

**Aleksandra Wawrzyńska**  
Akademia Morska w Gdyni

**Waldemar Magda**  
Politechnika Gdańska

## **REDUKCJA OBCIĄŻEŃ ŚCIAN FALOCHRONÓW PIONOWOŚCIENNYCH PRZY ZASTOSOWANIU ŚCIAN AŻUROWYCH I KOMÓR WYGASZAJĄCYCH**

*Jednym z decydujących czynników mających wpływ na wybór rodzaju konstrukcji falochronów morskich jest uzyskanie maksymalnej możliwej redukcji obciążeń od falowania morskiego. Praca poświęcona jest rozwiązaniom konstrukcyjnym skrzyń żelbetowych, w których zastosowano pionową ścianę ażurową oraz otwartą komorę wygaszającą. Przedstawiono charakterystykę konstrukcji oraz analizę porównawczą z pełnymi pionowościeniowymi skrzyniami żelbetowymi.*

**Słowa kluczowe:** falochrony pionowościenne, falochrony ażurowe, konstrukcje hydrotechniczne, falowanie morskie.

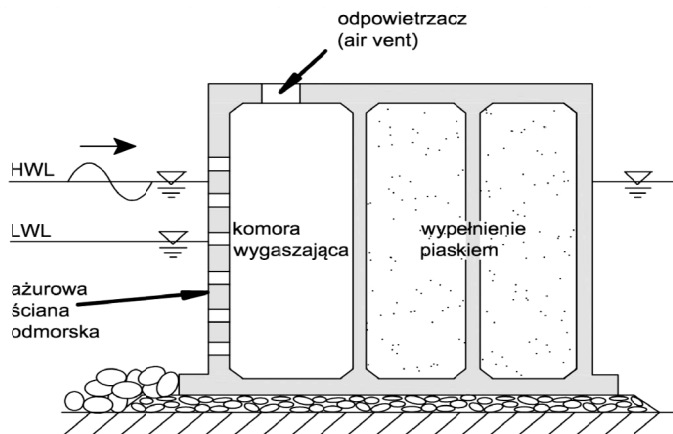
### **WSTĘP**

Poszukiwanie optymalnych rozwiązań w projektowaniu falochronów portowo-morskich stanowi ciągle wyzwanie dla projektantów w dziedzinie hydrotechniki portowo-morskiej. W przypadku falochronów morskich jednym z decydujących czynników, mających wpływ na wybór rodzaju konstrukcji, jest uzyskanie maksymalnej możliwej redukcji obciążeń od falowania morskiego. W pracy [11] przedstawiono modyfikacje grawitacyjnych falochronów pionowościeniowych, których zastosowanie przyczynia się do zmniejszenia oddziaływania ze strony falowania morskiego. Są to rozwiązania, które poza zmianą geometrii ściany odmorskiej, nie zmieniają kształtu samej konstrukcji, pozostawiając ją nadal w całości w postaci żelbetowego monolitu. Niniejsza praca poświęcona jest rozwiązaniom konstrukcyjnym skrzyń żelbetowych, w których zastosowano pionową ścianę ażurową oraz otwartą komorę wygaszającą.

## 1. SCHEMAT KONSTRUKCYJNY FALOCHRONU PIONOWOŚCIENNEGO Z AŻUROWĄ ŚCIANĄ ODMORSKĄ I KOMORĄ WYGASZAJĄCĄ

Pomysłodawcą konstrukcji falochronu pionowościennego, zbudowanego ze ściany ażurowej oraz komory wygaszającej jest Jarlan [5]. Pierwszy eksperymentalny falochron ażurowy, według tego pomysłu, został zbudowany w 1970 roku w porcie Takamatsu, pierwsze zaś nabrzeże z perforowanych skrzyń żelbetowych powstało w porcie Kobe w 1971 roku [6]. Początkowo konstrukcje ażurowe były przeznaczone głównie do stosowania w zatokach i innych osłoniętych akwatoriach, jednak dzięki dużej zdolności pochłaniania energii falowania oraz dobrej stateczności całej konstrukcji z czasem zaczęto stosować tego typu budowle także na otwartym morzu.

Rysunek 1 przedstawia schemat analizowanej konstrukcji falochronu ażurowego z kanałem rozpraszającym. W przekroju poprzecznym falochron składa się z ażurowej ściany, przez którą przedostaje się część falowania prosto do komory wygaszającej. Z nią połączona jest żelbetowa skrzynia, zapewniająca stateczność całej konstrukcji. Pod kanałem falowym znajduje się płyta denna (fundamentowa), która z kolei przeciwdziała sile wyporu, natomiast górna część falochronu, nad kanałem falowym służy jako dodatkowe wzmocnienie konstrukcji falochronu.



