

Jerzy Wira, Zdzisław Jan Małecki

## USZKODZENIA POWIERZCHNI BETONOWYCH BUDOWLI HYDROTECHNICZNYCH ZBIORNIKA RETENCYJNEGO POKRZYWNICA

### Streszczenie

Beton z racji swej zasadowości (wartość współczynnika  $\text{pH} \geq 12$ ) stanowi warstwę ochronną stali zbrojeniowej przed korozją. W wyniku szkodliwego wpływu wody, dwutlenku węgla oraz soli, odczyn alkaiczny ulega obniżeniu. Przy wartości  $\text{pH} = 10$  (11) beton wykazuje tylko niewielką lub w ogóle żadną aktywność korozyjną stali zbrojeniowej. Zwiększenie się objętości korodującej stali zbrojeniowej (pęcznienie) w następstwie utraty alkaiczności betonu nazywamy karbonatyzacją betonu. W oparciu o wyniki badań stopnia karbonatyzacji betonu elementów żelbetowych zbiornika retencyjnego do głębokości 2,5 cm stwierdzono początek procesu karbonatyzacji szczególnie w strefie falowania wody oraz częściowo w strefie powyżej maksymalnego poziomu piętrzenia wody. Na stopień karbonatyzacji elementów żelbetowych budowli hydrotechnicznych ma istotny wpływ  $\text{pH}$  wody (średnie  $\text{pH}$  wody zretencjonowanej w zbiorniku wynosiło od 7,6 – 7,9).

**Słowa kluczowe:** zbiornik retencyjny, karbonatyzacja betonu, budowle wodne, korozja stali, odczyn  $\text{pH}$  wody.

### WPROWADZENIE

Zbiorniki wodne stanowią ważny element w otoczeniu człowieka. W celu powstrzymania zmniejszenia zdolności retencyjnych zlewni niezbędne jest zwiększenie małej retencji, m.in. poprzez odtworzenie zlikwidowanych i zanikających oczek wodnych, budowę i odbudowę zbiorników retencyjnych i piętrzeń na ciekach – zbiorniki retencyjne (zaporowe) zmieniają reżim hydrologiczny rzeki powodując zwiększenie powierzchni lustra wody, zmianę głębokości, czasu i prędkości przepływu. W zbiornikach retencyjnych w przypadku nieuporządkowania gospodarki wodno-ściekowej w zlewni zauważa się pogarszanie stanu czystości wód powierzchniowych w tychże zbiornikach.

Według Światowego Rejestru Zapór (ICOLD, 1998) liczba wielkich zapór (o wysokości ponad 15 m) na świecie wynosi 36 235. W 1900 r. istniało zaledwie 427 wielkich zapór. Większość sztucznych zbiorników zaporowych powstała w drugiej połowie XX w. Współczesna koncepcja budowy zbiorników wymaga dokładnej oceny oddziaływania na środowisko. Istnieją zbiorniki zaporowe o pojemności przekraczającej

---

prof. nadzw. dr hab. inż. Jerzy WIRA – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

dr hab. inż. Zdzisław MAŁECKI – Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Inżynierii Lądowej i Wodnej „EUROEXBUD” w Kaliszu.

100 km<sup>3</sup> (np. Brack na Angarze w Rosji – 169, Asuan na Nilu w Egipcie – 162, Kariba na Zambezi w Zambii – 160, Akosambo na Wolcie w Ghanie – 148, D. Johnson Manicouagen w Kanadzie – 142, El Mantaro Caroni w Wenezueli – 138). Natomiast zbiorników zaporowych na świecie o pojemności od 50,0 do 100,0 km<sup>3</sup> wykonano do roku 1996 w ilości 10. W Polsce istnieje 19 zbiorników zaporowych o pojemności ponad 50,0 mln m<sup>3</sup> [GUS Ochrona Środowiska, 2006].

**Zbiorniki retencyjne** powstają w wyniku przegrodzenia doliny rzeki zaporą. Najczęściej są to obiekty wielozadaniowe. Zbiorniki retencyjne mają istotne znaczenie w gospodarce wodą, ponieważ umożliwiają czynne wpływanie służbom gospodarki wodnej na wyrównywanie losowych rozkładów i stanów wód w rzekach.

