

Analiza numeryczna żelbetowej konstrukcji basenu sportowego

inż. Beata Skierka, dr hab. inż. Jacek Domski – promotor, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Politechnika Koszalińska

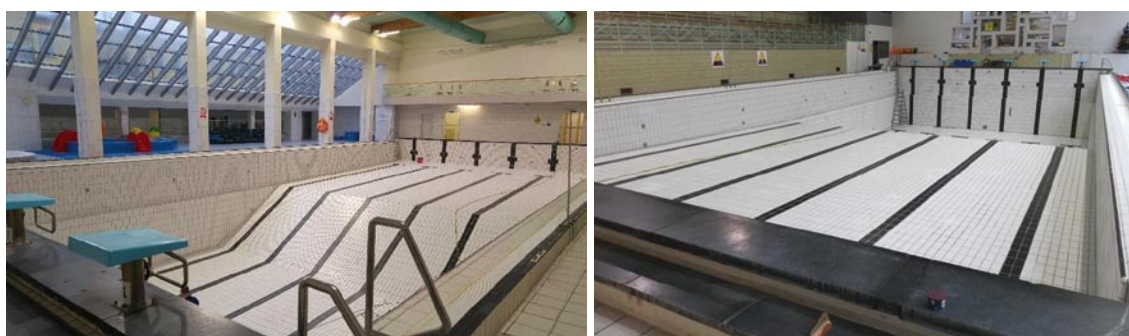
1. Wprowadzenie

Przedmiotem prezentowanej pracy jest żelbetowy basen sportowy, oddany do użytku w 1966 roku. Z uwagi na stan techniczny obiektu zdecydowano się na jego remont, połączony z modernizacją. Remont dotyczył części elementów konstrukcyjnych, które wymagały naprawy lub wzmocnienia. W tym celu została wykonana opinia techniczna [8], w której zalecono wykonanie niezbędnych prac naprawczo-zabezpieczających. Ostatecznie wykonano projekt naprawy basenu uwzględniający zalecenia zawarte w ekspertyzie oraz zaplanowano modernizację jego warstw zewnętrznych [9], co spowodowało zmianę wartości i charakteru działających obciążeń. W pracy przeprowadzono analizę numeryczną basenu obejmującą sytuację przed modernizacją i po niej. Na podstawie wyników uzyskanych w ramach przeprowadzonych analiz numerycznych określono wpływ dokonanych zmian na pracę basenu po jego modernizacji.

2. Opis konstrukcji basenu

Basen jest monolityczną, żelbetową konstrukcją, o wymiarach 25,0x11,8 m, ze zmienną głębokością od 1,2 do 3,6 m (rys. 1). Konstrukcję basenu stanowi żelbetowy układ słupowo-belkowo-płytowy o zmiennym poziomie płyty dennej. Poziom posadowienia wszystkich elementów podpierających basen jest jednakowy, natomiast z uwagi na jego zmienną głębokość, wysokość podpór wynosi od około 0,6 m do 2,3 m. Przekroje poprzeczne żelbetowych elementów podpierających głębszą część basenu wynoszą 30x30 cm (w narożu basenu) oraz 26x30 cm (pod środkową częścią basenu). Skrajne elementy, podpierające głębszą część basenu, mają przekrój 70x30 cm i połączone są ze słupami stanowiącymi podparcie dla ścian basenu. Dla płytszej części basenu podparcie stanowią słupy o przekroju 30x30 cm (narożne) i 25x26 cm (pozostałe). Wyżej wymienione elementy stanowią podparcie dla prostokątnego układu belek o przekroju 35x30 cm na kierunku

Rys. 1. Widok basenu przed modernizacją [8]



