

inż. Joanna Mucha<sup>1)</sup>  
 inż. Marcelina Żyła<sup>1)</sup>  
 inż. Tomasz Sadowski<sup>1)</sup>  
 dr inż. Rafał Szydłowski<sup>2)\*</sup>

# O sprężaniu betonowych zapór wodnych

*About prestressing of concrete dams*

DOI: 10.15199/33.2015.09.36

(Artykuł przeglądowy)

**Streszczenie.** Wznoszenie masywnych zapór wodnych zapoczątkowano w starożytnej Mezopotamii i na Bliskim Wschodzie. Pierwszym zaporom stabilność zapewniała ich ogromna masa. Obecnie zapory są kotwione do podłoża kotwami dużej mocy. Rozwiązanie takie zapewnia stabilność zapór przy zmniejszonej ich masywności. W artykule, na przykładzie wzmocnienia zapory Eder w Niemczech, przedstawiono system sprężania zapór wodnych oraz wynikające z tego korzyści.

**Słowa kluczowe:** kotwa gruntowa, sprężenie, zapora wodna.

**Abstract.** Erection of dams was initiated in the ancient Mesopotamia and in the Middle East. The stability of the first dams was achieved by the large mass of masonry and concrete material. The development of ground anchoring system enabled post-tensioning of the dams. The dam stability is ensured with reduced material mass. This paper present the example of Eder Dam (Germany) strengthening with prestressing tendons and derived advantages from prestressing.

**Keywords:** anchor, dam, post-tensioning.

**W**znoszenie zapór wodnych jest mocno zakorzenione w dziejach historii budownictwa. Pierwsze zapory powstały w starożytnej Mezopotamii i na Bliskim Wschodzie. Najstarsza zapora wodna znajdowała się w mieście Jawa w Jordanii (datę jej powstania szacuje się na 3500 lat p.n.e.). Obecnie w świecie istnieje ok. 45 tys. dużych zapór wodnych. Dążenie do zmniejszenia zużycia ogromnej ilości betonu niezbędnej do zapewnienia równowagi zapór półciepłych stały się bodźcem do szukania nowych rozwiązań już kilka dekad temu. W artykule przedstawiono przykład zastosowania kotew sprężających mocowanych w gruncie do przywrócenia stabilności zapory Catagunya oraz korzyści wynikające z ewentualnej realizacji podobnej konstrukcji jako sprężonej.

## O potrzebie sprężania zapór

Jednym ze sposobów zmniejszenia masywności zapór grawitacyjnych stała się koncepcja zapór wstępnie sprężonych, kotwionych do podłoża. Przełomem we wznoszeniu zapór było opracowanie technologii kotwienia w gruncie stalowych cięgien o mocy kilkuset ton [1]. Kotwienie zapór do podłoża stosuje się powszechnie przy trudnych warunkach posadowienia, w celu podniesienia wysokości zapory, dopasowania nośności zapory do nowych wa-

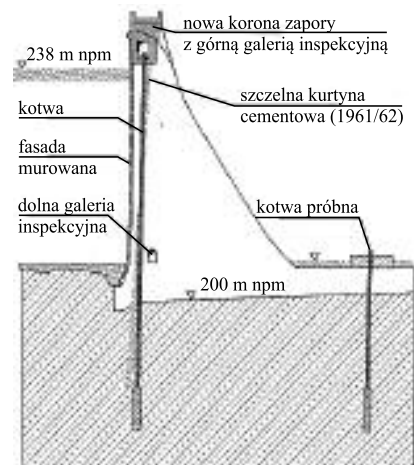
runków hydrologicznych i przepisów dotyczących wydajności urządzeń spustowych. Budowę zakotwienia używanego do sprężania zapór przedstawiono na przykładzie wzmocnienia murywanej konstrukcji zapory Eder.

## Wzmocnienie zapory Eder w Niemczech przez sprężenie

Zaporę Eder w Niemczech wzniesiono w latach 1908 – 1914. Budowlę wykonano z bloków z muskowitu łączonych cementem pucolanowym. Szerokość zapory u podstawy wynosi 36 m, a na grzbiecie 6,0 m. Obiekt ma długość 270 m przy podstawie i 400 m na koronie. Całkowita wysokość konstrukcji wynosi 47 m, a pojemność zbiornika Eder to 202,4 mln m<sup>3</sup> [4].

