

## **Problem interpretacji i doboru parametrów gruntów w prognozowaniu stateczności zapory ziemnej**

**Dr hab. inż. Krzysztof Parylak, dr inż. Zofia Zięba, mgr inż. Kinga Witek**  
**Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji**

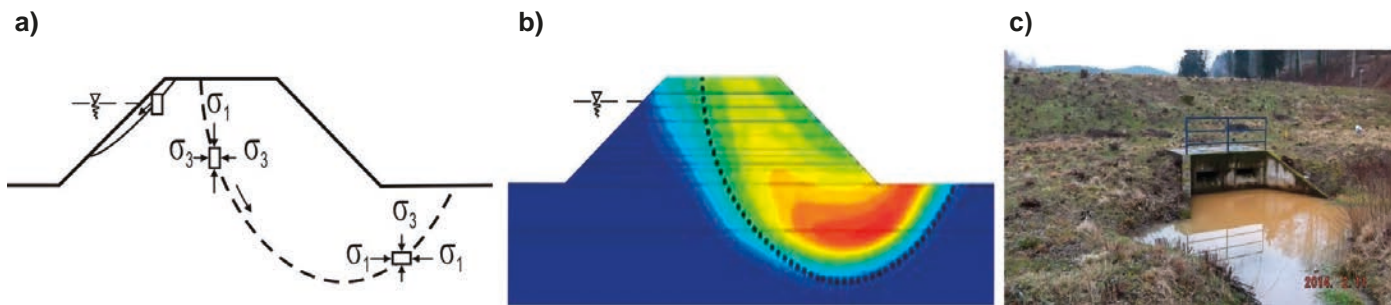
### **CZYNNIKI WARUNKUJĄCE STATECZNOŚĆ ZAPÓR ZIEMNYCH**

W prognozach długotrwałej stateczności zapór ziemnych, w zależności od uwarunkowań eksploatacyjnych, powinny być rozważane warunki stanów naprężenia efektywnego lub całkowitego. W celu przeprowadzenia wymaganych analiz niezbędne jest ustalenie warunków stanów naprężenia, a w tym:

- mechanizmu zniszczenia powstałego na potencjalnej linii poślizgu,

- wartości ciśnień wody w porach,
- składowych ścinających naprężenia, z uwzględnieniem parametrów wytrzymałościowych określonych w warunkach obciążeń odpowiadających naprężeniu efektywnemu lub całkowitemu.

Potencjalne zniszczenia zapory, w zależności od uwarunkowań konstrukcyjnych, mogą wystąpić w korpusie albo w jej podłożu. Najczęściej mają charakter linii lub stref poślizgu skarpy odpowietrznej albo odwodnej, ale również mogą wystąpić jednocześnie po obu stronach (rys. 1).



Rys. 1. Możliwe linie poślizgu

a) z rozkładem naprężeń głównych, b) z potencjalnymi obszarami rozwoju naruszenia równowagi granicznej, c) skarpa odpowietrzna analizowanej zapory (opracowanie własne na podstawie [1, 5])

Możliwości pojawienia się uszkodzeń zapory i jej podłoża są zróżnicowane, ale zawsze powstają w strefach występowania najmniejszych składowych naprężeń. Jednak mechanizmy zniszczenia mogą być także wynikiem występowania kilku dodatkowych czynników, takich jak:

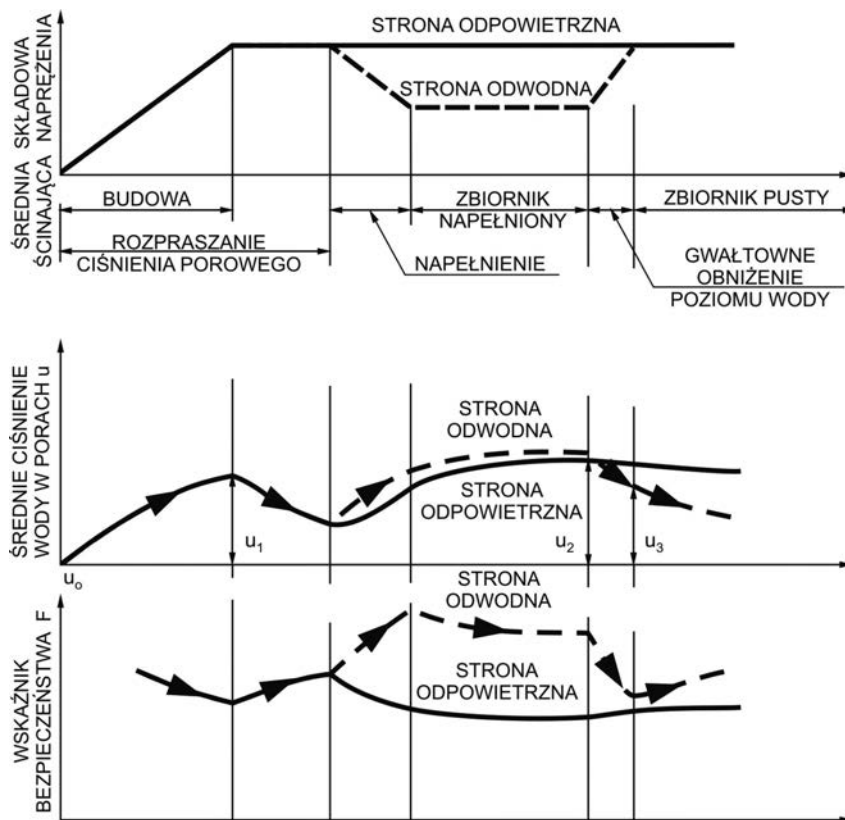
- strefa przebiecia hydraulicznego w korpusie zapory lub w jej podłożu,
- słabsza warstwa mogąca stanowić linię poślizgu,
- uprzywilejowana powierzchnia skalnego podłoża,
- duże wartości ciśnienia wody w porach w strefie podłoża zapory powodujące zmniejszenie składowych efektywnych naprężeń, w tym zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie.

W przypadkach oceny warunków obciążeń i stanów naprężenia strony odpowietrznej budowli ziemnych stale piętrzących wodę nie powinna mieć miejsca analiza warunków składowych

całkowitych naprężenia. W takich przypadkach nie występuje nagły przyrost naprężenia, który uniemożliwiłoby rozpraszanie naciśnienia wody w porach.

Stany zmienności rozkładów naprężenia i warunków stałeczności skarpy odpowietrznej i odwodnej w całym procesie inwestycyjno-eksploatacyjnym przedstawiono na rys. 2.

W czasie budowy zapory ziemnej składowe ścinające naprężenia na potencjalnych liniach poślizgu wzrastają. Wzrasta również ciśnienie wody w porach, ponieważ grunt uprzednio wbudowany, w miarę postępu robót, jest obciążany kolejnymi warstwami nasypu. Po zakończeniu budowy składowe naprężenia pozostają stałe, ale naciśnienia w porach zaczynają zanikać, po czym ponownie wzrastają wraz z napełnieniem zbiornika. W tym stanie woda w zbiorniku powoduje zmniejszenie składowych ścinających naprężenia skarpy od strony wody górnej, co jest spowodowane korzystnym działaniem parcia wody



Rys. 2. Zmiany składowych ścinających naprężeń, ciśnienia wody w porach oraz współczynnika bezpieczeństwa w trakcie wznoszenia i po zakończeniu budowy zapory ziemnej na danej powierzchni poślizgu (opracowanie własne na podstawie [2])

od strony zbiornika. Natomiast w strefie skarpy odpowietrznej są one niezmiennione lub wzrastają nieznacznie. Stan taki utrzymuje się w całym okresie napełnienia zbiornika [2].

