

**CHOSEN PROBLEMS OF RISK MANAGEMENT
IN VICINITY OF BRIDGES IN RESPECT
TO SHIPS COLLISIONS**

**PROBLEMATYKA ZARZĄDZANIA BEZPIECZEŃSTWEM
W REJONACH LOKALIZACJI MOSTOWYCH
W ASPEKCIE ZDERZEŃ JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH**

Lucjan Gućma

Akademia Morska w Szczecinie
l.gucma@am.szczecin.pl

***Abstract:** The paper presents several issues of risk management in respect to ship collisions with bridges. Accident statistics in Poland and around the world, risk acceptance problems and two case studies for probability assessment are presented.*

***Keywords:** safety, risk management*

***Streszczenie:** W referacie przedstawiona została problematyka zarządzania ryzykiem w rejonach lokalizacji mostowych a aspekcie zderzeń jednostek pływających z mostami w tym wypadkowość w Polsce i na świecie, Przedstawiono również problemy akceptowalności ryzyka oraz dwa studia przypadków wybranych elementów analiz bezpieczeństwa lokalizacji mostowych w badanym aspekcie.*

***Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo, zarządzanie ryzykiem*

1. Wypadkowość i problematyka zderzeń jednostek pływających z mostami

Mosty zlokalizowane na akwenach morskich i śródlądowych należą do szczególnie wrażliwej infrastruktury z trzech głównych powodów:

- tworzą ograniczenia nie tylko w płaszczyźnie pionowej, ale także poziomej;
- z racji przebywania na nich ludzi, mogą tworzyć dla nich zagrożenie w przypadku uderzenia statku w most;
- koszt mostu jest zwykle znacznie większy od kosztu statku.

Na podstawie analiz literatury [Scheer, 2010; Radomski, 2011] można stwierdzić, że uderzenie statku jest jedną z głównych przyczyn katastrof mostów i mogą stanowić nawet 30% wszystkich przyczyn tych zdarzeń.

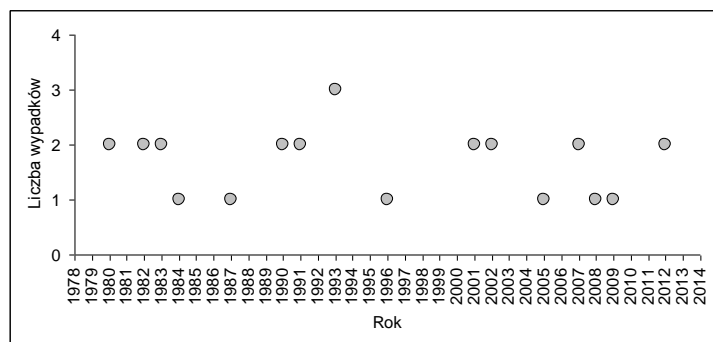
W latach 2003-2013 zespół naukowy inżynierii ruchu morskiego Akademii Morskiej w Szczecinie wykonał szereg analiz bezpieczeństwa mostów w tym [Gucma L., 2013]:

- mostu Kolejowego w Szczecinie (2003),
- dwóch lokalizacji mostowych w Elblągu (2008),
- mostów na Wyspę Spichrzów w Gdańsku (2009),
- dwóch mostów na Motławie w Gdańsku (2009),
- mostu na Ostrowie Brdowskim w Szczecinie (2013).

Problematyka zderzeń statków z mostami wywodzi się z lat 60, kiedy to w wyniku wzrostu intensywności ruchu i gabarytów statków nastąpił wzrost wypadków i katastrof. Pierwsze, poważniejsze studia zostały przeprowadzone w roku 1980 po zderzeniu się statku Summit Venture z mostem Sunshine Skyway.

Przygotowano zestawienie ważniejszych zderzeń statków z mostami od 1980 roku. Ustalono skutki i przyczyny zderzeń, liczbę ofiar oraz nazwę statku [Gucma L. 2013].