**Rys. 1.** Przekrój poprzeczny falochronu pionowościennego z odmorską ścianą ażurową i komorą wygaszającą

Źródło: opracowanie własne na podstawie [11].

**Fig. 1.** The cross-section of the perforated wall breakwater with wave chamber

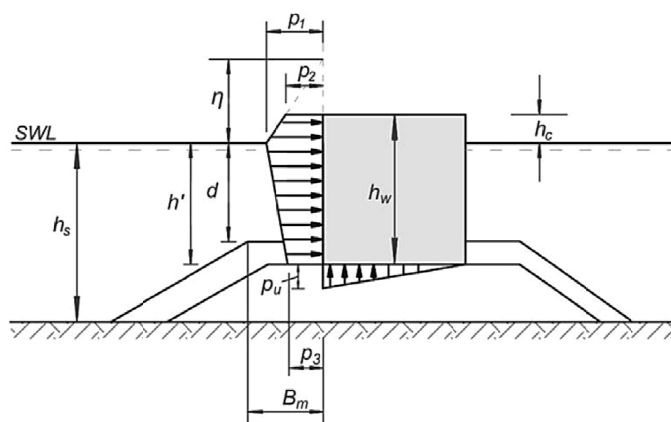
Source: elaborated on the basis of [11].

Falochrony ze ścianą ażurową bywają także nazywane falochronami rozpraszającymi (z ang. *wave-dissipating upright breakwaters*), ponieważ ich podstawowym zadaniem jest wygaszanie energii podchodzącej fali. Maksimum dysypacji energii ma miejsce, gdy jest duża różnica poziomów wody wewnątrz oraz na zewnątrz komory wygaszającej, co oznacza silną zależność względem długości fali.

## 2. ODDZIAŁYWANIE FALI NA PIONOWĄ AŻUROWĄ ŚCIANĘ ODMORSKĄ

Punktem wyjścia dla analizy obciążeń przyjmowanych przez odmorskie ściany falochronów ażurowych są schematy obliczeniowe konstrukcji masywnego falochronu pionowościennego (metoda Gody i jej modyfikacje) analizowane w [11]. W celu zachowania porządku wyprowadzenia równań matematycznych poniżej przedstawiono schemat obliczeniowy dla obciążeń falą niezałamana według metody Gody oraz jej modyfikację poprzez uwzględnienie prostopadłej, impulsowej siły od załamującej się fali.

**Schemat I.** Metoda Gody dla fal nieregularnych [6]. Obciążenie konstrukcji falą niezałamana.



**Rys. 2.** Rozkład ciśnień na ścianie falochronu, konstrukcja pionowościenne, metoda Gody

**Fig. 2.** Goda formula for irregular waves, wave load on vertical construction

Źródło: A. Wawrzyńska, Metody redukcji obciążeń hydrodynamicznych dla odmorskich ścian masywnych falochronów stromych, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 8, Gdynia 2013.

$$p_1 = 0,5(1 + \cos \beta)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_* (\cos \beta)^2) \rho_w g H_{proj} \quad (2.1)$$

$$p_2 = \begin{cases} \left(1 - \frac{h_c}{\eta}\right) & \text{dla } \eta > h_c \\ 0 & \text{dla } \eta \leq h_c \end{cases} \quad (2.2)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_3$$

$$p_u = 0,5(1 + \cos \beta) \lambda_3 \alpha_1 \alpha_3 \rho_w g H_{proj} \quad (2.3)$$

gdzie:

$H_{proj}$  – wysokość fali projektowej zdefiniowana jako najwyższa fala na przedpolu konstrukcji. Goda (1985) dla strefy przyboju zaleca w praktycznym projektowaniu przyjęcie wartości  $1,8 H_s$ , która odpowiada 0,15% prawdopodobieństwa przewyższenia w przypadku przyjęcia rozkładu Rayleigha [m],

$\beta$  – kąt padania fali (kąt między grzbietem fali a frontem konstrukcji) [°],

- $\alpha_*$  – współczynnik,  $\alpha_* =$  większe z dwóch wartości:  $\alpha_1$  lub  $\alpha_2$ ,  
 $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$  – współczynniki określane wg wzorów [-],  
 $\alpha_1 = 0,6 + 0,5 \left[ \frac{4\pi h_s}{\sinh(4\pi h_s)} \right]$ ,  
 $\alpha_2 = \min \left( \frac{h_b - d}{3h_b} \left( \frac{H_{proj}}{d} \right)^2 ; \frac{2d}{H_{proj}} \right)$ ,  
 $\alpha_3 = 1 - \frac{h_w - h_c}{h_s} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h_s/L)} \right]$ ,  
 $L$  – długość fali na głębokości  $h_b$ , odpowiadająca okresowi fali znacznej  $T_S \approx 1,1 T_m$ , gdzie  $T_m$  jest średnim okresem fali [m],  
 $h_b$  – głębokość wody w odległości  $5 H_S$  w kierunku morza od ściany konstrukcji [m],  
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – parametry zależne od typu konstrukcji; dla konwencjonalnych pionowych ścian,  
 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$  [-],  
 $h_s$  – głębokość wody przy konstrukcji [m].