W przypadku nagłego opróżnienia zbiornika od strony wody górnej na skutek braku parcia wody i dodatkowo rozpraszania się nadciśnienia wody w porach w korpusie zapory skarpa odwodna jest poddawana ciśnieniu sphywowemu wywołującemu dodatkowe składowe ścinające naprężenia. Natomiast stan naprężenia od strony wody dolnej na takim etapie eksploatacji z reguły ulega niewielkiemu zmniejszeniu. Ze zmianą stanów naprężenia w zaporach zbudowanych z gruntów spoistych zmieniają się także ciśnienie wody w porach i współczynniki bezpieczeństwa skarp od strony wody górnej, jak i dolnej. W przypadku strony odpowietrznej ciśnienia wody w porach po napełnieniu zbiornika wzrastają w mniejszym stopniu niż od strony wody górnej, stabilizując się w całym okresie napełnienia zbiornika na jednakowym poziomie. Natomiast współczynnik bezpieczeństwa na ogół jest niższy niż od strony odwodnej, ale przez cały okres utrzymuje się na ustabilizowanym poziomie [2].

Pogorszenie takiego stanu może nastąpić tylko w przypadku powstania szczególnych zjawisk, w tym głównie przesieków lub przebieć hydraulicznych.

### DOBÓR METODY BADANIA DO POTRZEB ANALIZ STATECZNOŚCI ZAPÓR

W zagadnieniach stateczności zapór ziemnych stany naprężenia oraz warunki potencjalnej anizotropii mogą być określone w badaniach trójosiowego ściskania, ścinania prostego lub ścinania bezpośredniego. Zagadnienia te mogą być analizowane, stosując naprężenia całkowite bez odpływu lub stan naprężenia efektywnego.

W przypadku warunków szybkiego opróżnienia zbiornika do oceny stateczności skarpy odwodnej należy zastosować warunki ścinania bez odpływu, dające wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\phi_u$  i spójności  $c_u$  oparte na naprężeniu całkowitym. Według innej metody można przyjąć, że parametry wytrzymałościowe będą wynosić odpowiednio  $\phi_u = 0^\circ$  i  $c = s_u$ , gdzie maksymalna wytrzymałość na ścinanie bez odpływu  $s_u$  stanowi połowę różnicy

między maksymalnymi wartościami składowej pionowej ciśnienia  $\sigma_1$  i bocznego  $\sigma_3$  [1].

$$s_u = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} \quad (1)$$

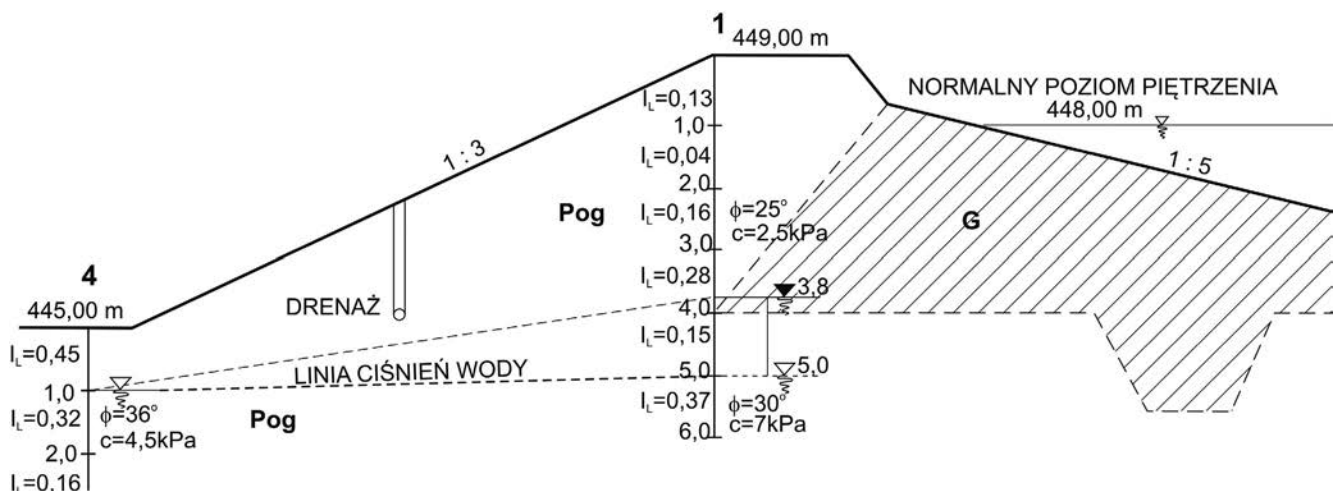
Natomiast w analizie stateczności skarpy odpowietrznej nie występują warunki eksploatacji, które mogłyby spowodować gwałtowne zmiany stanów naprężenia. Stąd wymagane jest zastosowanie parametrów uzyskanych w warunkach wytrzymałości długotrwałej ( $\phi'$  i  $c'$ ), polegającej na powolnym ścinaniu uprzednio skonsolidowanej próby gruntu. Czas  $t$  potrzebny do skonsolidowania danej warstwy o określonej miąższości  $H$  zależy od współczynnika konsolidacji  $c_v$ , który jest warunkowany współczynnikiem filtracji  $k$ , współczynnikiem zmiany objętości  $m_v$  oraz ciężarem właściwym wody  $\gamma_w$  [3, 6].