Pod koniec XX w. wykonano przegląd techniczny konstrukcji, który wykazał liczne przecieki w dolnych partiach zapory. Wstępne analizy wykazały, iż w pierwotnie wykonanym w 1908 r. projekcie w analizie stateczności zapory nie uwzględniono ciśnienia wody porowej pod fundamentem. Dodatkowo, w trakcie użytkowania zmieniły się przepisy dotyczące projektowania zapór wodnych. Z niemieckiej normy (DIN 19702) oraz [5] wynika, że zapora powinna wytrzymać tysiącletni szczytowy przepływ wody 1100 m<sup>3</sup>/s, natomiast konstrukcję zaprojektowano na wartość stuletnią 490 m<sup>3</sup>/s. Konieczne więc było obniżenie zwierciadła wody w zbiorniku lub znalezienia rozwiązania gwarantującego stabilność. Po wnikliwej analizie obliczeniowej przeprowadzonej przez BAW (Federalny Instytut Inżynierii Wodnej w Niemczech),

zdecydowano, że w celu zapewnienia stateczności zapory należy użyć 104 kabli sprężających (kotew) mocowanych w podłożu (rysunek 1). Każdą kotwę tworzyły 34 sploty sprężające średnicy 15,2 mm. Siła naciągu kabla wynosiła 4500 kN, rozstaw 2,25 m, całkowita długość 70 ÷ 75 m, a długość samego zakotwienia 10 m [3]. Kable składają się z dwóch odcinków: czynnego z przyczepnością (na którym zostaje przekazana siła na podłożu) oraz bez przyczepności łączącego odcinek czynny z zakotwieniem na koronie zapory. Budowę kabla w części bez przyczepności przedstawiono na rysunku 2a. W wierconym otworze średnicy 273 mm zainstalowano rurę polietylenową o gładkiej ścianie grubości 11,4 mm i średnicy wewnętrznej 200 mm. We wne-



**Rys. 1. Przekrój poprzeczny zapory Eder wraz ze sprężeniem [4]**

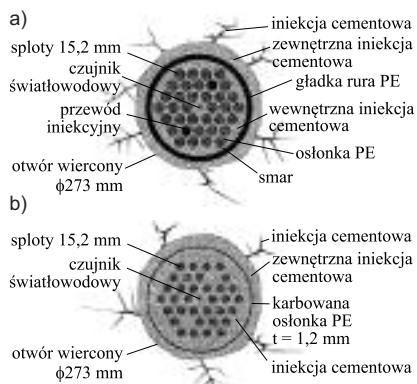
*Fig. 1. The Eder dam vertical cross-section with prestressing [4]*

<sup>1)</sup> Studenci Koła Naukowego Konstrukcji Sprężonych Politechniki Krakowskiej

<sup>2)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>\*</sup> Autor do korespondencji:  
 e-mail: rszydowski@pk.edu.pl

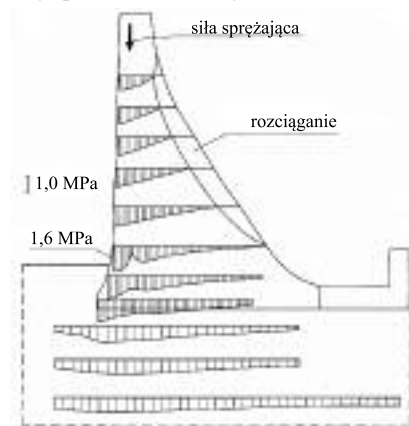
trzu rury znajdują się 34 sploty bez przyczepności. Wnętrze rury oraz przestrzeń pomiędzy nią a materiałem skalnym zapory (bądź podłoża) wypełnione są iniekcją cementową. W części aktywnej kotwy (z przyczepnością) sploty pozbawione są smaru i osłonek (rysunek 2b), a gładką rurę zastąpiono żebrowaną osłonką PE o ściance grubości 1,2 mm.



**Rys. 2. Przekrój kotwy sprężającej: bez przyczepności (a), z przyczepnością na odcinku przekazania siły na podłożu (b) [4]**

*Fig. 2. Prestressing anchor cross-section: unbonded segment (a) and bonded active segment (b) [4]*

W pracach [2, 4] przedstawiono wyniki własnych analiz numerycznych wyteżenia konstrukcji wraz z podłożem w stanie istniejącym oraz po wzmocnieniu. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 3. W stanie pustym zbiornika po sprężeniu zapory (rysunek 3) po stronie wody uzyskano pionowe ściskanie wynoszące 1,6 MPa. Naprężenia rozciągające występują tylko przy przeciwnej powierzchni zapory. Głębokość strefy rozciągań wynosi ok. 3,5 m. Jako że konstrukcja murowa nie jest odporna na pionowe naprężenia rozciągające, należy spodziewać się zarysowania. Ewentu-

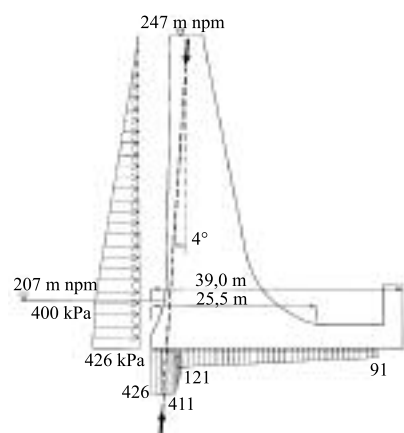


**Rys. 3. Naprężenia pionowe w wyniku działania ciężaru własnego i sprężenia [4]**  
*Fig. 3. Vertical stresses due to dead weight and prestressing [4]*

alne rysy nie mają jednak znaczenia dla stabilności czy szczelności konstrukcji. Po napełnieniu zbiornika do górnej krawędzi zapory uzyskano ściskanie na całej grubości masywu. Największe naprężenia ściskające wynoszą 1,6 MPa.

