

Analiza i określenie przyczyn uszkodzenia palisady poddanej skomasowanemu działaniu morskich obciążeń środowiskowych

**Prof. dr hab. inż. Bohdan Zadroga prof. zw. PG
Politechnika Gdańska**

Zagadnienia geotechniczne dotyczące obliczeń stateczności różnorodnych budowli morskich wiążą się z koniecznością przeprowadzania wnikliwych analiz nie tylko w przypadkach budowli o skomplikowanej konstrukcji obciążonych złożonymi układami obciążeń zewnętrznych, eksploatacyjnych i środowiskowych. Konieczność taka pojawia się także w przypadku budowli nieskomplikowanych konstrukcyjnie, lecz obciążonych głównie skomasowanymi układami morskich obciążeń środowiskowych działających jednocześnie.

Obliczenia takie i analizy, w celu określenia przyczyn utraty stateczności i uszkodzenia części obiektu, przeprowadzono dla palisady stanowiącej fundament ogrodzenia od strony Zatoki Puckiej, w jednym z ośrodków wypoczynkowych na Półwyspie Helskim.

CHARAKTERYSTYKA I USZKODZENIA PALISADY

W celu uniemożliwienia niekontrolowanego dostępu na teren ośrodka wypoczynkowego od strony plaży (styku brzegu wydmorego i płytkich wód Zatoki Puckiej) fundamenty ogrodzenia wykonano w postaci dwóch palisad usytuowanych pro-

stopadle do linii brzegowej. Każda z nich ma długość 90 m. Na około 30 m, zależnie od stanu wody, palisady wchodzi w płytkie wody Zatoki Puckiej. Wykonano je z pali Relumat 2000 [7] o średnicy 0,2 m i długości zmiennej od 3,0 m w rejonie wydm do 6,0 m w rejonie wody.

Pale te w przeciwieństwie do tradycyjnych pali drewnianych lub stalowych nie ulegają butwieniu lub korozji. Wykonane są z tworzywa sztucznego odpornego na ujemne temperatury i mają estetyczny proekologiczny wygląd. Są łatwe w montażu i tańsze od pali tradycyjnych. Pale Relumat 2000 mają niestety niższe parametry techniczne (wytrzymałość na zginanie, ściskanie i rozciąganie) od pali żelbetowych lub stalowych. Wyroby Relumat 2000 (deski pomostowe, profile czworokątne, pale okrągłe) zastosowano wielokrotnie na polskim wybrzeżu przy budowie: wejść na plaże, slipów, promenad posadowionych na palach i opasek brzegowych [7].

Zagłębienie pali obu palisad wykonano za pomocą wibromłota hydraulicznego (przy zagłębieniu pali o długości 6,0 m stosowano dodatkowo płuczkę wodną). Do pali co 3,0 m mocowano stalowe słupki ogrodzenia, a do nich stalową siatkę ogrodzeniową.

Po roku eksploatacji, w okresie zimowym grudzień-styczeń w jednej z palisad stwierdzono złamanie górnej części 19 pali odwodnego odcinka palisady, które zalegały na dnie wraz z przymocowanymi do nich stalowymi słupkami i stalową siatką ogrodzeniową. Druga palisada nie uległa uszkodzeniu. Określenie przyczyn uszkodzenia palisady wymaga wykonania odpowiednich obliczeń jej stateczności oraz rozpatrzenia i przeanalizowania różnych scenariuszy przebiegu uszkodzeń. W tym celu niezbędne jest ustalenie morskich obciążeń środowiskowych w miejscu i sąsiedztwie lokalizacji uszkodzonej palisady.