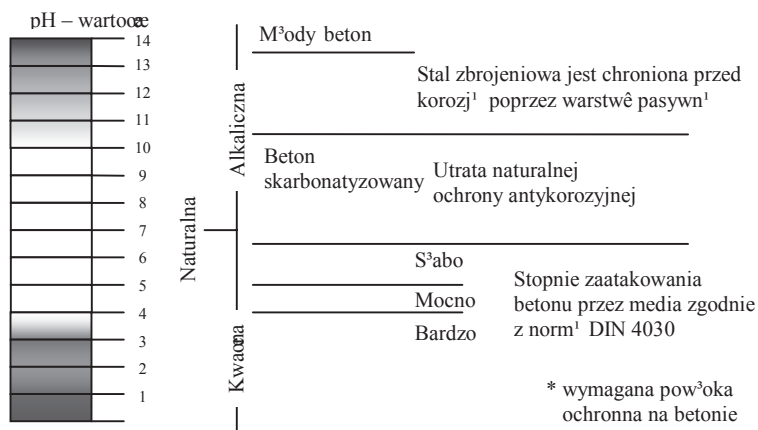
Podstawowe zadania zbiorników retencyjnych (zaporowych), to: ochrona przed powodzią (zbiorniki zaporowe duże i w mniejszym stopniu średnie w zasadzie przystosowane są do przechwytywania dwóch fal powodziowych lub ich szczytów w celu zmagazynowania wody i zmniejszenia wysokości fal powodziowych na odpływie w okresach: wiosenno - roztopowym oraz letnim), energetyka wodna (produkcja energii elektrycznej), zaopatrzenie w wodę (aglomeracji miejskich i regionów przemysłowych), wyrównywanie przepływów, żegluga, nawodnienia, rybołówstwo, wypoczynek (turystyka i sporty wodne).

Na powierzchniach betonowych budowli wodnych kumulują się niekorzystne oddziaływania niszczące beton, a mianowicie: nawilżanie, zamarzanie i ścieranie wywołane przez krę lodową i falowanie hydrodynamiczne oraz występuje chemiczne oddziaływanie wody. Konstrukcje większości budowli wodnych są wykonane z betonu o małej mrozoodporności i wytrzymałości, gdyż ich budowa przypadła na okres, gdy w Polsce niedostępna była nowoczesna technologia betonu. Naprawy betonu wykonywane w przeszłości zaprawą cementową lub betonem pękały i odpajały się od podłoża. Zła jakość podłoża betonowego i ekstremalne warunki ekspozycji na środowisko budowli wodnych to istotne utrudnienia i przy skutecznej naprawie lub zabezpieczeniu uszkodzonej powierzchni betonowej.

## KARBONATYZACJA BETONU

Beton z racji swej zasadowości (wartość współczynnika  $\text{pH} \geq 12$ ) stanowi warstwę ochronną stali zbrojeniowej przed korozją. W wyniku szkodliwego wpływu wody, dwutlenku węgla oraz soli, odczyn alkaliczny ulega obniżeniu. Przy wartościach  $\text{pH} = 10$  (11) beton wykazuje tylko niewielką lub w ogóle żadną aktywność korozyjną stali zbrojeniowej. W ślad za postępującą karbonatyzacją betonu naturalna powłoka ochronna stali zbrojeniowej ulega zanikowi, co prowadzi do powstawania uszkodzeń widocznych gołym okiem. Poprzez zwiększenie się objętości korodującej stali zbrojeniowej (pęcznienie) na skutek korozji następuje uszkodzenie jej betonowej otuliny.

Przyczyną tak wysokiej wartości  $\text{pH}$  jest rozpuszczalny w cieczy znajdującej się w porach betonu wodorotlenek wapniowy ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) z cementu:  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$ ; w wodzie:  $\text{Ca}^{++}2\text{OH}^-$   $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3$ ; oraz w wodzie  $\text{CO}_3^{--}2\text{H}^+$  z  $\text{Ca}^{++}$  i  $\text{CO}_3^{--}$



Rys. 1. Karbonatyzacja betonu

powstaje  $\text{CaCO}_3$ . Karbonatyzacja betonu powstaje w wyniku przemiany wodorotlenku wapniowego wchodzącego w reakcję z kwasem węglowym ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) w węglan wapniowy ( $\text{CaCO}_3$ ). Znajdujący się w kamieniu cementowym lub uwolniony  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz pozostały  $\text{CaO}$  reaguje w obecności wody, w wyniku reakcji jonowej w  $\text{CaCO}_3$  [Maśecki Z. i in. 2007]. W miarę postępującej karbonatyzacji, naturalna powłoka ochronna stali zbrojeniowej ulega zanikowi, co prowadzi do powstania uszkodzeń widocznych gołym okiem. Poprzez zwiększenie się objętości korodującej stali zbrojeniowej (pęcznienie) na skutek korozji następuje uszkodzenie jej betonowej otuliny.