**Schemat II.** Metoda Gody zmodyfikowana przez uwzględnienie prostopadłej, impulsowej siły od załamującej się fali [11].

Modyfikacja metody Gody dotyczy ciśnienia  $p_1$  w poziomie spokoju. Współczynnik  $\alpha_*$  został zmodyfikowany w następujący sposób:

$$\alpha_* = \text{większe z dwóch wartości: } \alpha_I \text{ lub } \alpha_2 \tag{2.4}$$

$$\alpha_2 = \text{mniejsze z dwóch wartości: } \left( \frac{h_b - d}{3h_b} \left( \frac{H_{proj}}{d} \right)^2 ; \frac{2d}{H_{proj}} \right) \tag{2.5}$$

$$\alpha_I = \alpha_{I0} \cdot \alpha_{I1} \tag{2.6}$$

$$\alpha_{I0} = \begin{cases} H_{proj}/d & \text{dla } H_{proj}/d \leq 2 \\ 2,0 & \text{dla } H_{proj}/d > 2 \end{cases} \tag{2.7}$$

$$\alpha_{I1} = \begin{cases} \cosh \delta_2 / \cosh \delta_1 & \text{dla } \delta_2 \leq 0 \\ \frac{1}{\cosh \delta_1 (\cosh \delta_2)^{\frac{1}{2}}} & \text{dla } \delta_2 > 0 \end{cases} \tag{2.8}$$

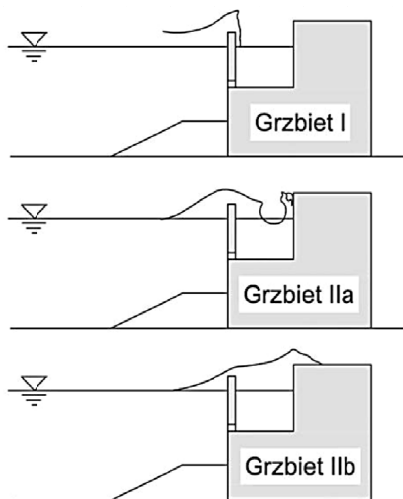
$$\delta_1 = \begin{cases} 20 \cdot \delta_{11} & \text{dla } \delta_{11} \leq 0 \\ 15 \cdot \delta_{11} & \text{dla } \delta_{11} > 0 \end{cases} \tag{2.9}$$

$$\delta_{11} = 0,93 \left( \frac{B_m}{L} - 0,12 \right) + \left( \frac{h_s - d}{h_s} - 0,6 \right) \tag{2.10}$$

gdzie oznaczenia parametrów  $\delta_{11} = 0,93 \left( \frac{B_m}{L} - 0,12 \right) + \left( \frac{h_s - d}{h_s} - 0,6 \right)$  są zgodne ze schematem I.

W przypadku obciążeń podmorskich ścian falochronów ażurowych z komorą wygaszającą, sposób wyznaczenia ciśnień falowych opiera się na odpowiedniej adaptacji powyższych schematów. Ze względu na skomplikowany kształt skrzyni wymagane jest rozważenie kilku przypadków obciążeń przyjmowanych przez podmorską ścianę. Ponadto, niezależnie od geometrii konstrukcji, oddziaływanie fali może być dwojakiej natury, tj. na falochron może oddziaływać fala niezałamana lub załamująca się. Zależnie zatem od sposobu, w jaki uderzy fala progresywna, rozróżnia się następujące sytuacje krytyczne (rys. 3) [6]:

- grzbiet I – przyjmuje się, że fala wystąpi na ścianie ażurowej, przy czym ściana podmorska może być poddana oddziaływaniu fali tak niezałamanej, jak i załamującej się;
- grzbiet IIa – przyjmuje się, że fala załamie się w komorze wygaszającej;
- grzbiet IIb – przyjmuje się, że nastąpi przelewanie się wody ponad koroną falochronu.