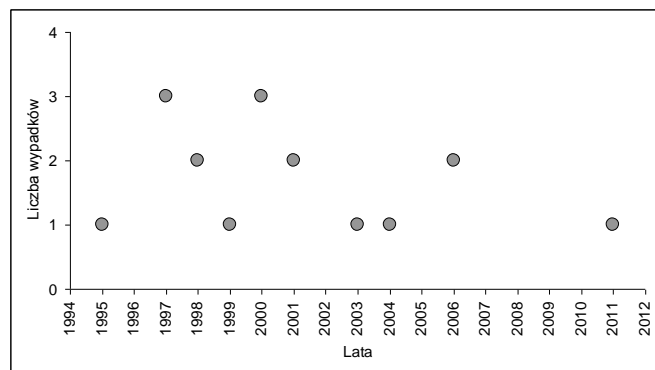
Można zauważyć (rys. 1), że średnio na świecie występują 2 poważne zderzenia statków z mostami rocznie, a co 2 lata występuje wypadek o katastrofalnych skutkach powodujący zniszczenie mostu, zatonięcie statku lub ofiary w ludziach.



Rys. 1. Roczna liczba poważnych w skutkach zderzeń statków z mostami na świecie

Amerykańskie statystyki [USCG, 2003] ujawniły, że duża część zderzeń statków z mostami powoduje jednak stosunkowo niewielkie straty. W latach 1992–2001 zanotowano łącznie 2692 zderzeń. Tylko 61 z nich (2,2%) spowodowało straty większe od 0,5 mln USD. Aż 1702 zdarzeń (63%) to incydenty, w których uszkodzenia nie były znaczące i nie dokonywano napraw mostu.

W samym tylko rejonie zarządzanym przez RZGW w Szczecinie odnotowuje się około jednego zderzenia jednostki z mostem w roku. Najpoważniejszym zdarzeniem było zniszczenie prowadnic mostu Kolejowego w Szczecinie w 2001 r., co spowodowało konieczność ich wymiany. Na podstawie danych z RZGW w Szczecinie zebrano wszystkie przypadki zderzeń jednostek śródlądowych z mostami w rejonie RZGW Szczecin (rysunek 2). Było ich 17 w ciągu analizowanych 16 lat. Szczęśliwie, nigdy nie doszło do ofiar w ludziach. Dominują wypadki wynikające z błędu nawigatora, które zdarzają się z częstością ok. 90%, co potwierdzają statystyki światowe. Niepokojący jest też duży udział zderzeń z przęslami, który wynosi aż 65%. Część z nich skończyła się poważanymi uszkodzeniami statku. Zderzenia takie wynikają najczęściej z błędów w przygotowaniu nawigacyjnym przejścia pod mostem, to jest z niewiedzy o aktualnym prześwicie mostu lub wysokości nawodnej jednostki własnej.

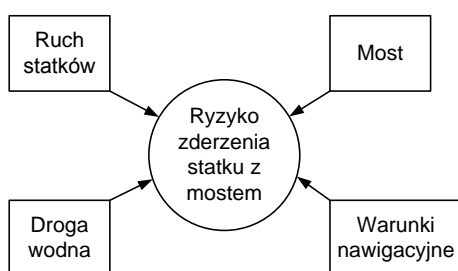


Rys. 2. Liczba wypadków z mostami w rejonie administrowanym przez RZGW w Szczecinie [Gucma L., 2013]

2. Zarządzanie ryzykiem w aspekcie zderzenia z jednostkami pływającymi w rejonie mostów

Budowa racjonalnego systemu zarządzania ryzykiem przed oddaniem obiektów narażonych na niebezpieczeństwa wypadku i katastrofy, zwłaszcza, gdy takowe mogą pociągać ofiary śmiertelne, to obecnie standard w wielu krajach. W rozdziale tym przedstawiono niektóre teoretyczne i praktyczne aspekty zarządzania ryzykiem. Skupiono się na miarach ryzyka oraz jego ocenie, co wiąże się z ustaleniem poziomów jego akceptacji.

Na rysunku 3 przedstawiono cztery główne czynniki wpływające na zderzenia statków z mostami. Do warunków nawigacyjnych można zaliczyć również warunki pogodowe.