MORSKIE OBCIĄŻENIA ŚRODOWISKOWE W ZATOCE PUCKIEJ I GDAŃSKIEJ

Obciążenia budowli w środowisku morskim różnią się istotnie od obciążeń budowli w środowisku lądowym. Są one bardziej złożone, mają charakter losowy, ciągłą zmienność, gwałtowny przebieg i charakteryzują się zmianami ilościowymi oraz jakościowymi:

Tabl. 1. Stany charakterystyczne i średnie poziomy morza w Zatoce Gdańskiej [4]

Wodowskaz	Zlewnia	Stan alarmowy	Stan ostrzegawczy	Średni poziom morza
GDAŃSK PORT PÓLNOČNY	Zatoka Gdańska	570	550	506
GDYNIA	Zatoka Gdańska	570	550	504
HEL	Zatoka Gdańska	570	550	503

Tabl. 2. Liczba dni z wiatrem silnym w trzech kolejnych dziesięcioleciach (1961-1990) w Rozewiu, Gdyni i Helu

Lata	Rozewie	Gdynia	Hel
1961-1970	489	411	416
1971-1980	534	356	434
1981-1990	780	495	597
Razem	1803	1262	1447

Tabl. 3. Średnia miesięczna liczba dni z wiatrem silnym w Rozewiu, Gdyni i Helu (1961-1990)

Stacja	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Rozewie	7,0	6,5	6,8	3,6	3,3	2,1	2,6	2,8	4,1	6,7	7,1	7,5
Gdynia	4,4	4,1	4,1	3,3	3,0	2,4	2,7	2,1	3,8	3,2	4,0	4,9
Hel	5,4	4,3	4,8	4,1	2,7	2,3	3,0	2,6	3,1	3,7	5,9	5,9

Tabl. 4. Procentowy udział dni z wiatrem silnym w ogólnej liczbie dni miesiąca

Stacja	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Rozewie	22,6	23,2	21,9	12,0	10,6	7,0	8,3	9,0	13,7	21,6	23,3	24,2
Gdynia	14,2	14,6	14,2	11,0	9,7	8,0	8,7	6,7	12,7	10,3	13,3	15,8
Hel	17,4	15,4	15,5	13,7	8,7	7,7	9,7	8,4	10,3	11,9	19,7	19,0

- poziomów i stanów morza,
- częstości i kierunków wiatrów silnych (stan powyżej 6),
- temperatury oraz warunków zalodzenia akwenów,
- przemieszczania się zwałów kry lodowej.

Pomiary poziomów morza prowadzi się na wodowskazach w morskich stacjach sygnalizacyjnych rozmieszczonych wzdłuż polskiego wybrzeża. Stany charakterystyczne i średnie poziomy morza dla morskich stacji sygnalizacyjnych w Zatoce Gdańskiej zestawiono w tabl. 1.

Skrajne historyczne poziomy wody zarejestrowane w Helu [5] wynoszą:

- maksymalny 620,
- minimalny 405,
- średni 503,

co oznacza, że różniły się o 2,15 m.

Z analizy danych zamieszczonych w pracy [4] wynika, że wiatry generowane przez szybko przemieszczające się układy niżowe są przyczyną gwałtownych zmian poziomów wody. Silne wiatry z sektora północnego powodują wezbrania sztormowe, natomiast wiatry południowe znaczne obniżenia poziomów morza, czyli niżówki. Na zmiany poziomów morza wpływają również prądy morskie i falowanie.

Wybrane dane o liczbie i procentowym udziale dni z wiatrem silnym wynikające z pomiarów w okresie 1961-1990, z podziałem na poszczególne dekady, miesiące i na kierunki wiatrów zestawiono w tabl. 2 ÷ 5 na podstawie prac [9, 10].

Z analizy przedstawionych danych wynika, że:

- liczba dni z wiatrem silnym (stan powyżej 6) w trzech kolejnych dziesięcioleciach sukcesywnie wzrastała; wzrost ten wahał się od 1,2 w przypadku Gdyni do 1,49 i 1,55 w przypadku Helu i Rozewia,
- procentowy udział dni z wiatrem silnym był największy w okresach październik – marzec, a więc w okresach zimowych,
- w okresach zimowych (październik-marzec) najczęściej występowały wiatry silne z kierunków północno-zachodnich (NW), zachodnich (W), północnych (N) i północno-wschodnich (NE), powodujące wezbrania sztormowe.