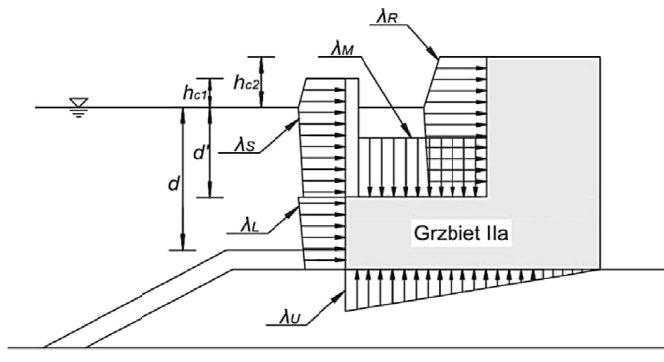
**Rys. 3.** Rozważane przypadki oddziaływania falowania:  
grzbiet I – fala uderzy na ścianie ażurowej,  
grzbiet IIa – fala załamie się w komorze wygaszającej,  
grzbiet IIb – nastąpi przelewanie się wody ponad koroną falochronu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [6].

**Fig. 3.** Phases for pressure calculations of perforated wall caissons

Source: elaborated on the basis of [6].

Niniejsza metoda obliczeniowa polega na przyjęciu wartości ciśnień od falowania  $p_1, p_2, p_3$  wyznaczonych zgodnie ze schematem I i II, jednak wartości ciśnień dla każdej części konstrukcji są odpowiednio zmodyfikowane przez współczynnik  $\lambda$  zgodnie z [9], (rys. 4). I tak np. wartość ciśnienia na ścianie ażurowej, w sytuacji „Grzbiet I”, jest obliczona zgodnie ze schematem I, przy czym współczynniki  $\lambda_1, \lambda_2$  są zastąpione przez współczynniki  $\lambda_{S1}, \lambda_{S2}$ .



**Rys. 4.** Współczynniki  $\lambda$  dla ciśnień falowych w sytuacji Grzbiet II

Źródło: opracowanie własne na podstawie [3].

**Fig. 4.** Wave pressure distribution at crest-II for a perforated wall caisson

Source: elaborated on the basis of [3].

Zmodyfikowane współczynniki dla konstrukcji skrzyniowej z pionową ścianą ażurową, które umożliwiają przeprowadzenie obliczeń analizowanej budowli, są podane w tabeli poniżej (tab. 1).

**Tabela 1.** Zmodyfikowane współczynniki dla konstrukcji skrzyniowej z pionową ścianą ażurową [3]

**Table 1.** Modification factors for various phases

		Grzbiet I	Grzbiet IIa	Grzbiet IIb
Ściana ażurowa	$\lambda_{S1}$	0,85	0,7	0,3
	$\lambda_{S1}$	0,4 ( $\alpha^* \leq 0,75$ ) 0,3/ $\alpha^*$ ( $\alpha^* > 0,75$ )	0	0
Nieprzepuszczalna przednia część ściany	$\lambda_{L1}$	1	0,75	0,65
	$\lambda_{L2}$	0,4 ( $\alpha^* \leq 0,5$ ) 0,2/ $\alpha^*$ ( $\alpha^* > 0,5$ )	0	0
Fale na tylnej ścianie komory	$\lambda_{R1}$	0	20l/3L' ( $ll' \leq 0,15$ ) 1,0 ( $ll' \leq 0,15$ )	1,4 ( $H_D/h \leq 0,1$ ) 1,6 - 2 $H_D/h$ ( $0,1 > H_D/h > 0,3$ ) 1,0 ( $H_D/h \geq 0,3$ )
	$\lambda_{R2}$	0	0,56 ( $\alpha^* \leq 25/28$ ) 0,5/ $\alpha^*$ ( $\alpha^* > 25/28$ )	0
Fale na dnie komory	$\lambda_{M1}$	0	20l/3L' ( $ll' \leq 0,15$ ) 1,0 ( $ll' \leq 0,15$ )	1,4 ( $H_D/h \leq 0,1$ ) 1,6 - 2 $H_D/h$ ( $0,1 > H_D/h > 0,3$ ) 1,0 ( $H_D/h \geq 0,3$ )
	$\lambda_{M2}$	0	0	0
Ciśnienie unoszące	$\lambda_{U3}$	1	0,75	0,65

**Uwaga:** Obliczenia współczynnika  $\alpha^*$  dla tylnej ściany, przy wyznaczaniu wartości  $\lambda_{R2}$ . Należy zastąpić współczynnik  $\alpha_1$  przez  $\alpha_1'$ , otrzymany odpowiednio z parametrów  $d', L', B'_M$ , gdzie:  $d'$  jest głębokością w komorze;  $L'$  jest długością fali przy głębokości  $d$ ;  $B'_M = l - (d - d')$ ;  $l$  jest szerokością komory wygaszającej, włączając grubość pionowej ściany ażurowej.