Rys. 3. Czynniki ryzyka zderzeń statków z mostami

Ryzyko zderzenia statków z mostami można podzielić na pięć głównych kategorii:

- 1) ryzyko dla właściciela mostu związane z koniecznością jego naprawy lub utrata korzyści po przerwaniu przeprawy;
- 2) ryzyko dla użytkowników mostu związane z możliwością utraty życia, zdrowia lub majątku podczas przeprawy;
- 3) ryzyko dla stron trzecich (postronnych), które nie czerpią korzyści bezpośrednich z mostu. Dotyczy również statków, w przypadku, gdy most powoduje zagrożenie w stosunku do stanu przed zbudowaniem mostu;
- 4) ryzyko dotyczące skutków socjoekonomicznych z powodu przerwania przeprawy mostowej;
- 5) ryzyko dla środowiska w wyniku zanieczyszczenia rozlewem lub uwolnieniem gazów trujących.

Przeprowadzając analizy zagrożeń w rejonie mostów w aspekcie uderzenia statku, przyjmuje się, że sytuacją krytyczną jest niezamierzone zderzenie statku z mostem lub jego zabezpieczeniami. Takie zdarzenia krytyczne dzieli się na [L. Gućma, 2009]:

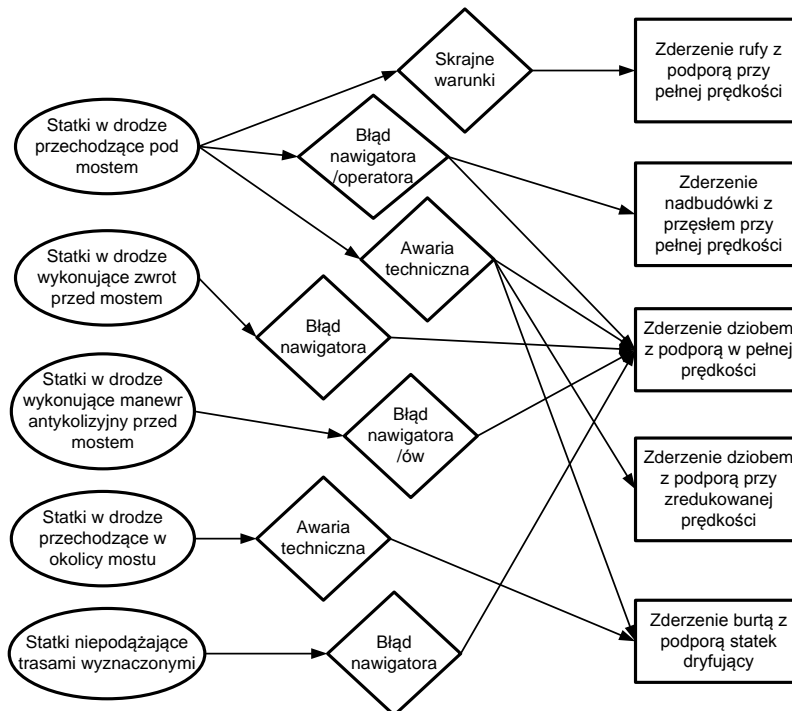
- zderzenie kadłuba z podporą mostu lub jej zabezpieczeniami,
- zderzenie nadbudówki z przęsłem mostu.

Wypadki nawigacyjne polegające na zderzeniu statków z mostami można podzielić na następujące kategorie:

Kategoria 1. Statki w drodze przechodzące swoją założoną trasą pod mostem, które zderzają się z podporą mostu w wyniku błędu nawigatora.

Kategoria 2. Statki w drodze przechodzące swoją założoną trasą pod mostem, które zderzają się z podporą mostu w wyniku awarii technicznej (najczęściej steru).