$$t = \frac{H^2}{c_v} = \frac{\gamma_w \cdot m_v \cdot H^2}{k} \quad (2)$$

Opisany przypadek występuje w ocenie stateczności skarpy odpowietrznej zapory ziemnej niewielkiego zbiornika retencyjnego na Dolnym Śląsku (rys. 3).



Rys. 3. Plan zapory i lokalizacja miejsc badań (opracowanie własne na podstawie [10])



Rys. 4. Przekrój poprzeczny zapory I-I [8]

Od strony wody górnej zapórę zbudowano z miejscowych gruntów gliniastych ze skarpią zabezpieczoną przed erozyjnym działaniem wody. Natomiast środkową i dolną strefę korpusu zapory zbudowano z pospółek gliniastych (rys. 4) [8].

## HIPOTEZA ZAGROŻENIA STATECZNOŚCI ZAPORY ZIEMNEJ W ŚWIETLE NIEWŁAŚCIWYCH BADAŃ

W kontrolach stanu technicznego dotyczących oceny bezpiecznego użytkowania zapór ziemnych jest wymagane okresowe sprawdzenie parametrów geotechnicznych gruntów, szczególnie wtedy, kiedy stwierdza się odstępstwa od stanów przewidzianych warunkami normalnej eksploatacji. Zasadnicze kryteria oceny powinny być oparte na wynikach pomiarów przemieszczeń, zmian ciśnienia wody w porach, przyrostach ilości wody wypływającej z drenażu zapory, a także ocen wizualnych.

Badany w 2009 roku przypadek dotyczył zapory o długości 150 m i wysokości 4,0 m, która bezawaryjnie piętrzy wodę od 15 lat. W ramach przeprowadzonych analiz wykonano badania wytrzymałości na ścinanie gruntu pozbawionego frakcji żwirowej [10], który, jak wykazały późniejsze badania [8], nie występuje w danym przekroju (rys. 4).

