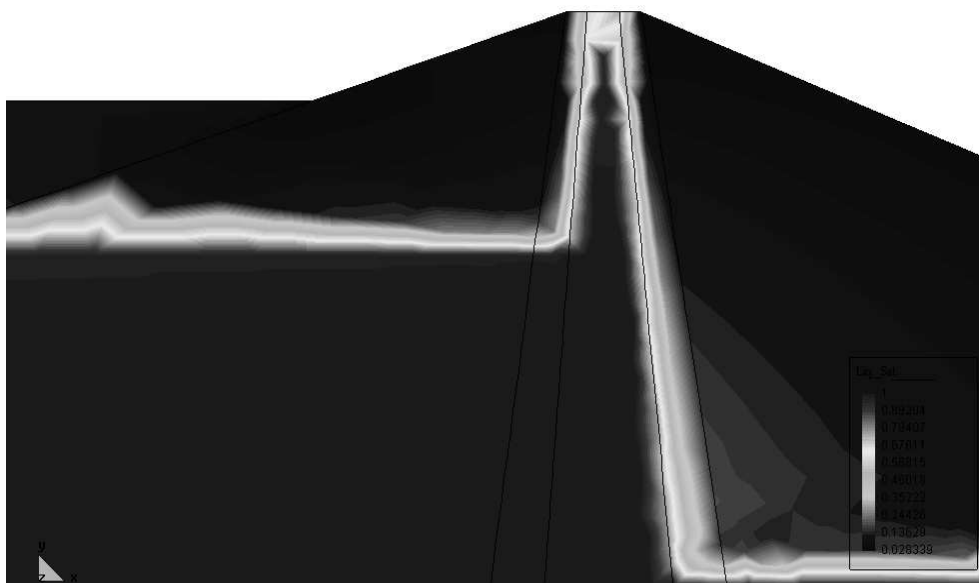
Rys. 8. Obliczony rozkład stanu nasycenia – etap nr 5 (rzędna zw. wody 517,00 m n.p.m.)

Fig. 8. Calculated water saturation state – 5st stage (water level 517,00 m a.s.l.)



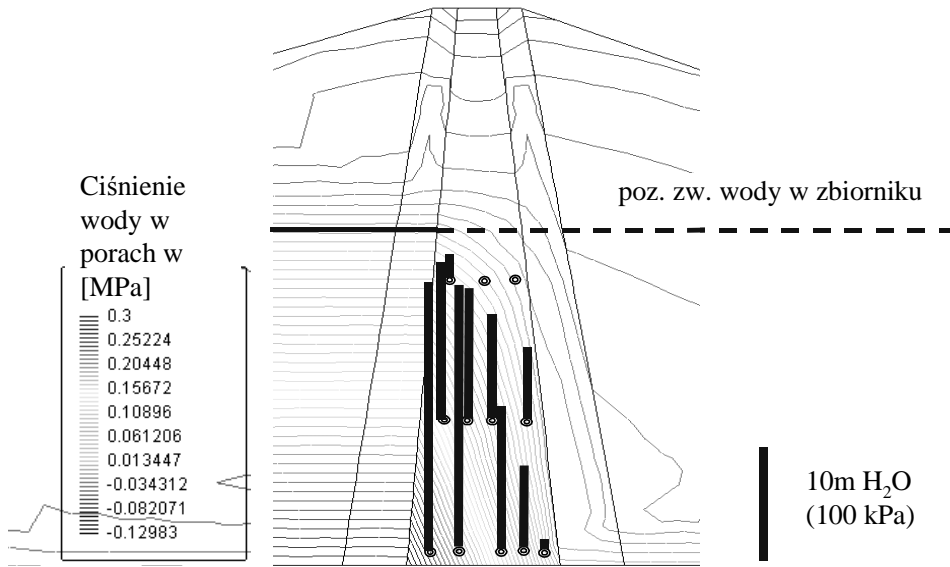
Rys. 9. Obliczony rozkład ciśnienia wody w porach – etap nr 6 (rzędna zw. wody 514,00 m n.p.m.)