- Kategoria 3. Statki w drodze przechodzące swoją założoną trasą w rejonie mostu, które zderzają się z jego podporą w wyniku podjęcia manewrów antykolidyjnych.
- Kategoria 4. Statki w drodze przechodzące w rejonie mostu, które zderzają się z podporą mostu w wyniku niewykonania zwrotu.
- Kategoria 5. Statki, które utraciły napęd w rejonie mostu i są na niego zdryfowane.
- Kategoria 6. Statki w drodze, które uderzają w przęsło mostu w wyniku zbyt małego zapasu, co jest spowodowane najczęściej błędem nawigatora.
- Kategoria 7. Statki w drodze, które przechodzą pod mostami otwieranymi i na skutek uszkodzenia mechanizmu lub błędu ludzkiego zderzają się z przęsłem mostu lub opada ono podczas zamykania na przechodzący statek.
- Kategoria 8. Statki, które nie podążają wyznaczonymi trasami, w tym statki rybackie i turystyczne.
- Kategoria 9. Statki w drodze przechodzące swoją założoną trasą pod mostem, które zderzają się częścią rufową z podporą w wyniku oddziaływania prądu lub wiatru na statek.
- Drzewo logiczne możliwych scenariuszy wypadków i ich skutków dla powyższych kategorii przedstawiono na rysunku 4.

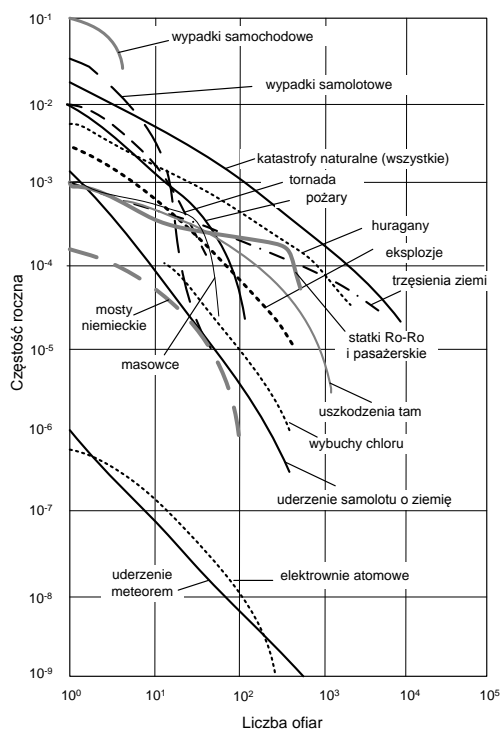


Rys. 4. Drzewo logiczne najbardziej możliwych scenariuszy zderzeń statków z mostami wraz z przyczynami i skutkami

Procedura zarządzania ryzykiem to wielostopniowa racjonalna metoda, mająca na celu zwiększanie bezpieczeństwa żeglugi poprzez ochronę życia i zdrowia ludzi, środowiska oraz własności [Gucma L., 2009]. Procedura polega na analizie (estymacji) ryzyka, oszacowaniu ryzyka, podjęciu decyzji o jego akceptowalności oraz jego czasowej kontroli. Składa się ona z czterech etapów:

- 1) Identyfikacji zagrożeń.
- 2) Analizy ryzyka (estymacji ryzyka na podstawie posiadanych danych bez uwzględniania zmian w analizowanym obszarze), która składa się z szacowania prawdopodobieństwa powstania zagrożenia (*probability assessment*) i określenia skutków zdarzenia (*consequence analysis*).
- 3) Oszacowania (oceny) ryzyka (porównanie ryzyka z wartościami kryterialnymi, a więc z poziomem akceptowalnym).
- 4) Zarządzania ryzykiem (z uwzględnieniem metod redukcji ryzyka i czasowej jego kontroli).

Do analizy ryzyka najczęściej stosuje się miary ryzyka grupowego, do których można zaliczyć krzywe spodziewanych ofiar śmiertelnych w funkcji ich prawdopodobieństwa rocznego, przedstawione za pomocą tzw. krzywych ryzyka (*FN frequency – number of fatalities*) (rysunek 5).



Rys. 5. Przykładowe krzywe ryzyka *F-N* wraz z krzywymi dla mostów niemieckich [Gucma L., 2013]

3. Poziomy akceptowalne zniszczenia mostu w wyniku zderzenia ze statkiem

Kryteria akceptowalności ryzyka dla przerwania połączenia mostowego wynikają z następujących czynników:

- możliwych strat w ludziach w przypadku ruchu na moście,
- stopnia ważności mostu dla społeczeństwa lub/i obronności kraju,
- kosztów odbudowy i kosztów przestoju w wyniku przerwania mostu, określanych najczęściej za pomocą analizy efektywności.

