

inż. Joanna Mucha¹⁾
 inż. Marcelina Żyła¹⁾
 inż. Tomasz Sadowski¹⁾
 dr inż. Rafał Szydłowski^{2)*}

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 presents the example of Eder Dam (Germany) strengthening with prestressing tendons and derived advantages from prestressing.

Keywords: anchor, dam, post-tensioning.

Wznoszenie 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 półciężkich 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-

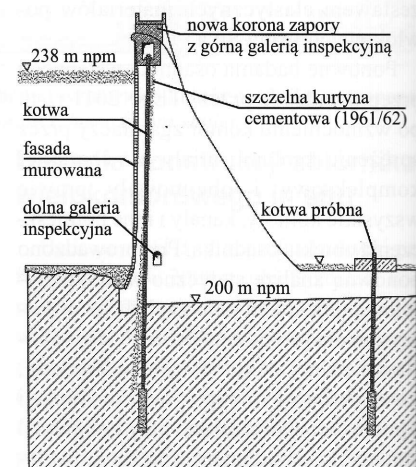
runków hydrologicznych i przepisów dotyczących wydajności urządzeń spustowych. Budowę zakotwienia używanego do sprężania zapór przedstawiono na przykładzie wzmocnienia murowanej konstrukcji zapory Eder.

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 m³ [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 (DIN19702) oraz [5] wynika, że zapora powinna wytrzymać tysiącletni szczytowy przepływ wody 1100 m³/s, natomiast konstrukcję zaprojektowano na wartość stułetnią 490 m³/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 splety 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 wnętrzu



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

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

¹⁾ Studenci Koła Naukowego Konstrukcji Sprężonych Politechniki Krakowskiej

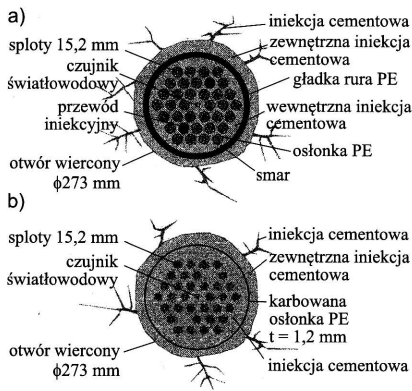
²⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii

Łądowej

^{*} Autor do korespondencji:

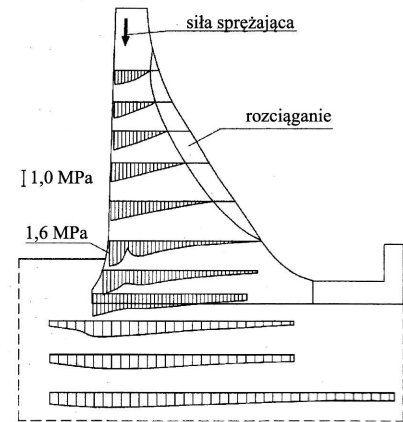
e-mail: rszydowski@pk.edu.pl

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



**Rys. 2. Przekrój kotwy sprężającej: bez przy-
czepności (a), z przyczepnością na odcinku
przekazania siły na podłoże (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 istnie-
jącym oraz po wzmocnieniu. Otrzymane
wyniki przedstawiono na rysunku 3. W sta-
nie pustym zbiornika po sprężeniu zapory
(rysunek 3) po stronie wody uzyskano piono-
we ściskanie wynoszące 1,6 MPa. Naprę-
żenia rozciągające występują tylko
przy przeciwnej powierzchni zapory. Głę-
bokość strefy rozciągań wynosi ok. 3,5 m.
Jako że konstrukcja murowa nie jest odpor-
na na pionowe naprężenia rozciągające, na-
leży spodziewać się zarysowania. Ewentu-

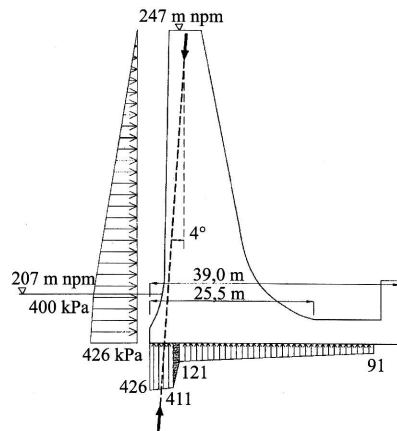


**Rys. 3. Naprężenia pionowe w wyniku dzia-
łania ciężaru własnego i sprężenia [4]**
*Fig. 3. Vertical stresses due to dead weight
and prestressing [4]*

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

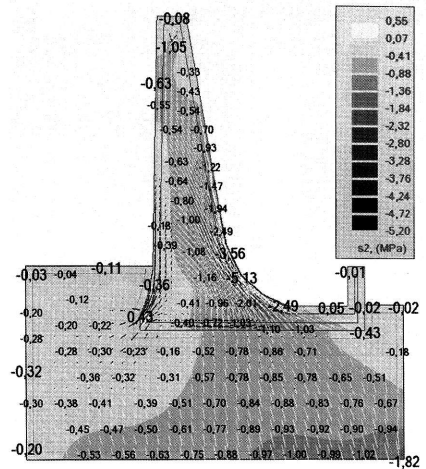
**Alternatywne rozwiązanie
betonowej zapory sprężonej**

Przeprowadziliśmy własną analizę do-
tyczącą możliwości wykonania zapory
z betonu wstępnie sprężonego, przy zało-
żeniu podobnych warunków wodnych
i gruntowych. Po kilku próbach przyjęto
znacznie uszczuploną wersję zapory. Szer-
okość podstawy zmniejszono z 36 do
25,5 m (rysunek 4). W obliczeniach założo-
no parametry podłoża oraz ciśnienie wody
porowej pod fundamentem zgodnie z [4]
(rysunek 4). Przyjęto podobne sprężenie
(4400 kN co 2,3 m, zmniejszone ze wzglę-
du na straty sił o 10%). Parametry masywu
zapory przyjęto dla betonu klasy C30/37.
Wykonano model MES w programie Auto-
desk Robot Structural Analysis Profession-
al w przestrzeni 2D, złożony z czterowę-
złowych elementów skończonych o naj-
większym wymiarze 0,5 m.



**Rys. 4. Geometria i obciążenia analizowa-
nej 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 zaporą-podłoże występują na-
prężenia ściskające o kierunku zbliżonym
do pionowego, co świadczy o trwałym do-
ciskaniu konstrukcji do podłoża. Przy po-
wierzchni zapory od strony wody zareje-
strowano 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 anali-
zy obliczeniowej alternatywnej konstruk-
cji wykonanej od początku z betonu sprę-
żonego stwierdzono, iż wstępne spręże-
nie zapory pozwala zapewnić warunki
stabilności przy zmniejszeniu masy kon-
strukcji o ok. 30%. Zważywszy na kra-
jowe warunki hydrogeologiczne oraz
ekonomiczne, domniemywać można, iż
w najbliższych dziesięcioleciach pow-
stanie kolejnych zapór wodnych o skali
podobnej lub zbliżonej do istniejących
jest mało prawdopodobne. Sprężenie
może znaleźć jednak zastosowanie do
wznoszenia mniejszych zapór bądź
wzmocniania czy podwyższania istnieją-
cych 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 con-
gress 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-Monito-
ring 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 verti-
cal anchors. International Journal on Hydropower and
Dams, 1 (5), 1994, pp. 57 - 66.
[5] DIN 19702:2010-06: Solid structures in hy-
draulic engineering-Bearing capacity, serviceabi-
lity and durability, February 2013.

Przyjęto do druku: 27.07.2015 r.