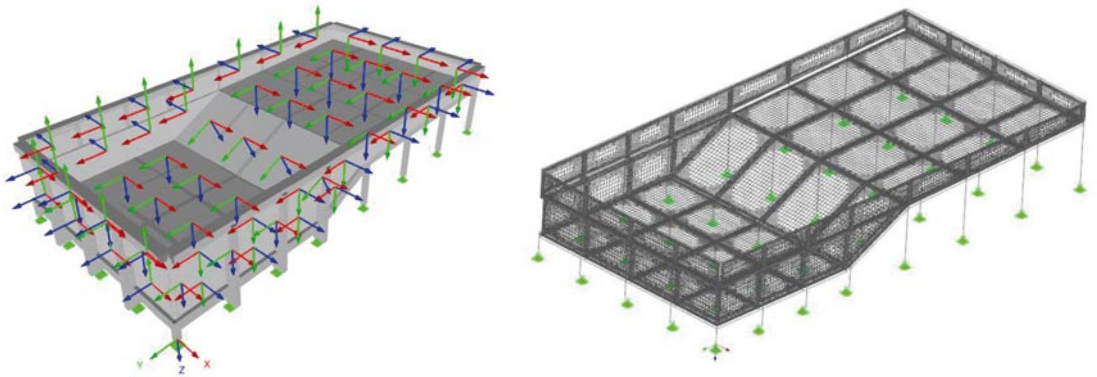
Rys. 2. Widok układu konstrukcyjnego ścian basenu przed pracami naprawczymi [8]



Tabela 1. Zestawienie istniejącego zbrojenia przeszłowego płyt według [8]

Element konstrukcyjny	Zbrojenie	Kierunek zbrojenia	Ilość	Pole [cm ² /m]	Otulina
Płyta dna	Górne	X	8 mm co 45 cm	1,11	4,8 cm
		Y	8 mm co 25 cm	2,01	4,0 cm
	Dolne	X	8 mm co 10 cm	5,03	3,8 cm
		Y	8 mm co 10 cm	5,03	3,0 cm
Ściany	Od strony wewnętrznej	X	8 mm co 25 cm	2,01	8,0 cm
		Y	8 mm co 40 cm	1,25	9,0 cm
	Od strony zewnętrznej	X	8 mm co 10 cm	5,03	4,8 cm
		Y	8 mm co 10 cm	5,03	4 cm

Uwaga: kierunek zbrojenia jest zgodny z lokalnymi układami współrzędnych płyt (rys. 3)

Rys. 3. Model numeryczny basenu

podłużnym oraz 30x26 cm na kierunku poprzecznym. Rozpiętość belek wynosi od 3,00 do 4,10 m. Dno basenu stanowi układ wielopolowych prostokątnych płyt dwukierunkowo zginanych, sztywno zamocowanych na wszystkich krawędziach [4, 5]. Po obwodzie płyty dna basenu znajduje się belka o zmiennej wysokości i stałej szerokości 30 cm. Grubość ścian oraz płyty dna wynosi około 25 cm. Ściany niecki basenu zostały wykonane jako cztero- i siedmiopolowe płyty dwukierunkowo zginane (rys. 2). W koronie każdej ściany znajduje się poszerzenie przekroju, które stanowi belkę usztywniającą cały układ konstrukcyjny [8].

Na podstawie przeprowadzonych badań i odkrywek ustalono w [8], że zbrojenie basenu stanowiły pręty gładkie o średnicy 8 mm. Przykładowe zestawienie zbrojenia płyt dna i ścian przedstawiono w tabeli 1. Określono również, że aktualna klasa wytrzymałości betonu basenu wynosi co najmniej C30/37 [8].

3. Model numeryczny basenu

Analizę numeryczną basenu przeprowadzono za pomocą programu Dlubal RFEM 5.23.02, bazującego na metodzie elementów skończonych. Model obliczeniowy basenu odwzorowano zgodnie z rzeczywistymi wymiarami jego elementów konstrukcyjnych. Utworzono czterdzieści sztywno zamocowanych słupów, na których oparto ruszt składający się z cztero- i siedmioprześlowych

belek. Zamodelowano je jako elementy prętowe. Następnie utworzono powierzchnie prostokątne, które stanowiły wielopolowe i wielorzędowe płyty dna. W analogiczny sposób wykonano konstrukcję ścian basenu, przyjmując wysokość modelu do poziomu plaży. Siatkę elementów skończonych wygenerowano automatycznie jako kwadraty o boku 0,2 m. Zagęszczono ją dwukrotnie nad podporami oraz promieniście przy węzłach [6, 7]. Ostatecznie model basenu składał się z 7780 elementów prętowych, 68 179 węzłów i 69 076 elementów powierzchniowych (rys. 3).