Uwzględniając normy międzynarodowe i lokalne, kryteria akceptowalności ryzyka uszkodzenia krytycznego mostu przez przechodzące statki są ustanawiane osobno w każdym większym projekcie mostu na świecie. Często, aby stworzyć takie kryteria, należy wykonać szerokie odwołania do istniejących projektów inżynierskich lub naturalnych zagrożeń w badanym rejonie.

Stosowane prawdopodobieństwo zniszczenia mostu w kodeksach i standardach międzynarodowych jest zwykle rzędu 0,0001 do 0,001 na 100 lat (tj.: 10^{-6} do 10^{-5} rocznie). Analizując dostępną literaturę [Gucma L. 2013] w zakresie akceptowalności ryzyka zniszczenia mostu w wyniku kolizji ze statkiem, można zauważyć:

- Dla projektu mostu przez Wielki Bełt kryterium katastrofy w wyniku zderzenia ze statkiem 1 na 10 000 lat, daje prawdopodobieństwo przerwania połączenia mostowego na poziomie 0,02 na 100 lat ($2 \cdot 10^{-4}$ rocznie).
- Wydane w 1985 roku zalecenia stanu Luizjana dzielą mosty na kategorie. Dla mostów głębokowodnych (statki do 13 m zanurzenia) dopuszczalne prawdopodobieństwo zniszczenia mostu w wyniku kolizji ze statkiem może wynosić 0,01 na 100 lat (10^{-4} rocznie).
- Standard ISO nakłada graniczne prawdopodobieństwa zniszczenia mostu w wyniku zderzenia na poziomie prawdopodobieństwa 0,01 na 50 lat, co odpowiada 0,02 na 100 lat ($2 \cdot 10^{-4}$ rocznie).
- J.B. Menzies proponuje przyjmować ryzyko akceptowalne zniszczeń mostów na poziomie $2 \cdot 10^{-6}$, która to wartość wydaje się być zbliżona do norm cytowanych w Eurokodzie 1 EN1990:2002. Warto również zauważyć, że autor ten stwierdza, iż w przeszłości ponad połowa wszystkich zniszczeń mostów była spowodowana wypadkiem związanym ze zderzeniem lub erozją dna przy podporze w wyniku powodzi.
- Zalecenia Federalnej Administracji Drogowej w USA (AASHTO) zakładają prawdopodobieństwa zniszczenia mostu na poziomie 0,1 i 0,01 na 100 lat (odpowiednio 10^{-3} i 10^{-4} rocznie) dla standardowych i krytycznych mostów.

- Według L. J. Vincentsena i S. Spangenbergga w zmienionym projekcie mostu i tunelu przez Wielki Bełt przyjęto poziomy akceptacji przerwania jednocześnie połączenia drogowego i kolejowego 0,02 na 100 lat, a mostowego lub kolejowego 0,1 na 100 lat.
- Według raportu 63 *Construction Industry Research and Information Association* ryzyko zniszczenia konstrukcji może być określone jako $P_z = (10^{-4}/n_r)K_s n_d$, gdzie P_z jest prawdopodobieństwem zniszczenia konstrukcji z powodu jakiegokolwiek przyczyny w okresie eksploatacji, n_d , n_r jest liczbą osób zagrożonych w wypadku, a K_s to współczynnik przyjmujący wartości zależne od klasy budowli: miejsca zgromadzeń publicznych, tamy – 0,005; aktywność domowa, biuro, handel lub przemysł – 0,05; mosty – 0,5; wieże, maszty i konstrukcje morskie – 5. Kryterium to zostało wykorzystane do projektowania drugiego mostu nad rzeką Severn i doprowadziło do osiągnięcia wartości akceptowalnej mniej niż $4 \cdot 10^{-7}$ na rok.
- *Nordic Committee for Safety of Structures* podaje wartości dopuszczalne prawdopodobieństwa rocznego uszkodzenia na poziomie 10^{-3} do 10^{-7} dla skutków poważnych lub bardzo poważnych.
- JCSS podaje wartości kryterialne na poziomie 10^{-3} do 10^{-6} dla uszkodzeń ze skutkami poważnymi.
- AASHTO operuje tzw. okresami powrotnymi (czas pomiędzy wypadkami). Dla erozji dna przy podporze w wyniku powodzi stosuje 100- i 500-letni okres powrotny odpowiednio dla mostów regularnych i krytycznych (0,01 i 0,02 w roku), dla trzęsień ziemi 475- i 2500-letni okres powrotny (0,02 i 0,004), a dla kolizji ze statkami 1000- i 10 000-letni (0,001 i 0,0001 w roku).