Tabl. 5. Procentowa liczba dni z wiatrem silnym według kierunków w ciepłej (a) i chłodnej (b) porze roku oraz w okresie rocznym (c)

Stacja	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Rozewie	a	17,7	10,2	5,5	5,8	8,4	17,3	15,5	19,6
	b	13,8	11,3	7,8	9,3	6,2	14,8	17,3	19,5
	c	14,2	10,6	6,4	8,8	7,8	16,2	16,8	19,2
Gdynia	a	16,4	12,2	9,7	8,8	6,1	14,4	15,8	16,6
	b	14,4	12,5	7,9	6,8	7,3	14,8	16,9	19,4
	c	15,4	12,3	8,8	7,8	6,7	14,6	16,3	18,0
Hel	a	19,7	11,2	9,8	5,9	7,1	12,3	17,7	16,3
	b	15,2	12,8	10,1	7,2	6,9	13,0	17,5	17,3
	c	17,5	12,0	9,9	6,5	7,0	12,6	17,6	16,8

mowe oraz z kierunków południowo-zachodnich (SW) i w mniejszym stopniu południowych (S) powodujące obniżenie poziomów wody (tzw. niżówki).

Przy analizowaniu przyczyn uszkodzenia palisady bardzo istotne są warunki zalodzenia Zatoki Puckiej, szczególnie wzdłuż Półwyspu Helskiego.

Obszerna charakterystyka pokryw lodowych, form zdeformowanego lodu w strefie brzegowej oraz warunków zlodzenia w Zatoce Gdańskiej i Puckiej jest zawarta w pracach [2, 3, 8].

Na Zatoce Gdańskiej i Puckiej lód tworzy się najwcześniej w północno-zachodniej części Zatoki Puckiej oraz nad mieliznami przybrzeżnymi koło Jastarni, następnie w strefie przybrzeżnej koło Gdyni i Gdańska, natomiast najpóźniej pierwszy lód pojawia się przy Helu. Średnia długość sezonu lodowego dla zim z lodem wynosi 33 dni [8].

Zależnie od wartości temperatury ujemnej i czasu jej trwania oraz od kierunków, siły i prędkości wiatru następować może:

- przy wiatrach w kierunku lądu; dryf kry, jej zwieranie i w efekcie powstawanie spiętrzeń lodowych tworzących lód zwałowany (tzw. zwały lodowe) lub lód stłoczony,
- przy wiatrach z kierunków odlądowych; stopniowy odpływ lodu ze strefy przybrzeżnej w głąb morza i w efekcie końcowym pozostawanie wzdłuż brzegu pasm lodu przymarzniętego do dna lub często osiadłego na dnie.

Sytuacje takie są charakterystyczne i występują najczęściej wzdłuż linii brzegowej na akwenach osłoniętych o bardzo łagodnym spadku dna, czego przykładem jest linia brzegowa Półwyspu Helskiego od strony Zatoki Puckiej.

O tym, że warunki lodowe w Zatoce Puckiej mogą w bardzo krótkim czasie (kilka dni) ulegać diametralnej zmianie w przypadku nagłych zmian kierunków, siły i prędkości wiatru, świadczy sytuacja lodowa w porcie Puck, która miała miejsce w okresie od 30 marca do 2 kwietnia 2006 roku.

W dniu 30 marca 2006 roku rozległe pole lodowe w Zatoce Puckiej spowodowało, że zwały kry lodowej spiętrzonej siłą wiatru uszkodziły częściowo konstrukcję nośną mola (posadowionego na palach) w przystani jachtowej w Pucku, zagrażając uszkodzeniem dalszej części mola.

W wyniku tego podjęto przygotowania do akcji kruszenia pola lodowego ładunkami wybuchowymi. Rozpoczęto jednocześnie ciągłe monitorowanie, z powietrza i z morza, kierun-

ku przemieszczania się pola lodowego. Stwierdzono, że dzięki sprzyjającym kierunkom prognozowanych wiatrów i ich prognozowanej sile oraz prognozowanej dodatniej temperaturze powietrza, powinno nastąpić całkowite przemieszczenie pola lodowego z portu w Pucku na Zatokę Pucką i ustąpienie zagrożenia dalszego uszkodzenia mola. Z informacji zawartych w pracy [11] wynika, że przewidywany scenariusz przebiegu obciążeń środowiskowych lodem był w pełni potwierdzony.