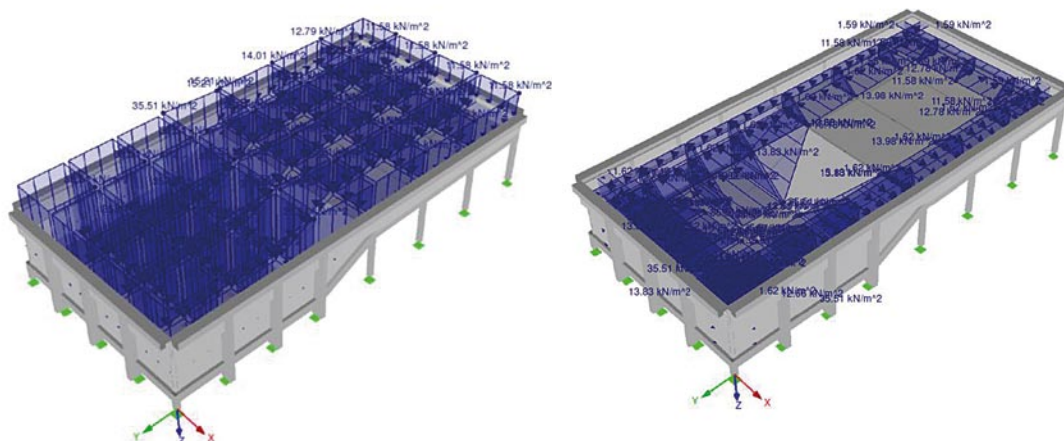
W module dodatkowym RF-CONCRETE Surfaces wygenerowano zbrojenie basenu – założono że jest ono wykonane ze stali St35X, według PN-56/B-03264 [3]. Ze względu na fakt, że zastosowany program nie zawiera normy [3] i wykorzystuje do projektowania konstrukcji żelbetowych jedynie aktualne normy [2], właściwości nowego materiału wprowadzono ręcznie. Klasę betonu przyjęto jako C30/37.

4. Analiza obciążeń działających na konstrukcję basenu

4.1. Obciążenie konstrukcji basenu przed modernizacją

Analizowany basen jest zbiornikiem otwartym, obciążonym ciężarem własnym i warstwami wykończeniowymi oraz parciem hydrostatycznym wywołanym

Rys. 4. Obciążenie basenu parciem hydrostatycznym



znajdującą się w nim wodą. Ciężar własny konstrukcji basenu został wygenerowany automatycznie w programie Dlubal RFEM, zaś pozostałe warstwy wykończeniowe stanowiły obciążenie charakterystyczne o wartości $0,86 \text{ kN/m}^2$. Charakterystyczną wartość parcia hydrostatycznego (rys. 4) określono na trzech wysokościach lustra cieczy, tj. najgłębszej ($35,51 \text{ kN/m}^2$), naj płytszej ($11,58 \text{ kN/m}^2$) i w miejscu skokowej zmiany głębokości basenu ($15,21 \text{ kN/m}^2$). Jako najbardziej niekorzystną kombinację obciążeń przyjęto jednoczesne oddziaływanie powyższych obciążeń z odpowiednimi współczynnikami obliczeniowymi w celu określenia stanów granicznych nośności (dla stanów granicznych użyteczności przyjęto współczynniki obliczeniowe o wartości $1,0$) [1].