Należy zauważyć, że kryteria akceptacji ryzyka w Europie są budowane zwykle dla skumulowanych wszystkich możliwych wypadków, w tym sejsmicznych, pożarów, erozji dennej przy podporach, wpływu lodu itp. Kryteria amerykańskie budowane są dla pojedynczych zdarzeń. Analiza powyższa wskazuje, że brak jest ogólnie przyjętych norm światowych akceptowalności ryzyka. Wytyczne mają znaczną rozpiętość wartości kryterialnych. Prawdopodobieństwo przerwania połączenia mostowego od 10^{-3} do 10^{-6} , może być przyjęta jako średnia wartość wyjściowa do dalszych analiz.

4. Wybrane przykłady analizy bezpieczeństwa przejścia statków w rejonie mostów

Przedstawiono dwie przykładowe analizy dotyczące określania prawdopodobieństwa uderzenia statku w elementy mostu ograniczające drogę wodną w płaszczyźnie pionowej-przesło i poziomej-podporę.

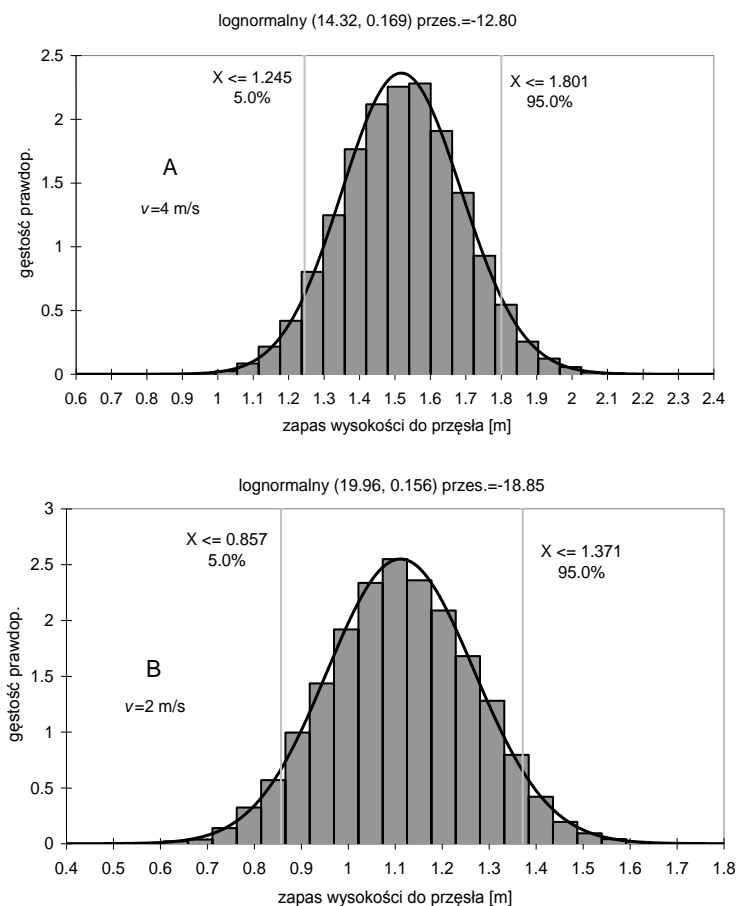
Zderzenie z przęsłem. Określanie zapasu wysokości do przęsła mostu metodami symulacji statystycznej