Zmniejszenie alkaliczności betonu poniżej  $\text{pH} = 10$  powoduje zmniejszenie naturalnej ochrony betonu przed korozją (karbonatyzacja betonu). Nieosłonięte i niezabezpieczone konstrukcje betonowe z biegiem lat ulegają uszkodzeniom, a dłużej czasie badania betonu sygnalizują zbliżające się zagrożenie ich powstania. W tej sytuacji należy natychmiast przystąpić do zabiegów renowacyjnych powierzchni betonowych. Nowo wznoszone budowle zazwyczaj posiadają już powłoki ochronne opóźniające procesy karbonatyzacji. Zależnie od rodzaju budowli oraz jej stanu technicznego i rodzaju obciążenia, którym podlega, dobierane są odpowiednie metody (systemy) ochronne lub naprawcze.

## BADANIA POWIERZCHNI BETONOWYCH

Niemniej jednak badania grubości betonowej otuliny zbrojenia dokonujemy za pomocą aparatu do pomiaru indukcji magnetycznej. Natomiast stopień karbonatyzacji betonu określamy na podstawie zmiany wartości jego odczytu  $\text{pH}$ . Specjalnym płynem indykacyjnym spryskujemy więc powierzchnię prześwietlanego betonu. W górnej, już skarbonatyzowanej warstwie betonu o obniżonej wartości  $\text{pH}$ , wskaźnik pozostaje bezbarwny, w warstwach głębszych jeszcze nie skarbonatyzowanych, barwi on beton na

kolor fioletowy. Jeżeli strefa skarbonatyzowana dociera do stali zbrojeniowej, to znak, że zabiegi renowacyjne należy rozpocząć natychmiast [Małecki Z. 2009]. Przed opracowaniem koncepcji renowacji należy przeprowadzić dalsze pomiary wytrzymałości betonu na ściskanie oraz określić rozwartość rys. Mikrorysy o rozwartości do 0,2 mm w przypadku zmiany temperatury i obciążenia najczęściej nie uaktywniają się i stanowią tym samym jedynie mankament optyczny. Natomiast makrorysy pojawiają się po dojrzaniu betonu wskutek lokalnego przekroczenia wytrzymałości betonu na rozciąganie, które zagrażają trwałości budowli [Antkiewicz J. Tężycki W., 2007].

Częstym uszkodzeniem powierzchni betonu w strefie falowania wody jest ubytek spoiwa objawiający się „obnażaniem” zalegającej płytko warstwy ziaren kruszywa grubego (fot. 1). Na powierzchniach betonowych powyżej strefy falowania często w zagłębieniach porastają mchy, porosty i trawy co prowadzi w dłuższej perspektywie do osłabienia powierzchniowych warstw betonu (fot. 2). Wobec powyższego należy koniecznie, regularnie usuwać rośliny mechanicznie lub chemicznie.



Fot. 1. Uszkodzona powierzchnia betonowa w strefie falowania wody



Fot. 2. Widoczne porastające mchy w połączeniach płyt betonowych

## **BADANIA STOPNIA KARBONATYZACJI ELEMENTÓW KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH ZBIORNIKA POKRZYWNICA (SZAŁE) W LATACH 2004–2006**