4.2. Obciążenie konstrukcji basenu po modernizacji

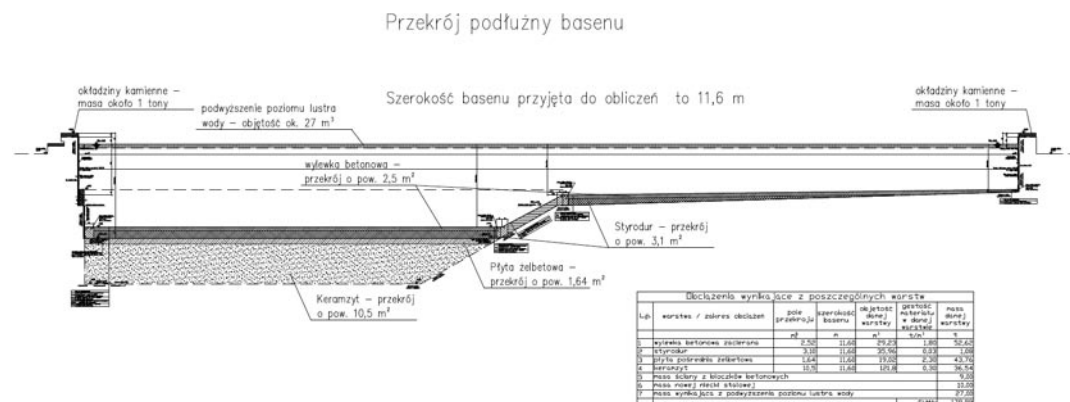
W wyniku zaplanowanych prac naprawczo-modernizacyjnych [9] obciążenie basenu uległo istotnym zmianom. Wynikają one z faktu, że usunięto wszystkie wewnętrzne warstwy wykończeniowe basenu oraz w niektórych miejscach usunięto od 3 do 5 cm warstwy betonu ze ścian. Dodatkowo zmniejszono oddziaływanie hydrostatyczne na konstrukcję, poprzez wypływanie basenu o $1,51 \text{ m}$ w jego najgłębszej części.

Zrealizowano to poprzez zastosowanie płyty żelbetowej spoczywającej na warstwie keramzytu i ścianie wy murowanej z bloczków betonowych oraz styropianu i wylewki betonowej wzbogaconej włóknami polipropylenowymi. Na pozostałej części basenu zastosowano również warstwę wylewki oraz w części styropian ekspandowany. Szczegół rozwiązania modernizacyjnego przedstawiono na rysunku 5.

Z uwagi na przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne (w głębszej części basenu), w postaci płyty żelbetowej opartej na ścianie z bloczków betonowych oraz na warstwie keramzytu, trudno jest określić, jaka część obciążeń zostanie przekazana na ściankę, a jaka na keramzyt. Z tego też względu założono możliwość wystąpienia dwóch skrajnych przypadków obciążenia tej części basenu. Pierwszy przypadek obciążenia dotyczy sytuacji, kiedy ciężar płyty oraz warstwy znajdujące się nad nią, wraz z parciem wody, działają liniowo na ścianki. Zaś drugi przypadek zakłada, że obciążenia zaprojektowanych elementów rozkładają się powierzchniowo. Wartości charakterystyczne obciążenia, dla obu przypadków, przedstawiono na rysunkach 6 i 7, przy uwzględnieniu odpowiednich oddziaływań parcia hydrostatycznego dla przypadku pierwszego.