### 3. PORÓWNANIE SKRZYNIOWEJ KONSTRUKCJI Z PIONOWĄ ŚCIANĄ AŻUROWĄ I OTWARTĄ KOMORĄ WYGASZAJĄCĄ Z TRADYCYJNĄ MASYWNĄ SKRZYNIĄ ŻELBETOWĄ

Redukcja oddziaływania falowania morskiego w przypadku obciążeń falochronu ze ścianą ażurową i komorą wygaszającą jest analizowana w zestawieniu z masywnym falochronem pionowościennym, dla którego schemat obliczeniowy oraz analizę obciążeń przedstawiono w [11]. Analizowany falochron ażurowy w całości konstrukcji ma kształt prostopadłościenny, dodatkowo na całej jego długości ściana odmorska jest ażurowa oraz w konstrukcji znajduje się jedna komora wygaszająca.

Podobnie jak w pracy [11], przyjęto takie same warunki falowania rozpatrywanych przypadków, tj. dla pełnego masywnego falochronu oraz dla konstrukcji ze ścianką ażurową i komorą wygaszającą. Założono jednocześnie, że wystąpienie fali załamującej się może mieć charakter losowy. Obciążenie parciem hydrostatycznym zostało pominięte, ponieważ w przypadku analizowanych konstrukcji siły hydrostatyczne przy poziomie spokoju znoszą się.

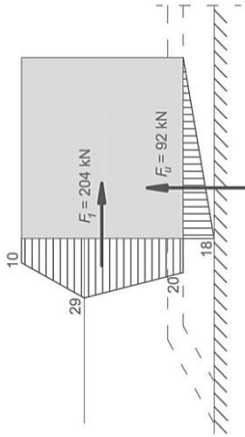
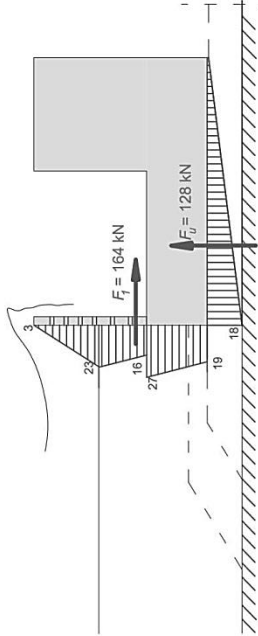
Przyjęte dane obliczeniowe:

- a) wysokość fali projektowej  $H_{proj} = 3,0$  m,
- b) okres fali  $T = 6,0$  m,
- c) głębokość wody  $h_s = 7,5$  m,
- d) nachylenie dna 1:50,
- e) konstrukcja posadowiona na podsypce o nachyleniu 1:2.

W tabelach 2 i 3 zestawiono wyniki obliczeń wypadkowej siły poziomej oddziałującej na falochronie masywnym pionowościennym oraz na falochronie ze ścianą ażurową i komorą wygaszającą dla dwóch przypadków: obciążenia falą niezalamaną ściany odmorskiej oraz obciążenia falą załamującą się na ścianie odmorskiej.

**Tabela 2.** Zestawienie wyników obliczeń wypadkowej siły poziomej oddziałującej na falochronie masywnym pionowościenneym oraz na falochronie ze ścianą ażurową i komorą wygaszającą – fala niezalamana na ścianie odmorskiej

**Table 2.** The results of calculation for nonbreaking wave acting on vertical front wall

Sytuacja	Metoda	Pozioma siła wypadkowa	Rodzaj konstrukcji	Postać graficzna
I	Metoda Gody	$F = F_1 = 204 \text{ kN}$	Masywna pionowościenne skrzynia	
II	Metoda Gody zmodyfikowana przez Takahashi, Shimosako i Sakai	$F = F_1 = 164 \text{ kN}$	Skrzynia z pionową ścianką ażurową i otwartą komorą wygaszającą	



**Table 3.** Zestawienie wyników obliczeń wypadkowej siły poziomej oddziaływającej na falochronie masywnym pionowościenne oraz na falochronie ze ścianą ażurową i komorą wygaszającą – fala załamana na ścianie odmorskiej

**Table 3.** The results of calculation for breaking wave acting on vertical front wall

Sytuacja	Metoda	Pozioma siła wypadkowa	Rodzaj konstrukcji	Postać graficzna
I	Metoda zmodyfikowana Gody (obciążenie falą załamana)	$F = F_1 = 476 \text{ kN}$	Masywna pionowościenne skrzynia	
II	Metoda Gody zmodyfikowana przez Takahashi, Shimosako i Sakai (grzbiet I)	$F = F_1 = 229 \text{ kN}$	Skrzynia z pionową ścianką ażurową i otwartą komorą wygaszającą	