Zapora ziemna zbiornika retencyjnego Pokrzywnica (Szałe), usytuowana jest na rzece Pokrzywnica w odległości 1,365 km od ujścia Pokrzywnicy do Proсны. Korpus zapory został wykonany z piasków drobnych i średnich pozyskanych z miejscowego złoża. Uszczelnienie budowli stanowi ekran na skarpie odwodnej wykonany z płyt żelbetowych grubości 15 cm. Pomiędzy płytami, na dylatacjach, zamontowana jest taśma uszczelniająca z PCV szerokości 20 cm. Płyty są ułożone na warstwie chudego betonu grubości 10 cm. Ekran dolną częścią opiera się o betonowy blok oporowy. Wieża żelbetowa przelewowa o kształcie koła i średnicy 10 m usytuowana jest w odległości 21,60 m od osi zapory (fot. 3, 4). W dolnej części wieża łączy się z dwoma przewodami żelbetowymi o wymiarach 1,80 × 1,50 m, używanymi do przepuszczenia wielkich wód lub do opróżnienia zbiornika. Podstawowe parametry zapory: maksymalna wysokość 6,0 m, długość 473 m, szerokość korony 8,5 m, nachylenie skarpy odwodnej i odpowietrznej 1 : 3. Odczyn pH próbek betonu wykonano za pomocą specjalnego płynnego indykatora (Indykator Lösung-Deitermann). Dokonano nie niszczących badań uzupełniających za pomocą aparatu do pomiarów indukcji magnetycznej grubości betonowej otuliny zbrojenia, które potwierdziły wyniki dotyczące karbonatyzacji betonu (tab. 1) [Małecki Z. 2008, Rozprawa].



**Fot. 3.** Wieża upustowa zbiornika Pokrzywnica

**Tabela 1.** Wyniki badań stopnia karbonatyzacji konstrukcji żelbetonowych zbiornika Pokrzywnica, tj.: p'yt na skarpie odwodnej, wieży przelewowej od strony zewnętrznej w latach 2004–2005. [Wyniki własne]

L.p.	Nazwa	Strefa falowania wody						Strefa powyżej maksymalnego poziomu piętrzenia wody					
		15.07.05			25.06.04			15.07.05			25.06.04		
		punkt	głębokość (cm)	wartość ph	punkt	głębokość (cm)	wartość ph	punkt	głębokość (cm)	wartość ph	punkt	głębokość (cm)	wartość ph
1.	Płyta żelbetowa skarpy odwodnej	B <sub>1</sub> '	1.0 – 2.5	9.0	B <sub>3</sub>	1.0 – 3.0	9.0	B <sub>2</sub> '	1.0 – 3.0	9.5	B <sub>4</sub> '	1.0 – 3.0	9.5
		B <sub>1</sub> ''	2.5 – 5.0	10.0	B <sub>3</sub> ''	3.0 – 5.0	10.5	B <sub>2</sub> ''	3.0 – 5.0	10.5	B <sub>4</sub> ''	3.0 – 5.0	11.0
2.	Wieża przelewowa od strony zewnętrznej	A <sub>1</sub> '	1.0 – 3.0	8.0	A <sub>3</sub> '	1.0 – 3.0	8.0	A <sub>2</sub> '	1.0 – 2.5	8.0	A <sub>4</sub> '	1.0 – 3.0	8.0
		A <sub>1</sub> ''	3.0 – 5.0	9.0	A <sub>3</sub> ''	3.0 – 5.0	9.5	A <sub>2</sub> ''	2.5 – 5.0	9.0	A <sub>4</sub> ''	3.0 – 5.0	9.5



Fot. 4. Wieża upustowa i skarpa odwodna zbiornika Pokrzywnica – przybliżenie (widoczne miejsca ubytków betonu w następstwie procesu karbonatyzacji)

W oparciu o wyniki badań stopnia karbonatyzacji betonu płyty żelbetowej skarpy odwodnej stwierdzono w strefie falowania początek procesu karbonatyzacji betonu (utrata naturalnej ochrony antykorozyjnej) szczególnie warstwy na głębokości 1,0 – 2,5 cm, jak również częściowo w strefie powyżej maksymalnego poziomu piętrzenia wody na głębokości 1,0 – 3,0 cm. Ażeby ograniczyć proces karbonatyzacji betonu zaleca się wykonanie zabiegów renowacyjnych powierzchni betonowych.

Na stopień karbonatyzacji elementów żelbetowych zapory i wieży przelewowej zbiornika Pokrzywnica ma istotny wpływ skład fizykochemiczny wody w zbiorniku Pokrzywnica. Oddziaływanie wód IV klasy jakości (śr. pH wody od 7,6–7,9) zgromadzonych w zbiorniku w połączeniu z falowaniem hydrodynamicznym zwierciadeł wody w następstwie przyrostu prędkości wiatru (wynosiło śr. 5,7 – 10,7%) wraz z nawilżaniem, przemarzaniem i ścieraniem przez krę lodową ma szczególnie wpływ na większy stopień karbonatyzacji betonu oraz na niekorzystne oddziaływanie niszczące w strefie falowania.