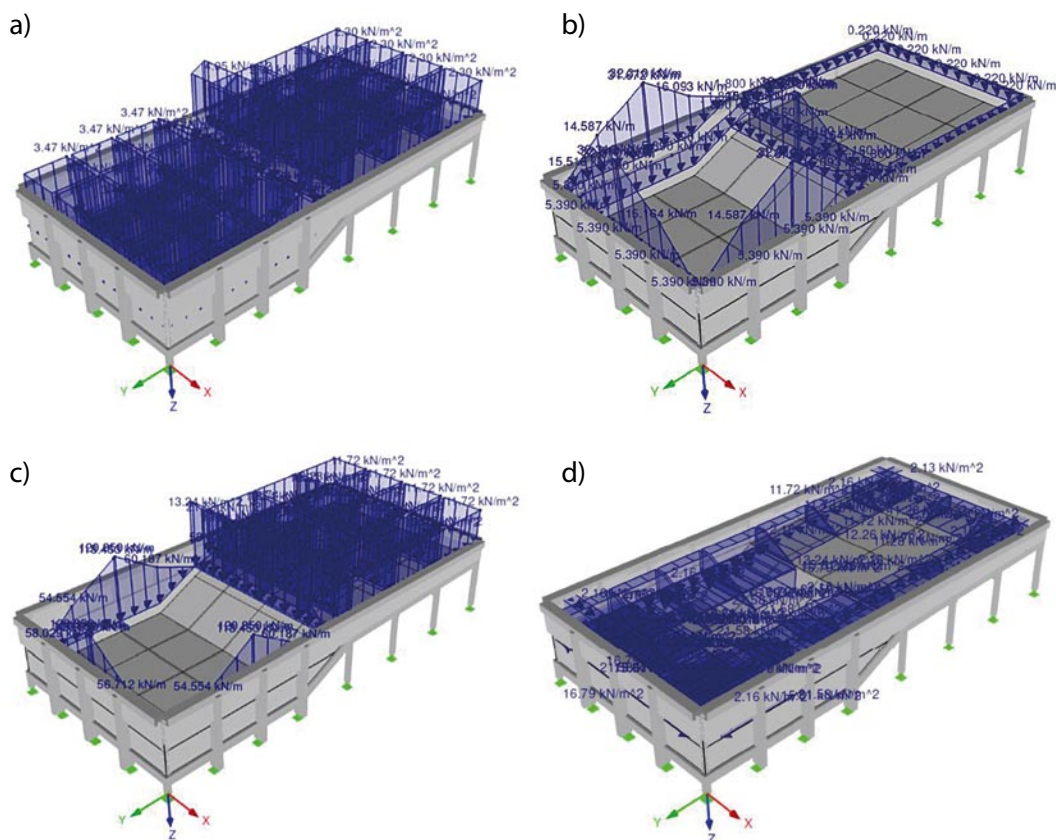
Dla drugiego przypadku obciążenie parciem charakterystycznym cieczy jest analogiczne do przedstawionego

Rys. 5. Przekrój podłużny basenu z nowo projektowanymi warstwami [9]



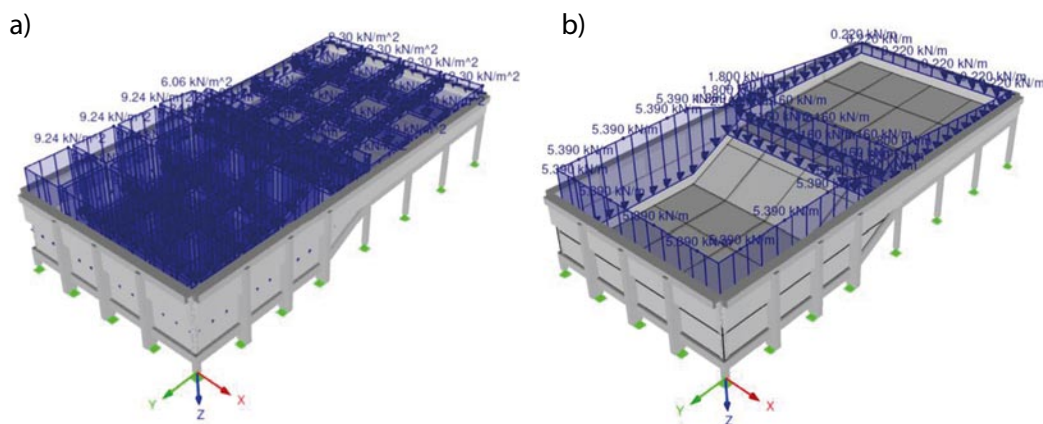
Rys. 6. Pierwszy przypadek obciążenia:

a) ciężar warstw znajdujących się pod płytą, b) ciężar ścianek, betonu nadłanego i płyty, z uwzględnieniem warstw znajdujących się nad nią, c) parcie hydrostatyczne (obciążenie płyty dna), d) parcie hydrostatyczne (obciążenie ścian)