Sytuacja	Metoda	Pozioma siła wypadkowa	Rodzaj konstrukcji	Postać graficzna
III	Metoda Gody zmodyfikowana przez Takahashi, Shimosako i Sakai (grzbiet IIa)	$F = F_1 + F_2 = 296 \text{ kN}$	Skrzynia z pionową ścianką ażurową i otwartą komorą wygaszającą	
IV	Metoda Gody zmodyfikowana przez Takahashi, Shimosako i Sakai (grzbiet IIb)	$F = F_1 + F_2 = 192 \text{ kN}$	Skrzynia z pionową ścianką ażurową i otwartą komorą wygaszającą	

Wyniki obliczeń dla obciążenia odmorskiej ściany falą niezałamaną (tab. 2) wskazują korzystne oddziaływanie ściany ażurowej i kanału wygaszającego, ponieważ redukcja obciążeń przekazywanych na falochron osiąga tutaj blisko 20% (19,6%) i wynosi 164 kN dla konstrukcji ażurowej wobec 204 kN dla konstrukcji masywnej. Ponadto na rysunku dla sytuacji II (tab. 2) widać wyraźnie zmianę linii obciążeń, tj. w miejscu oddziaływania fali na ażurową część ściany odmorskiej wartości obciążeń jednostkowych wynoszą 16 kN, natomiast dla pełnej ściany jest to wartość 27 kN.

Dla obciążeń od fali niezałamanej zmiana jest zauważalna, jednak przypadek obciążenia falą załamującą się przedstawia spektakularną redukcję obciążeń (tab. 3). Zależnie od przyjętego schematu redukcja wynosi od około 40% (37,8%) dla najbardziej niekorzystnego dla konstrukcji przypadku, tj. załamania fali bezpośrednio w komorze falowej (sytuacja „grzbiet IIa”). Wartości obciążeń wynoszą tutaj odpowiednio 296 kN dla falochronu ażurowego i 476 kN dla falochronu masywnego. Dla sytuacji załamania się fali na ścianie ażurowej („grzbiet I”) redukcja wynosi 50% (52%), a wartość siły wypadkowej wynosi 229 kN dla falochronu ażurowego. Natomiast największa zmiana, blisko 60% redukcji obciążeń, ma miejsce dla przypadku, w którym następuje przelewanie się fali ponad konstrukcją (sytuacja „grzbiet IIb”). Wartość siły wypadkowej wynosi 192 kN.

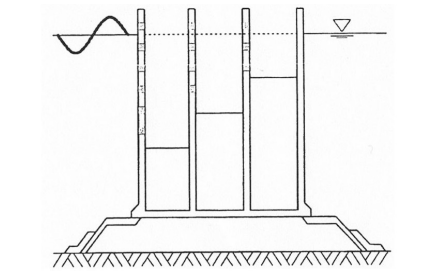
W przypadku wyboru rodzaju konstrukcji rozważa się wiele czynników, jednak z punktu widzenia ciśnień falowych na pionowej ścianie falochronu konstrukcje ażurowe są niezwykle konkurencyjne ze względu na spektakularną wręcz redukcję obciążeń od falowania morskiego.

#### **4. PRZYSZŁOŚĆ FALOCHRONÓW AŻUROWYCH – INNOWACYJNE ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE**

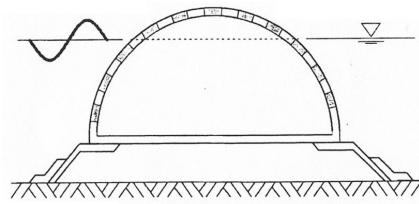
Ciągły postęp w prefabrykacji pozwala projektantom na realizację coraz bardziej śmiałych wizji, choć często pozostają one w fazie eksperymentalnej lub stanowią, co najwyżej, pojedyncze przykłady realizacji. Niemniej autorzy opracowania zdecydowali o przedstawieniu kilku rozwiązań konstrukcyjnych, wskazując tym samym kierunki rozwoju hydrotechniki morskiej. Poniżej omówiono innowacyjne propozycje rozwiązań konstrukcyjnych falochronów z ażurową ścianą odmorską i komorą wygaszającą.