Następnym błędem, będącym zasadniczym tematem niniejszej pracy była niewłaściwa metoda badania parametrów wytrzymałościowych [10]. Pospółkę gliniastą, która po usunięciu frakcji żwirowej odpowiadała uziarnieniu gliny piaszczystej o zawartości frakcji ilowej 15% nasycono wodą do stopnia plastyczności  $I_L = 0,75$ , a następnie ścinano w aparacie bezpośredniego ścinania bez uprzedniej konsolidacji. Badanie ścinania wykonano metodą szybką, przy prędkości ścinania 1,0 mm/min. Uniemożliwiło to rozproszenie się ciśnienia wody w porach. Uzyskane w ten sposób wyniki nie odpowiadały rzeczywistym stanom naprężenia, stąd uzyskane z badań laboratoryjnych wartości parametrów wytrzymałościowych ( $\phi_u = 5^\circ$  i  $c_u = 2,5$  kPa) [10] zweryfikowano w późniejszych badaniach [8]. Przyjęcie nieodpowiadających rzeczywistości parametrów  $\phi_u$  i  $c_u$  było po-

wodem obliczeniowej niestateczności zapory ( $F = 0,96$ ) [10]. Zagrożenie to nie znalazło potwierdzenia w badaniach przeprowadzonej cztery lata później ocenie stanu technicznego [7].

Na podstawie przedstawionych nieprawidłowości wykonano błędną negatywną ocenę stanu technicznego [10], która stała się dla użytkownika zbiornika problemem. Decyzją Nadzoru Budowlanego został on zobligowany do przedstawienia ekspertyzy określającej sposoby usunięcia istniejącego zagrożenia, jak również do kosztownych zmian konstrukcyjnych zapory.

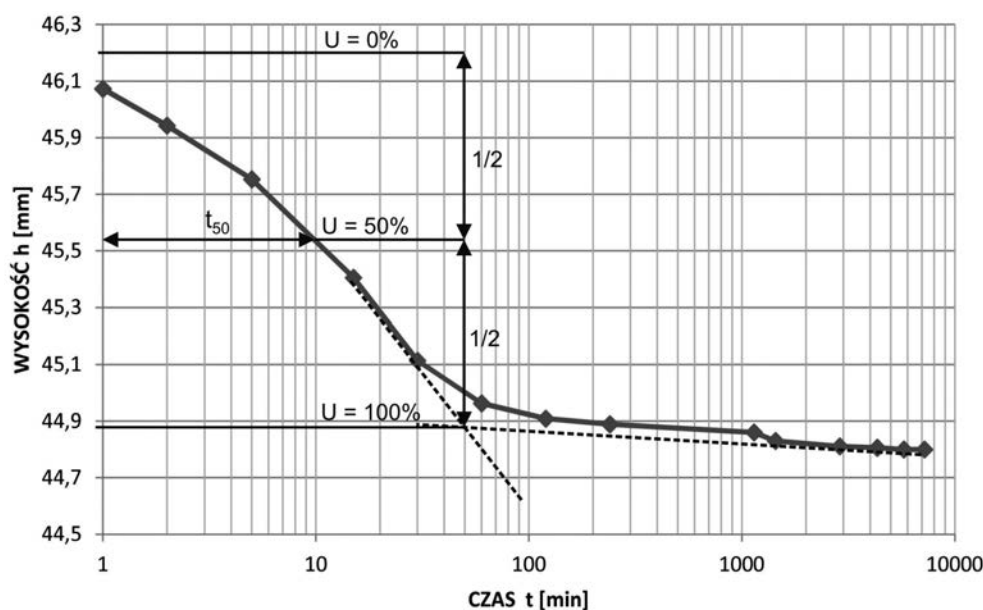
## WERYFIKACJA WARUNKÓW STATECZNOŚCI

W celu weryfikacji warunków stateczności wykonano ekspertyzę, której podstawą były dodatkowe badania geotechniczne przeprowadzone, między innymi, w miejscu wskazanego zagrożenia. Wykazano, że zapory nie zbudowano z glin piaszczystych o wartości  $I_L > 0,75$  [10], ale głównie z pospółek gliniastych zawierających od 12 do 33% frakcji żwirowej o wartościach  $I_L = 0,04 \div 0,45$  (rys. 4) [8].