Rys. 7. Drugi przypadek obciążenia:

a) ciężar warstw wykończeniowych oraz pośredniej płyty żelbetowej, b) ciężar ścianek i betonu nadłanego



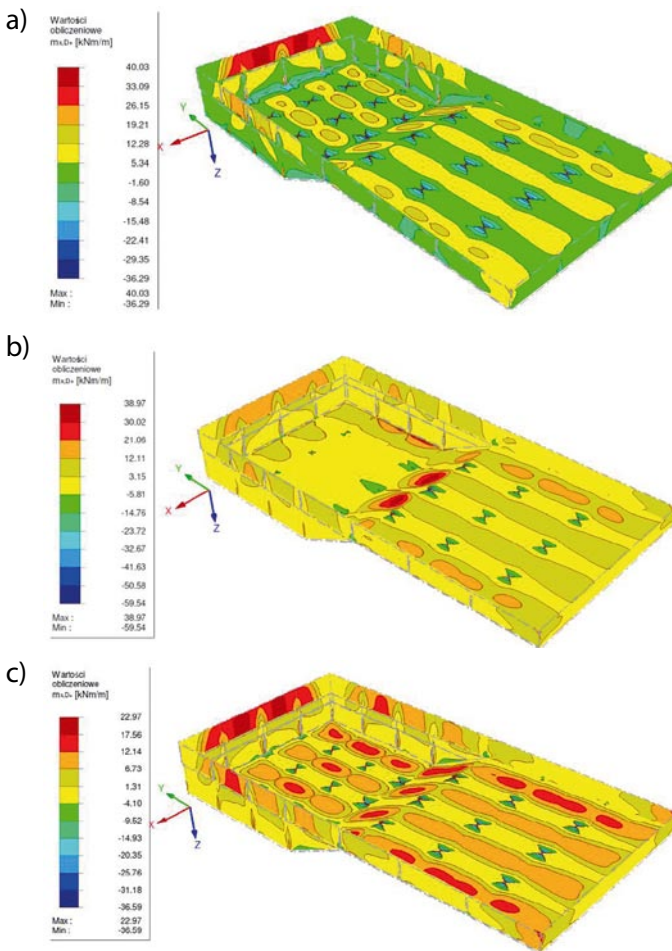
na rysunku 4, przyjmując charakterystyczną wartość parcia hydrostatycznego określonego dla trzech wysokości lustra cieczy, tj. najgłębszej (21,58 kN/m²), najpłytszej (11,72 kN/m²) i w miejscu skokowej zmiany głębokości basenu (13,24 kN/m²). Dla obydwu przypadków obciążeń zastosowano odpowiednią kombinację obciążeń, odpowiednią dla każdego stanu granicznego [1].

5. Analiza statyczna basenu

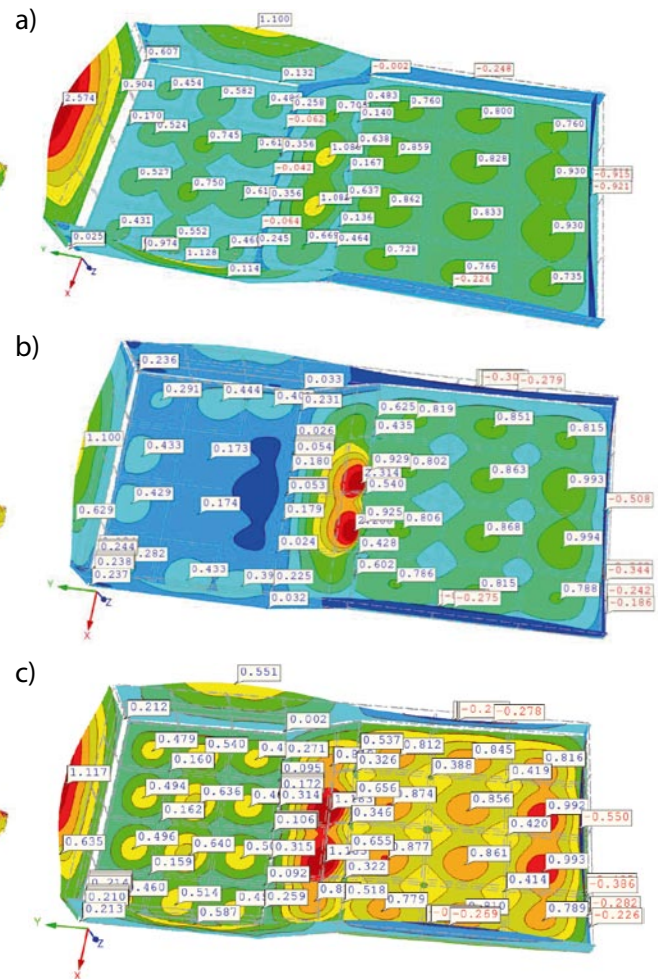
Analiza numeryczna basenu obejmowała obliczenia w zakresie stanu granicznego nośności oraz stanu granicznego użytkowalności. W ramach stanu granicznego nośności analizowano wartości sił wewnętrznych