Rysunek 5 przedstawia cztery przykłady modyfikacji perforowanych skrzyń żelbetowych, będących elementem falochronów morskich. Jedyne w przypadku trójkomorowej skrzyni falochronu w Porto Torres zachowany jest prostopadłościenny kształt konstrukcji. W tym przypadku modyfikacja dotyczy zastosowania aż trzech komór wygaszających. Wszystkie ściany skrzyni poza ostatnią od strony portu są ażurowe, umożliwiając tym samym przepływ wody do kolejnych komór wygaszających. Z kolei skrzynia z portu Funakawa w Japonii prostopadłościenny

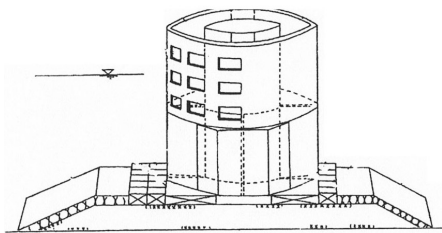
kształt zachowuje tylko w części swej konstrukcji, a odmorska ściana ponad poziomem spokoju jest zakrzywiona w przekroju poprzecznym. W tym układzie fala, uderzając w ścianę falochronu, dostaje się do jednego z dwóch poziomów kanałów wygaszających. Dwa pozostałe rysunki pokazują cylindryczny kształt całej konstrukcji skrzyni falochronu. Każda za perforowaną ścianą posiada komorę wygaszającą.



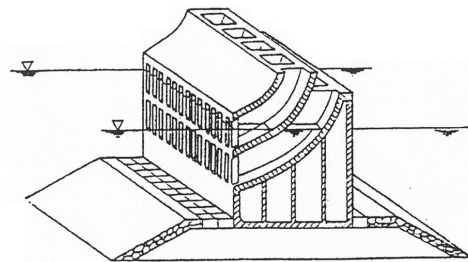
Trójkomorowa skrzynia (Porto Torres, Włochy)



Półcylindryczna skrzynia (Miyazaki Port, Japonia)



Dwucylindryczna skrzynia (Nagashima, Japonia)



Ażurowa skrzynia (Fukanawa, Japonia)

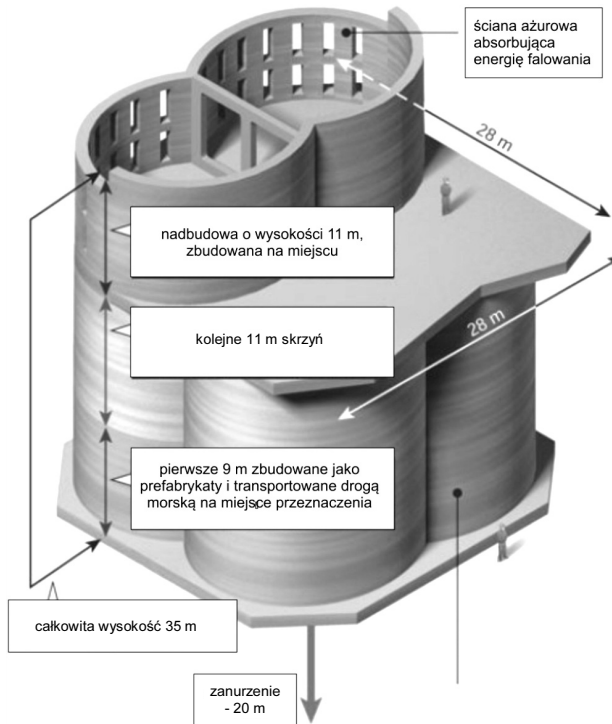
**Rys. 5.** Przykłady nowoczesnych skrzyń perforowanych

Źródło: A. Wawrzyńska, *Kierunki rozwoju infrastruktury portowo-morskiej na przykładzie falochronów pionowościennych*, *Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni*, 2012, nr 27.

**Fig. 5.** New perforated caisson breakwaters

Source: [10].

Jeszcze ciekawszym, wyjątkowo śmiałym rozwiązaniem wśród nowoczesnych konstrukcji falochronów pionowościennych jest falochron w Tangerze (Maroko), którego budowa rozpoczęła się w 2003 roku. Cały falochron składa się z 44 prefabrykowanych skrzyń, z których każda ma kształt czterolistnej koniczyny. W przekroju poziomym skrzynia składa się z czterech cylindrycznych komór, z których każda jest ażurowa ponad poziomem spokoju. Szczegóły konstrukcji prezentuje rysunek 6 [2]. Trwałość konstrukcji została obliczona na 100 lat.



**Rys. 6.** Rysunek poglądowy czterokomorowej konstrukcji skrzyń, Tanger (Maroko)

Źródło: *Bodygues Construction Tangiers-Med. (Morocco). Overview the project, broszura informacyjna: Dossier-de-presse-Tanger, 2005.*

**Fig. 6.** Construction of a four-cell caisson

Source: [2]



**Rys. 7.** Widok czterokomorowej konstrukcji skrzyń w czasie budowy, Tanger (Maroko)

Źródło: *Bodygues Construction Tangiers-Med. (Morocco). Overview the project, broszura informacyjna: Dossier-de-presse-Tanger, 2005.*

**Fig. 7.** Construction of a four-cell caisson

Source: [2].