MORSKIE OBCIĄŻENIA ŚRODOWISKOWE W SĄSIĘDZTWIE PALISADY W OKRESIE JEJ USZKODZENIA

Po przeanalizowaniu uprzednio przedstawionych, na podstawie cytowanej literatury, ogólnych informacji jakościowych i ilościowych o morskich obciążeniach środowiskowych w Zatoce Gdańskiej oraz Puckiej stwierdzono, że w celu wykonania wiarygodnych obliczeń stateczności uszkodzonej palisady i określenia najbardziej prawdopodobnych przyczyn jej uszkodzenia niezbędne jest jak najdokładniejsze jakościowe oraz ilościowe udokumentowane ustalenie tych obciążeń w bezpośrednim sąsiedztwie uszkodzonej palisady i w domniemanym okresie jej uszkodzenia.

Wykorzystano do tego wyniki szczegółowych codziennych pomiarów:

- kierunków i siły wiatrów oraz ich zmian w ciągu doby,
- poziomów wody i ich zmian w ciągu doby,
- temperatury powietrza (maksymalnej i minimalnej) w ciągu doby,
- zalodzenia i jego zmian w ciągu doby,

prowadzonych w Bosmanacie w Porcie Jastarnia w okresie grudzień 2008 - styczeń 2009.

Z analizy wymienionych pomiarów wynika, że:

- warunki pogodowe od 20 do 28 grudnia 2008 roku charakteryzowały się niewielką siłą wiatru (stopnie $2 \div 4$, wiatr słaby do umiarkowanego) i niewielkimi zmianami (do 0,12 m) poziomu wody oraz brakiem temperatur ujemnych w dzień i w nocy,
- pierwsze temperatury ujemne w dzień i w nocy pojawiły się 3 stycznia, trwały do 9 stycznia 2009 i wahały

się od -0,5 do -2,5 °C w dzień oraz od -4,0 do -9,0 °C w nocy,

- pierwsze zalodzenie w rejonie portu w Jastarni zaobserwowano w dniu 6 stycznia 2009 roku, trwało ono do 11 lutego 2009 roku (z krótką przerwą od 27 stycznia do 1 lutego) i obejmowało od 40 do 80% akwenu portowego,
- w pierwszej połowie stycznia 2009 roku występowały gwałtowne i naprzemiennie zmienne wiatry silne i sztormowe (od 6 do 9 stopni) oraz umiarkowane i słabe (od 2 do 4 stopni) o zmiennych kierunkach, co powodowało gwałtowne przyrosty (do 0,32 m) i ubytki (do 0,22 m) stanu wody w Zatoce Puckiej.

Przedstawione stwierdzenia potwierdzają awizowany i opisany wcześniej losowy charakter morskich obciążeń środowiskowych oraz gwałtowne zmiany jakościowe i ilościowe tych obciążeń.

METODYKA I ZAKRES OBLICZEŃ STATECZNOŚCI PALISADY

Z przedstawionej wcześniej charakterystyki jakościowej i ilościowej morskich obciążeń środowiskowych w sąsiedztwie palisady wynika, że najistotniejszym z nich i będącym najprawdopodobniej główną przyczyną uszkodzenia części pali w palisadzie jest obciążenie lodem. Wartości tych obciążeń i ich oddziaływań na pale palisady oraz warunki stateczności pali palisady określono zgodnie z zaleceniami (Z1 Obliczenia statyczne morskich budowli hydrotechnicznych, Z3 Poziomy morza dla polskiego Wybrzeża Bałtyku i Z20 Oddziaływanie lodu na morskie budowle hydrotechniczne) zawartymi w pracy [6].