Fig. 9. Calculated pore water pressure distribution – 6st stage (water level 514,00 m a.s.l.)



Rys. 10. Obliczony rozkład stanu nasycenia – etap nr 6 (rzędna zw. wody 514,00 m n.p.m.)

Fig. 10. Calculated water saturation state – 6st stage (water level 514,00 m a.s.l.)

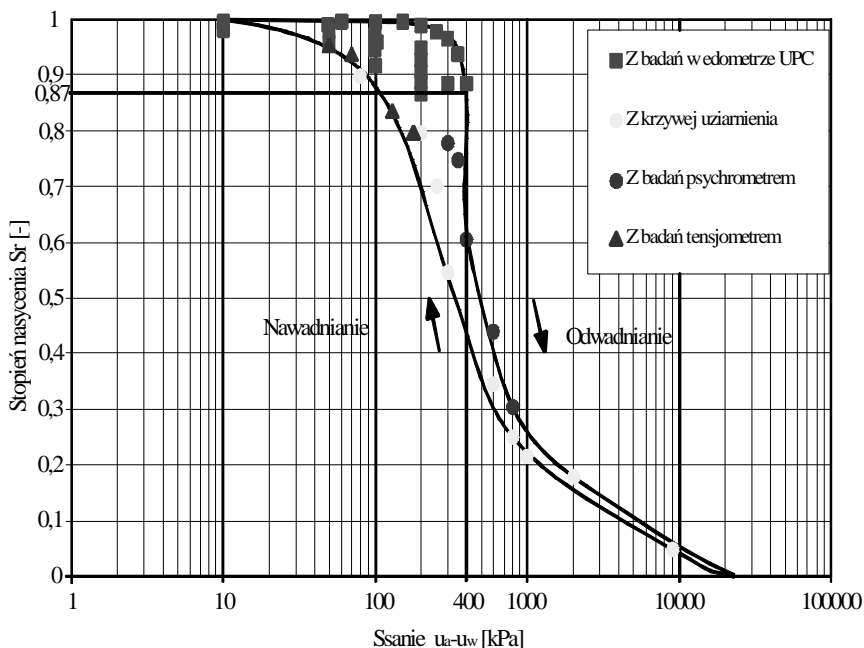


Rys. 11. Porównanie obliczonych i pomierzonych aparaturą kontrolno-pomiarową wartości ciśnienia wody w porach w rdzeniu zapory (rzędna zw. wody 515,00 m n.p.m.)

Fig. 11. Comparison of calculated and measured by monitoring equipment values of pore water pressure within the dam core (water level 515,00 m a.s.l.)

Analiza wyników obliczeń zmian stanu nasycenia rdzenia podczas obniżania poziomu wody w zbiorniku wskazuje, że rdzeń zapory przez cały czas pozostaje w pełni nasycony. Niestety weryfikacja tego za pomocą aparatury kontrolno-pomiarowej jest niemożliwa. Taki stan rzeczy ze względu na zachowanie się rdzenia jest jednak bardzo korzystny. W przypadku kiedy nie zmienia się stan nasycenia gruntu, parametry odkształceniowe i wytrzymałościowe rdzenia też nie ulegają większym zmianom. Ewentualna zmiana tych parametrów może wynikać ze zmiany stanu naprężenia.

Fakt, że rdzeń pozostaje w stanie pełnego nasycenia pomimo obniżenia poziomu najprawdopodobniej wynika z histerezy krzywej retencji gruntu (rys. 12). Poniższy rysunek przedstawiający przebieg krzywej retencji dla etapu nawadniania i suszenia próbki gruntu wykazuje, że uzyskanie tego samego stopnia nasycenia uzyskujemy przy różnych wartościach ciśnienia ssania. W rdzeniu ciśnienie wejścia dla powietrza może sięgać do 400 kPa, dlatego też rdzeń zapory pozostaje w pełni nasycony nawet po opróżnieniu zbiornika.