W celu poprawnej prognozy stateczności potencjalnie zagrożonego przekroju wykonano badania odzwierciedlające zmiany właściwości gruntów w warunkach istniejących stanów naprężenia, polegające na wyznaczeniu parametrów wytrzymałościowych, po uprzedniej konsolidacji próbek. Badania wykonano zgodnie z zaleceniami normy [9].

### Konsolidacja

W gruntach z pospółek gliniastych z otworu 1 i 4 (rys. 4) wykonano laboratoryjne badania konsolidacji przy składowych naprężeniach  $\sigma_n = 50$  i 100 kPa, które odwzorowały stany naprężenia na potencjalnej linii poślizgu. Konsolidacje poprzedzono swobodnym, pełnym nasyceniem próbki gruntu w kasecie aparatu bezpośredniego ścinania, uzyskując stopień plastyczności  $I_L = 0,90$ . Po konsolidacji składową naprężenia  $\sigma_n$  wartości  $I_L$



Rys. 5. Krzywa konsolidacji

zmniejszyły się do 0,15 i 0,20. Określenie czasu potrzebnego do pełnego skonsolidowania podłoża ( $t$ ) dla warunków konsolidacji jednokierunkowej w strefie potencjalnej linii poślizgu określono na bazie krzywej konsolidacji (rys. 5). W tym celu wyznaczono współczynnik konsolidacji ( $c_v$ ) na podstawie metody Casagrande'a, która opiera się na uzyskanej w konsolidacji pionowej zależności wysokości próbki od czasu w skali półlogarytmicznej (rys. 5)[4]. Następnie, bazując na równaniu (2) obliczono wymagany czas konsolidacji podłoża zapory  $t$ .

$$c_v = T_v \cdot \frac{h^2}{t_{50}} \quad (3)$$

gdzie:

$T_v$  – czynnik czasu przy stopniu skonsolidowania próbki  $U = 50\%$ ,

$h$  – połowa wysokości konsolidowanej próbki,

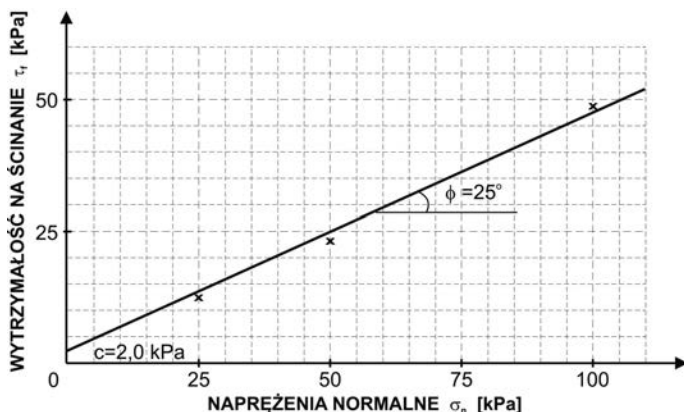
$t_{50}$  – czas odczytany z krzywej konsolidacji przy stopniu konsolidacji  $U = 50\%$ .

Czas potrzebny do skonsolidowania 1,5 m warstwy gruntu przy składowej normalnej naprężenia 50 kPa wyniósł 130 dni. Oznacza to, że grunty w strefie potencjalnej powierzchni poślizgu były skonsolidowane już po niespełna pół roku. Przy składowej normalnej naprężenia 100 kPa wynikającego z 5 m wysokości zapory i podłoża nad linią poślizgu czas konsolidacji obliczony w analogiczny sposób wyniósł 372 dni. Niezależnie zatem od możliwych okresowych zmian wilgotności kształtowanych w czasie 15 lat, jaki upłynął od czasu budowy zbiornika, nie ma możliwości, aby skonsolidowany grunt miał stopnie plastyczności na poziomie  $I_L = 0,8 \div 0,9$ . Mogłoby to mieć miejsce w strefie przebicia hydraulicznego, jednak wtedy musiałoby występować intensywne wynoszenie cząstek szkieletowych pospółek gliniastych, a takiego zjawiska nie stwierdzono.