Zakres wykonanych obliczeń szczegółowych obejmował określenie:

- obliczeniowej grubości lodu,
- obliczeniowej wytrzymałości lodu na ściskanie i na kruśnienie,
- obliczeniowych poziomów zwierciadła wody dla dwóch charakterystycznych poziomów morza: SWW i SNW – poziom średni z najwyższych i z najniższych zaobserwowanych poziomów rocznych w określonym czasie,
- charakterystycznych i obliczeniowych wartości oddziaływań poziomych od parcia lodu pływającego na wolno stojące budowle pionowe i na pionową podporę pośrednią z rzędu podpór pionowych,
- charakterystycznych i obliczeniowych oddziaływań pionowych przymarznionej pokrywy lodowej do pojedynczych pali lub grupy pali przy zmianach poziomu wody w morzu.

Na podstawie wyników tych obliczeń sprawdzono warunki stateczności pali palisady na zginanie od oddziaływań poziomych oraz na rozciąganie od oddziaływań pionowych lodu, przyjmując w obliczeniach najniekorzystniejszy stan wody SWW, nazywany wysokim średnim poziomem morza [6]. Z wykonanych obliczeń wynika, że warunek stateczności:

- ze względu na zginanie dla obu wariantowo przyjętych przypadków (wolnostojąca budowla pionowa – poje-

dynczy pal lub podpora pośrednia z rzędu podpór pionowych) nie został spełniony,

- ze względu na rozciąganie jest spełniony.

Oznacza to, że obliczeniowe poziome oddziaływanie lodu, określone dla warunków wskazanych w zaleceniu Z20 [6], wywołuje moment zginający powodujący powstanie w materiale pala naprężeń obliczeniowych przekraczających obliczeniową wytrzymałość pala na zginanie.

ANALIZA PRZYCZYN USZKODZENIA CZĘŚCI PALISADY

Na podstawie całości przedstawionych i przeanalizowanych wcześniej zagadnień przystąpiono do analizy przyczyn uszkodzenia części palisady (19 pali z ogólnej liczby 31 pali) na odwodnym odcinku palisady. W tym celu przyjęto trzy założenia początkowe, w których określono trzy różne scenariusze możliwego przebiegu uszkodzeń, które przeanalizowano kolejno, rozpatrując przesłanki za i przeciw. Są one następujące:

- **pierwsze:** uszkodzenie nastąpiło w końcowych dniach grudnia przez obciążenie palisady poruszonym przez wiatr polem lodowym, co wynika z informacji przekazanej przez kierownika ośrodka wypoczynkowego,
- **drugie:** uszkodzenie nastąpiło w okresie nieco późniejszym (w pierwszych dniach stycznia) w wyniku losowego poziomego obciążenia palisady lodem,
- **trzecie:** uszkodzenie przebiegało etapowo, rozpoczynając się w końcowych dniach grudnia od zniszczenia kilku pali na niewielkim końcowym odwodnym odcinku palisady, a następnie w pierwszych dniach stycznia rozwijało się sukcesywnie dalej w stronę brzegu, na zasadzie *domina*, obejmując ostatecznie 19 pali.

Przyjęte założenia są istotne, ponieważ dla każdego z nich mogą być odmienne zasadnicze przyczyny uszkodzeń pali palisady i ogrodzenia.

Trudno zgodzić się z założeniem pierwszym, ponieważ zgodnie z wcześniej opisanymi obciążeniami środowiskowymi w tym czasie nie występowały ujemne temperatury powietrza w dzień i w nocy, nie występowało zalodzenie, wahania poziomu wody były niewielkie (około 0,12 m), a wiatry miały głównie siłę 2 do 4 (słaby do umiarkowanego). Oznacza to, że przyczyna uszkodzeń musiała być inna. Mogło nią być poziome uderzenie w palisadę niezidentyfikowanych obiektów pływających (np. pni lub bali drewnianych lub fragmentów zniszczonych łodzi) niesionych siłą fal i wiatru.

Bardziej, chociaż nie całkowicie, prawdopodobny jest scenariusz drugi, w którym przyczyną uszkodzeń pali palisady mogło być nadmierne i szybko narastające poziome obciążenie palisady zwałowanym i stłoczonym lodem, potęgowane dodatkowo bardzo silnymi wiatrami (ze sztormowymi włącznie od 5 do 9 stopni) oraz gwałtownymi zmianami poziomu morza. Scenariusz ten potwierdzają przedstawione wcześniej wyniki ilościowe obliczeń stateczności pali palisady, dla których nie są spełnione wymagane warunki stateczności na zginanie od obciążeń poziomych dla założonego schematu wolnostojącej budowli pionowej oraz dla schematu podpory pośredniej z rzędu podpór pionowych wymagane w pracy [6]. Należy jednak do-

dać, że scenariusza tego nie potwierdza zachowanie się drugiej identycznej palisady, zlokalizowanej w odległości około 2 km w identycznych warunkach batymetrycznych, geotechnicznych i pogodowych, która nie uległa zniszczeniu.