Zbudowano model zapasu wysokości nad statkiem do przęsła. Poszczególne rozkłady zmiennych losowych i ich parametry oszacowano na podstawie wyników uzyskanych w projekcie *Opracowanie metody dynamicznego prognozowania rezerwy wody pod stępkę...* [L. Gućma, 2008d]. Do badań przyjęto przykładowy most na torze wodnym Szczecin–Świnoujście o wysokości $H = 36$ m i statek maksymalny, jaki może wejść do Szczecina o parametrach $L = 160$ m, $T = 9,15$ m, $A = 35$ m dla dwóch prędkości 8 w i 4 w. Dane wejściowe do modelu przedstawiono w tabeli 1.

Symulacje Monte Carlo przeprowadzono za pomocą pakietu @Risk dla liczebności próbek równej 100 000, co dało odpowiednią statystyczną zbieżność uzyskanych wyników. Najlepsze dopasowanie zapasu wysokości do przęsła mostu daje rozkład lognormalny o niewielkiej asymetrii. Za jego pomocą można określić prawdopodobieństwo uderzenia statku w przęsło mostu. Z wykresów przedstawionych na rysunku 6 widać, że 5% statków będzie miało zapas mniejszy niż odpowiednio: 1,24 m i 0,86 m dla badanych prędkości 4 i 2 m/s Potwierdzono również tezę o związku zapasu wysokości nad statkiem do przęsła z jego prędkością, co wynika ze zjawiska osiadania.

Tabela 1. Rozkłady zmiennych losowych przyjęte do symulacji Monte Carlo i ich parametry

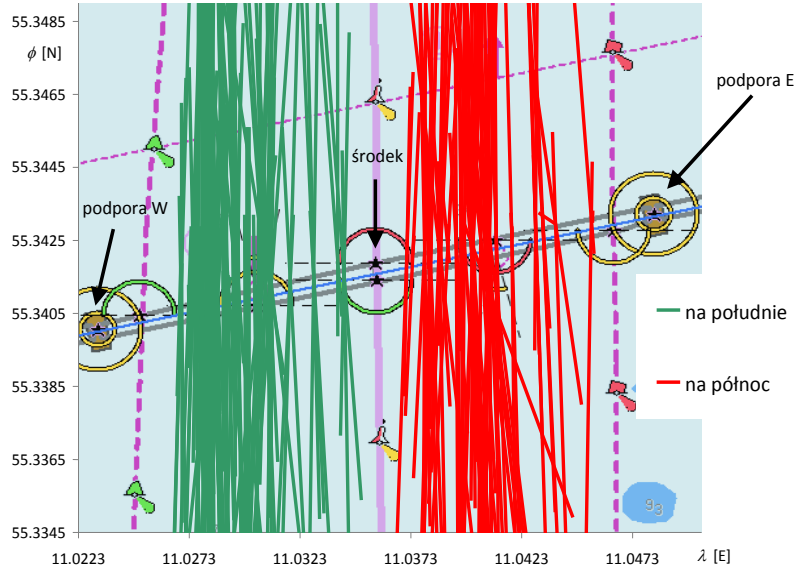
Zmienna	Symbol	Przyjęta średnia wartość	Rozkład błędu	Parametry rozkładu błędu
Wysokość mostu [m]	H	36	jednostajny	(0; -0,05)
Zanurzenie statku [m]	T	9,15	normalny ucięty	(0; 0,1; 0,2)
Wysokość nawodna [m]	A	35	na podst. T	j.w.
Osiadanie [m]	O	4 modele	<i>bootstrap</i>	
Poziom zwierciadła wody [m]	p_{wa}	0	normalny ucięty	(0; 0,1, 0,15)
Szerokość statku [m]	B	35	jednostajny	(35; 40)
Prędkość statku [w]	v	8 i 4	normalny	(0, 0,5)



Rys. 6. Rozkład zapasu wysokości nad statkiem do przęsła dla dwóch prędkości statków: 8 w i 4 w