oraz wymagane zbrojenie, określone dla różnych przypadków i kombinacji obciążeń. Przykładowe wartości momentów zginających przedstawiono na rysunku 8, zaś wartości ugięć na rysunku 9.

Na podstawie powyższych wykresów można zauważyć, że maksymalne wartości ugięcia i momentów zginających występują dla sytuacji przed modernizacją. Nastąpiła jednak znaczna relokacja maksymalnych wartości dla przypadku 1 po modernizacji. Szczegółową analizę zmiany wyężenia przekrojów, ze względu na ilość niezbędnego zbrojenia w przęsłach poszczególnych elementów konstrukcji, przedstawiono w tabeli 2. Na podstawie niniejszej tabeli można porównać pole powierzchni zastosowanego, a wymaganego zbrojenia, obliczonego



Rys. 8. Wartości momentów m_x (dolna powierzchnia elementów):
 a) przed modernizacją, b) po modernizacji – przypadek 1,
 c) po modernizacji – przypadek 2



Rys. 9. Wartości ugięcia [mm] dla zarysowanego modelu: a) przed modernizacją, b) po modernizacji – przypadek 1, c) po modernizacji – przypadek 2

Tabela 2. Zestawienie zbrojenia przeszłowego dla elementów płytowych basenu

Element konstrukcyjny	Kierunek zbrojenia	Zastosowane zbrojenie	Pole powierzchni [cm ² /m]		
			Wymagane zbrojenie		
			przed modernizacją	po modernizacji	
			przypadek 1	przypadek 2	
Dno	X – dolne	5,03	5,00	6,90	4,11
	Y – dolne		3,59	12,51	2,99
Ściany	X – dolne		4,84	3,97	3,52
	Y – dolne		2,85	3,30	1,53
Dno	X – górne	1,11	0,00	1,12	0,00
	Y – górne	2,01	0,00	1,43	0,00
Ściany	X – górne	2,01	3,00	3,60	2,56
	Y – górne	1,25	1,74	3,30	2,40

Uwaga: kursywą oznaczono niezbędną ilość zbrojenia w poszczególnych obszarach

przy użyciu programu Dlubal RFEM. W przypadku płyt bardzo istotne jest zbrojenie dolne na kierunku X i Y. Dla przypadku 1 po modernizacji odnotowano w analizie przekroczenie obu wartości powierzchni zbrojenia, w stosunku do zastosowanych. Przekroczenia te dotyczą ukośnego fragmentu płyty, który

w tym przypadku jest obciążony bardzo niekorzystnie. Dodatkowo należy odnotować niewystarczającą ilość górnego zbrojenia przeszłowego we wszystkich analizowanych przypadkach. Jednak te wartości nie mają istotnego znaczenia w kontekście pracy całego basenu.