Założenie trzecie, że uszkodzenie pali palisady przebiegało etapowo, jest najbardziej prawdopodobne oraz najlepiej udokumentowane w porównaniu z założeniem pierwszym i drugim. Należy dodać, że po złamaniu pierwszych kilku pali najdalej wysuniętych w stronę wody (etap 1) w końcu grudnia, gdzie przyczyna złamania była inna niż poziome obciążenie lodem, zalegały one na dnie wraz z przymocowanymi do nich stalowymi słupkami i stalową siatką ogrodzeniową. W etapie drugim na początku stycznia narastający gwałtownie zwałowany i słoczony lód nie tylko obciążał dalsze pale palisady, lecz przede wszystkim spowodował przymarzanie i uwięzienie w swojej masie wcześniej zniszczonych i zatopionych w wodzie pali oraz słupków i siatki ogrodzenia. Spowodowało to typowo losowe, a jednocześnie niemożliwe do precyzyjnego ilościowego określenia, zwiększenie obciążeń poziomych i ramion ich działania, a w konsekwencji naprężeń w materiale pali, przekraczających wytrzymałość pali na zginanie.

PODSUMOWANIE

Przedstawiony przykład postępowania w celu:

- syntetycznego scharakteryzowania poszczególnych rodzajów morskich obciążeń środowiskowych w rejonie Zatoki Gdańskiej i Zatoki Puckiej,
- wyboru metodyki ilościowego określenia oddziaływań tych obciążeń na budowlę morską,
- przeprowadzenia wariantowych obliczeń stateczności tej budowli,
- i w efekcie końcowym przeprowadzenia analizy oraz określenia najbardziej prawdopodobnych oraz udokumentowanych przyczyn uszkodzenia palisady,

oprócz ogólnych aspektów poznawczych, może być pewną praktyczną wskazówką przy projektowaniu i wykonawstwie budowli morskich, a dla studentów i doktorantów kierunku budownictwo pełnić rolę edukacyjną.

LITERATURA

1. Afańasjew W.P.: Szczególne przypadki obliczania parcia lodu na ruszty palowe przy ruchu pokrywy lodowej. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 1/1994.
2. Girajtowicz P.: Formy zdeformowanego lodu w strefie brzegowej południowego Bałtyku. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/1986.
3. Girajtowicz P.: Charakterystyka pokryw lodowych na wybrzeżu polskim. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/1999
4. Krzysztofik K.: Systemy ostrzegania o zmianach poziomów morza na Bałtyku wzdłuż polskiego wybrzeża. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2004
5. Majewski A.: Skrajne wahania poziomów wody u polskich wybrzeży Bałtyku. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/1986.
6. Mazurkiewicz B. i inni: Morskie budowle hydrotechniczne. Zalecenia do projektowania i wykonywania Z1-Z45. Wydawnictwo Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2008.
7. Relumat 2000 Katalog. Wydawca: Reluma Polska Sp. z o.o. Reda.
8. Stanisławczyk I., Sztobryn M.: Warunki zlodzenia na Bałtyku w akwenie Zatoki Gdańskiej w latach 1922-2000. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2004.
9. Trzeciak S., Pluta T., Salmonowicz W.: Analiza częstości i kierunków wiatrów silnych w środkowo-wschodniej części polskiego wybrzeża Bałtyku. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5/1998.
10. Trzeciak S., Salmonowicz W., Kulka T.: Analiza częstości i kierunków wiatrów silnych we wschodniej części polskiego wybrzeża Bałtyku, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/1999.
11. Strony internetowe: <http://www.umgdy.gov.pl>