### Wytrzymałość na ścinanie

Na skonsolidowanych próbkach wykonano badania wytrzymałości na ścinanie metodą wolną (CD) przy składowej naprężenia  $\sigma_n$  25, 50 i 100 kPa z prędkością 0,01 mm/min, uzyskując wartości parametrów wytrzymałościowych  $\phi' = 25^\circ$  i  $c' = 2,0$  kPa różniące się znacznie od wyników badania bez konsolidacji UU  $\phi_u = 5^\circ$  i  $c_u = 2,5$  kPa przeprowadzonego z prędkością ścinania 1 mm/min [10].

Współczynnik stateczności skarpy odpowietrznej obliczony z uwzględnieniem tych parametrów i uwarunkowań wyniósł  $F = 1,89$ .



Rys. 6. Wyniki badania wytrzymałości na ścinanie

W prognozach stateczności strony odpowietrznej normalnie eksploatowanych zapór ziemnych panują warunki stateczności długotrwałej. Analizy stanów równowagi granicznej powinny być prowadzone w warunkach uwzględniających konsolidację i składowe efektywne naprężenia.

Do analiz i badań powinny być przyjmowane grunty i ich stany rzeczywiście występujące w miejscach potencjalnych niestateczności, a badania laboratoryjne powinny odwzorowywać rzeczywisty układ obciążeń. Jak wykazano niestosowanie tej zasady powoduje uzyskiwanie niewłaściwych wyników. W tym przypadku wartości kąta tarcia wewnętrznego uzyskane metodą z konsolidacją okazały się pięciokrotnie większe od wartości uzyskanych metodą szybką.

Po 15 latach eksploatacji nie stwierdzono oznak osuwisk skarpy lub wyparcia na przedpolu zapory, a najwyższy poziom wody gruntowej jest 1,0 m poniżej podstawy skarpy odpowietrznej. Stateczność badanej zapory nie jest zagrożona.

W przypadku budowli ziemnych zdarzają się badania gruntów i warunków stateczności nieodwzorowujące stanów występujących w rzeczywistości. Skutkuje to nietrafnymi zaleceniami, które albo niedoceniają istniejącego zagrożenia, albo prowadzą do ponoszenia przez użytkowników nieuzasadnionych kosztów dalszego użytkowania obiektów.

### LITERATURA

1. Andresen L., Saigili G., Grimstad G.: Finite element analysis of Saint-Alban embankment failure with an anisotropies undrained strength model. Proceedings of the 15-th European Conferences of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Athens 2011, 1111-1118.
2. Bishop A., Bjerrum L.: The relevance of the triaxial test to the solution of stability problems. Proc. ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, Colorado 1960, 437-501.
3. Feel R., Mac Gregor P., Stapledon D.: Geotechnical Engineering Embankment Dams. Balkema, Rotterdam 1992.
4. Head K.: Manual of soil laboratory testing. vol. 3, Effective Stress Test, Pentech Press, London 1986.
5. Henry F.: The design and construction of engineering foundations. Chapman and Hall, London, New York 1985.
6. Lambe W. T., Whitman R. V.: Mechanika gruntów. Tom 2, Arkady, Warszawa 1978.
7. Parylak K., Parylak A.: Ekspertyza stanu technicznego zapory III zbiornika retencyjnego na Potoku Klikawa w Lewinie Kłodzkim. Wrocław 2013.
8. Parylak K., Safader L., Zięba Z., Witek.: Badania geotechniczne i instalacja sieci piezometrów rurowych i reperów na zaporze III w Lewinie Kłodzkim w km 9+ 300 Potoku Klikowa. Tergo, Wrocław 2013.
9. PN-EN 1997-2. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badania podłoża gruntowego.
10. Pięcioletnia ocena stanu technicznego obiektów hydrotechnicznych zbiornika retencyjnego Lewin Kłodzki na Potoku Klikawa. xxxx, Wrocław 2009.