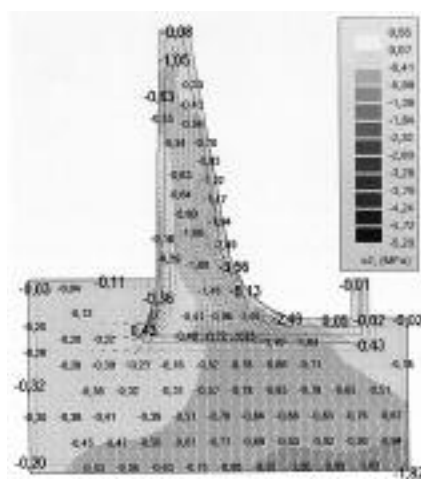
**Alternatywne rozwiązanie betonowej zapory sprężonej**

Przeprowadziliśmy własną analizę dotyczącą możliwości wykonania zapory z betonu wstępnie sprężonego, przy założeniu podobnych warunków wodnych i gruntowych. Po kilku próbach przyjęto znacznie uszczuploną wersję zapory. Szerokość podstawy zmniejszono z 36 do 25,5 m (rysunek 4). W obliczeniach założono parametry podłoża oraz ciśnienie wody porowej pod fundamentem zgodnie z [4] (rysunek 4). Przyjęto podobne sprężenie (4400 kN co 2,3 m, zmniejszone ze względu na straty sił o 10%). Parametry masywu zapory przyjęto dla betonu klasy C30/37. Wykonano model MES w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional w przestrzeni 2D, złożony z czterowęzłowych elementów skończonych o największym wymiarze 0,5 m.



**Rys. 4. Geometria i obciążenia analizowanej zapory (rysunek własny)**  
*Fig. 4. Geometry and loads of analysed dam (own picture)*

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki analizy w postaci głównych naprężeń ściskających w masywie zapory i podłożu po napełnieniu zbiornika. Naprężenia w masywie sięgają wartości 5,13 MPa. Na styku zapora-podłożo występują naprężenia ściskające o kierunku zbliżonym do pionowego, co świadczy o trwałym dościsnieniu konstrukcji do podłoża. Przy powierzchni zapory od strony wody zarejestrowano pionowe rozciągania wynoszące 1,0 MPa, które nie stanowią problemu dla konstrukcji żelbetowej.



**Rys. 5. Naprężenia główne ściskające od sprężenia, ciężaru własnego i parcia wody (rysunek własny)**

*Fig. 5. Principal compressive stresses due to dead weight, prestressing and water pressure (own picture)*

**Wnioski**

Na podstawie przeprowadzonej analizy obliczeniowej alternatywnej konstrukcji wykonanej od początku z betonu sprężonego stwierdzono, iż wstępne sprężenie zapory pozwala zapewnić warunki stabilności przy zmniejszeniu masy konstrukcji o ok. 30%. Zważywszy na krajowe warunki hydrogeologiczne oraz ekonomiczne, domniemywać można, iż w najbliższych dziesięcioleciach powstanie kolejnych zapór wodnych o skali podobnej lub zbliżonej do istniejących jest mało prawdopodobne. Sprężenie może znaleźć jednak zastosowanie do wznoszenia mniejszych zapór bądź wzmocnienia czy podwyższania istniejących konstrukcji.

**Literatura**

[1] <http://bbr.pl/start.php?page=2&id=72>.  
 [2] Witke W., Witke M., Schröder D., Polczyk H.: Upgrading the stability of three masonry dams in different ways. Proceedings of International congress on conservation and rehabilitation of dams: Dam maintenance and rehabilitation, Madrid, 2002, pp. 769-776.  
 [3] Dietz K., Habel W., Feddersen I.: Eder Dam, stabilization by permanent rock anchors-Monitoring and long term performance. ICOLD-69th Annual Meeting in Dresden, 2001.  
 [4] Witke W., Schröder D.: Upgrading the stability of the Eder masonry dam with prestressed vertical anchors. International Journal on Hydropower and Dams, 1 (5), 1994, pp. 57 – 66.  
 [5] DIN 19702:2010-06: Solid structures in hydraulic engineering-Bearing capacity, serviceability and durability, February 2013.

Przyjęto do druku: 27.07.2015 r.