**Rys. 8.** Widok ażurowych ścian budowanych ponad poziomem spokoju, Tanger (Maroko)

Źródło: *Bodygues Construction Tangiers-Med. (Morocco). Overview the project, broszura informacyjna: Dossier-de-presse-Tanger, 2005.*

**Fig. 8.** Construction of a four-cell caisson

Source: [2].

## PODSUMOWANIE

Falochrony pionowościennne ze ścianą ażurową i kanałem wygaszającym są niezwykle konkurencyjne wobec wszystkich masywnych falochronów pionowościennnych z punktu widzenia bardzo dużej redukcji obciążeń, jakie przyjmuje falochron od falowania morskiego. Zmniejszenie wartości obciążeń przyjmowanych przez odmorską ścianę waha się od 20% dla obciążeń falą niezałamaną do nawet 60% w przypadku obciążeń falą załamującą się w porównaniu do klasycznej masywnej konstrukcji skrzyniowej.

Dużą zaletą tego typu konstrukcji jest również niewielka, w porównaniu z konstrukcjami narzutowymi lub pionowościennnymi z poziomym umocnieniem w postaci narzutu, szerokość w przekroju poprzecznym, ograniczona jedynie do szerokości samej skrzyni. Ponadto konstrukcje ażurowe mogą być wykonane w taki sposób, aby umożliwić wymianę wód między otwartym morzem a akwarium i na tym polu wydają się być bezkonkurencyjne wobec tradycyjnych falochronów morskich.

Prefabrykacja skrzyń, a przez to różnorodność rozwiązań (kształtów) pozwala na dostosowanie konstrukcji do każdego miejsca przeznaczenia. Dzięki wprowadzeniu odpowiednich materiałów (przede wszystkim wstępnie sprężonego betonu o odpowiednich parametrach) mogą być one stosowane nawet na dużych głębokościach, czego przykładem jest choćby falochron portu w Tangerze. Dodatkowo prefabrykaty cechują się dużą trwałością, a przy odpowiednio zabezpieczonym podłożu dna morskiego jest to okres nawet 100 lat.

Należy jednak pamiętać, że mimo spełnienia oczekiwań redukcji obciążeń ścian odmorskich od falowania morskiego oraz dużej trwałości są to konstrukcje trudne i bardzo kosztowne pod względem ekonomicznym, głównie ze względu na skomplikowany kształt prefabrykatów.

## LITERATURA

1. Agershou H. i in., *Planning and design of ports and marine terminals*, Thomas Telford Books, 2004.
2. *Bodygues Construction Tangiers-Med. (Morocco). Overview the project*, broszura informacyjna: Dossier-de-presse-Tanger, 2005.
3. *Coastal Engineering Manual – Part V*, 2003.
4. Goda Y., *New wave pressure formulae for composite breakwater*, Proceedings of 14th International Conference Coastal Engineering, Copenhagen, ASCE, New York 1974, p. 1702–1720.
5. Jarlan G.E., *A perforated vertical breakwater*, The Dock and Harbour Authority, Vol. 41, 1961, No. 488.
6. Takahashi S., *Design of vertical breakwaters*, Revised Version of Reference Document, 2002, No. 34, PHRI.
7. Takahashi S., Tanimoto K., Shimosako K., *A proposal of impulsive pressure coefficient for the design of composite breakwaters*, Proceedings of the International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction, Yokosuka 1994a.
8. Takahashi S., Tanimoto K., Shimosako K., *Experimental study on wave forces acting on perforated wall caisson breakwaters*, Report of Port and Harbour Research Institute, Yososuka 1991.
9. Takahashi S., Tanimoto K., Shimosako K., *Wave pressure on perforated wall caissons*, Proceedings of the International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction, Yokosuka 1994b.
10. Wawrzyńska A., *Kierunki rozwoju infrastruktury portowo-morskiej na przykładzie falochronów pionowościennych*, Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni, 2012, nr 27.
11. Wawrzyńska A., *Metody redukcji obciążeń hydrodynamicznych dla odmorskich ścian masywnych falochronów stromych*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2013, nr 82.

## REDUCTION OF WAVE ENERGY ON THE VERTICAL WALL BREAKWATERS WITH PERFORATED FRONT WALL AND WAVE CHAMBER

### Summary

*The search for optimal solutions in the design of offshore breakwaters is a challenge for designers in the field of marine civil engineering. In the case of breakwaters one of the decisive factors affecting the choice of the type of construction is to obtain the maximum possible reduction of the sea waves. This paper is devoted to design caissons solutions, using a perforated front wall and a wave chamber.*

**Keywords:** *vertical caisson breakwaters, perforated front wall breakwaters with wave chamber, wave loading, ports infrastructure.*