## WNIOSKI

Na stopień karbonatyzacji elementów żelbetowych zapory i wieży przelewowej zbiornika Pokrzywnica ma istotny wpływ:

1. Klasa betonu i sposób zabezpieczenia jego powierzchni. Postępujący proces karbonatyzacji betonu przy pH poniżej 10 (11) powoduje zanik naturalnej powłoki

ochronnej stali zbrojeniowej, co prowadzi do powstania uszkodzeń (korozja stali zbrojeniowej).

2. Skład fizykochemiczny wody w zbiorniku (pH wynosiło od 7,6 do 7,9).
3. Falowanie hydrodynamiczne zwierciadła wody w następstwie przyrostu prędkości wiatru, szczególnie w strefie falowania wody.
4. Przemarzanie, ścieranie betonu przez krę lodową.
5. Pośrednio wrastanie w zagłębienia (makrorysach) betonu: mchów, porostów i traw oraz krzewów (brzoza).

## LITERATURA

1. Antkiewicz J. Teżycki W.: Trwałość i przyczepność napraw wykonanych na betonowych ekranach zapór ziemnych. Nauka, przyroda, technologia – Melioracje i Inżynieria Środowiska, AR, Poznań 2007.
2. Czamara W.: Zastosowanie zbiorników wstępnych do ochrony zbiorników retencyjnych. Zesz. Nauk. AR Wrocław, ser. Inżynieria Środowiska, XII, 413, 2001: 245–255.
3. DIN 4030, 55928 Teil 2. Prüfverfahren für Beton, Festbeton in Bauwerken und Bauteilen.
4. Garbacz A., Piotrowski T., Courard L.: Inżynieria powierzchni betonu, cz. I. Struktura geometryczna powierzchni. Mat. Bud. 9, 2006.
5. Ochrona Środowiska 2006. GUS, Warszawa 2006.
6. Małecki Z.: Karbonatyzacja budowli hydrotechnicznych i metody naprawy. Ekotechnika nr 1/44/2008, Wrocław 2008.
7. Małecki Z.: Ocena wpływu wybranych zbiorników retencyjnych na środowisko w zlewni Proсны. Rozprawa Naukowa. Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski, Lublin 2008.
8. Mioduszeński W.: Małe zbiorniki wodne. IMUZ, Falenty 2003.
9. Mirza J., Durand B.: Evaluation, selection and installation of surface rep air mortars at a dam site. Constr. Build. Mat. 8, 1, 1994.
10. Żbikowski A., Żelazo J.: Ochrona środowiska w budownictwie wodnym. Materiały informacyjne MOŚZNiL. P.p 156, 1994.

## AUSSENBESCHÄDIGUNGEN AN HYDROTECHNISCHEN BETONANLAGEN DES STAUBECKENS POKRZYWNICA

### Zusammenfassung

Der Beton bildet wegen seiner Alkalität (pH-Wert  $\text{pH} \geq 12$ ) eine Schutzschicht gegen die Korrosion des Bewehrungsstahls. Auf Grund des schädlichen Einflusses von Wasser, Kohlendioxid und Salz sinkt die alkalische Reaktion. Bei pH-Wert = 10 (11) weist der Beton nur geringe oder gar keine Korrosionsaktivität des Bewehrungsstahls auf. Die Vergrößerung der Kapazität der korrodierenden Bewehrung (Auffreiben) infolge des Betonalkalitätsverlusts nennen wir Betonkarbonisation. Bezüglich der Forschungsergebnisse des Betonkarbonisationsgrads der Stahlbetonselemente bis zur 2,5 cm Tiefe stellte man den Anfang des Karbonisationsprozesses fest, besonders im Wellenbereich und über der maximalen Stauung des Wasserspiegels. Einen wesentlichen Einfluss auf den Karbonisationsgrad der hydrotechnischen Anlagen aus Stahlbeton hat Wasser-pH (Mittelwert des gestauten Wassers im Becken beträgt 7,6–7,9).

**Schlüsselworte:** Staubecken, Betonkarbonisation, Wasseranlagen, Stahlkorrosion, Wasser-pH.