Rys. 12. Histereza krzywej retencji gruntu rdzenia zapory Czorsztyn określona na podstawie badań laboratoryjnych [12]

Fig. 13. Hysteresis of soil retention curve for the core of Czorsztyn Dam based on laboratory testing

6. Wnioski

Program CODE_BRIGHT z zastosowaniem krzywej retencji gruntu, pozwala na odtworzenie przebiegu zmian stanu nasycenia i ciśnienia wody w porach na skutek opróżniania wody w zbiorniku.

Analizując wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych, można sformułować wnioski, że będący w stanie pełnego nasycenia rdzeń zapory podczas procesu opróżniania zbiornika w większości pozostaje nasycony. Wyniki obliczeń zmian ciśnienia wody w porach wykazują, że ciśnienia wody w porach zmieniają się w zależności od ciśnienia hydrostatycznego, reakcja jest niemal natychmiastowa.

Z obliczeń numerycznych przeprowadzonych za pomocą powyższego programu wynika, że rdzeń zapory Czorsztyn podczas obniżania zwierciadła wody o 0,3 m/dobę może pozostać przez dłuższy czas w stanie pełnego nasycenia. Jednak nadwyżka ciśnienia wody w porach rdzenia zapory, powstała na skutek obniżenia poziomu wody w zbiorniku, rozprasa się bardzo szybko, eliminując tym samym możliwość powstania pęknięcia hydraulicznego.

Literatura

- [1] Alonso E.E., Gens A., Josa A., *A constitutive model for partially saturated soils*, Géotechnique 40, No. 3, 1990, 405-429.
- [2] Alonso E.E., Lloret A., Gens A., Battle F., *Effect of core compaction on the behaviour of earthdams*, Proc. of the First Int. Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, 1995, 231-239.
- [3] Fredlund D.G., Rahardjo H., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons Inc., New York 1993.
- [4] Fry J., Delage P., Nedjat N., Nanda A., *Computing the stability of clay fill dams under construction*, Water Power & Dam Construction, 3:23-29, 1993.
- [5] Grabowska-Olszewska B. i in., *Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [6] Garbulewski K., Żakowicz St., Król P., Wolski W., *Potencjał wodno-gruntowy w rdzeniu budowanej zapory*, VI Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Sobieszewo 1994.
- [7] Klukowska K., *Analiza stateczności skarpy odwodnej zapory w Czorsztynie w trakcie obniżania poziomu wody w zbiorniku*, praca dyplomowa, SGGW, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Warszawa 2007.
- [8] Olivella S., Gens A. i in., *CODE BRIGHT, User's Guide*, Departamento de Ingenieria del Terreno, Universidad Politècnica de Catalunya, 1997.
- [9] Penman A.D.M., *The effect of gas on measured pore pressures*, Proc. of the First Int. Conference on Unsaturated Soils, Paris 1995, 287-292.
- [10] Romero E., *Characterization and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study*, doctoral thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona 1999.
- [11] Skutnik Z., *Evaluation of geotechnical parameters and stress states of the clay core during construction*, Ann. Warsaw Agricult. Univ., SGGW, Land Reclam, No. 29, 2000, 63-70.
- [12] Skutnik Z., *Weryfikacja parametrów geotechnicznych rdzenia zapory nasypowej na podstawie badań prowadzonych podczas budowy*, praca doktorska, SGGW, Warszawa 2002.
- [13] Van Genuchten, M.Th., *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 1980, 892-898.
- [14] Wolski W., Skutnik Z., Król P., Barański T., *Parametry geotechniczne rdzenia zapory Czorsztyn – weryfikacja „podczas budowy”*, Gospodarka Wodna, nr 12, Wyd. Sigma NOT, 1997, 414-417.
- [15] www.zew-niedzica.com.pl
- [16] Zaradny H., *Matematyczne metody opisu i rozwiązań zagadnień przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach*, rozprawa habilitacyjna, IBW PAN, Gdańsk 1990.