Tabela 3. Porównanie szerokości rozwarcia rys

Element konstrukcyjny	Kierunek zbrojenia	Szerokość rozwarcia rys [mm]		
		przed modernizacją	po modernizacji	
			przypadek 1	przypadek 2
Dno	X	0,00	0,17	0,00
	Y		0,16	
Ściany	X	0,25	0,19	0,18
	Y	0,19	0,16	0,17

Analiza stanu granicznej użyteczności dotyczyła również szerokości rozwarcia rys. Moment rysujący został przekroczony w obszarze podpór w postaci słupów. W tych miejscach przewidywane jest zarysowanie elementów. Na podstawie przeprowadzonej analizy można zauważyć, że modernizacja basenu spowoduje zmniejszenie odkształceń, występujące w ścianie zbiornika, a szerokość rozwarcia rys we wszystkich elementach konstrukcyjnych nie przekroczy wartości – 0,3 mm (tabela 3).

6. Podsumowanie

Zaproponowane przypadki obciążeń basenu miały zasadniczy wpływ na jego stany graniczne nośności i użyteczności. Należy podkreślić, że sytuacja obliczeniowa po modernizacji, w postaci dwóch przypadków obciążeń, w rzeczywistości nie wystąpi. Będzie oczywiście jeden przypadek obciążeń, który będzie znajdował się pomiędzy dwoma rozpatrywanymi. Dlatego też uzyskane wyniki należy traktować jako orientacyjne. Na podstawie przeprowadzonej analizy można jednak sformułować poniższe wnioski ogólne.

- Analizując grubość otulenia zbrojenia istniejącego oraz obliczonego według norm [2] należy zauważyć, że wartość rzeczywista nie mieści się w granicach nominalnych określonych według [2]. Należy jednak pamiętać, że otulina zbrojenia została zaprojektowana w latach 60, zgodnie z obowiązującymi wówczas wytycznymi [3].
- Wartości momentów zginających oraz zapotrzebowanie na zbrojenie dla analizowanych przypadków różni się zasadniczo w kilku obszarach. Różnice te wynikają z przyjętych założeń obciążeniowych.

- Norma [3] nie określa wartości granicznej szerokości rozwarcia rys. W żadnym z analizowanych przypadków obciążeniowych wartość szerokości rozwarcia rys nie przekroczyła 0,3 mm.
- W każdej z analizowanych sytuacji obliczeniowych ugięcia nie przekraczają wartości dopuszczalnych według [2] (norma [3] nie ograniczała wartości ugięcia elementów). W wyniku modernizacji basenu obniżone zostaną również odkształcenia występujące w ścianie zbiornika.
- Modernizacja basenu wpłynie korzystnie na jego konstrukcję nośną i przyczyni się do zmniejszenia wyężenia konstrukcji o około 20%.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1991-1-1:2004 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne, ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach
- [2] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [3] PN-56/B-03264:1956: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne projektowanie
- [4] Starosolski W., Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych, tom 1, wydanie XVI, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2015
- [5] Starosolski W., Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych, tom 2, wydanie XV, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2016
- [6] Starosolski W., Komputerowe modelowanie betonowych ustrojów inżynierskich. Wybrane zagadnienia, tom 1, wydanie II, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2010
- [7] Starosolski W., Komputerowe modelowanie betonowych ustrojów inżynierskich. Wybrane zagadnienia, tom 2, wydanie II, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2010
- [8] Domski J., Zakrzewski M., i Sanok A., Opinia techniczna dotycząca stanu technicznego konstrukcji basenów, znajdujących się w budynku kompleksu rekreacyjno-sportowego, zlokalizowanego w Koszalinie, przy ul. Głowackiego 3–5, Koszalin, luty 2020
- [9] Nizio M., Projekt budowlany modernizacji basenu w Koszalinie
- [10] RF-CONCRETE Surfaces – moduł dodatkowy Dlubal RFEM. Informacja o zbrojeniu dodatkowym

Serdecznie zapraszamy autorów do publikowania

w „Przeglądzie Budowlanym”

Za publikację w naszym miesięczniku uzyskuje się **40** punktów