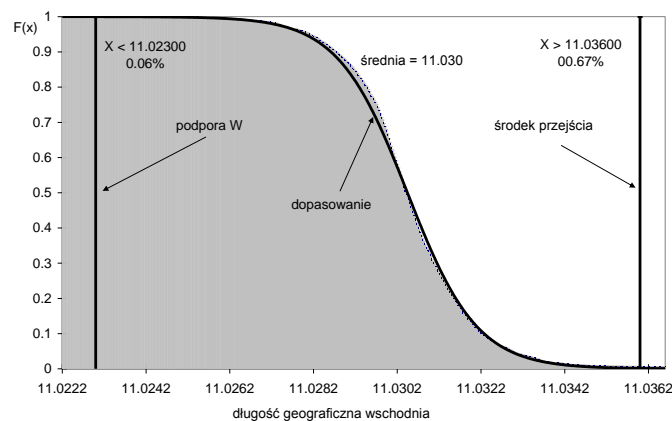
Zderzenie z podporą. Most Wielki Belt – analiza ruchu statków za pomocą AIS

System AIS jest bardzo dobrym narzędziem do analizy ruchu statków i ich bezpieczeństwa także w rejonie mostów. Istnieje możliwość występowania utrudnień odbioru sygnału satelity GPS podczas przejścia z uwagi na przesłonięcia przez elementy mostu i możliwość utraty pozycji statku. Przeprowadzono analizy ruchu statków podczas przejścia pod największym mostem europejskim Wielki Belt Zachodni, pod którym występuje ruch dwukierunkowy. Rejestrowano niefiltrowany sygnał AIS pochodzący z sieci wymiany danych AIS HELCOM. Zarejestrowano ogółem około 6500 przejść statków w jednym kierunku. Badania obejmowały rok 2011. Zarejestrowane trasy wybranych przejść statków pokazano na rysunku 7. Widać, że niektóre ze statków poruszają się blisko podpór mostu.



Rys. 7. Zarejestrowane trasy przejść statków w rejonie Mostu Wielki Belt Wschodni

W następnym kroku określano rozkłady gęstości prawdopodobieństw funkcji położenia zarejestrowanych pozycji statków podczas przejścia pod mostem. Wykres dystrybuanty położenia statków poruszających się na północ przedstawiono na rysunku 8. Rozkład logistyczny o parametrach $a = 11,03$ i $b = 8,32$ wykazał dobre dopasowanie do danych empirycznych (stosowano testy Kolmogorowa–Smirnowa i χ^2). Widać, że prawdopodobieństwo zderzenia z podporą zachodnią mostu wynosi $6 \cdot 10^{-4}$, a więc wykazuje dużą zgodność z danymi z literatury. Prawdopodobieństwo wyjścia poza własny tor żegludowy i przedostania się w pas przeznaczony dla ruchu przeciwnego jest większe i wynosi $6,4 \cdot 10^{-3}$.



Rys. 8. Dystrybuanta położenia statków pod mostem (tor zachodni)

5. Podsumowanie

Wykazano, że problem zderzeń statków z mostami w Polsce i na świecie jest poważny, również na akwenach śródlądowych. Dodatkowo fakt znacznej degradacji infrastruktury przyczynia się do jego pogłębiania. Istnieje szereg metod szacowania ryzyka, z których omówiono dwie.

Projektowanie nowych lokalizacji mostowych powinno być poparte indywidualnymi analizami ryzyka, gdyż jak wykazano normy i wytyczne nie zawsze zapewniają optymalne założenia do ich projektowania.

Należy rozważyć przeprowadzenie głębszej dyskusji w kwestii bezpieczeństwa lokalizacji mostowych w aspekcie zderzeń ze statkami w Polsce zwłaszcza, że ewentualne katastrofy mogą pociągać za sobą ofiary śmiertelne.

6. Literatura

- [1] AASHTO (1991): Guide specification and commentary for vessel collision design of highway bridges. Volume I: Final report. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Washington, D.C.
- [2] Gucma L. (2009): Wytyczne do zarządzania ryzykiem morskim. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Szczecinie. Szczecin.
- [3] Gucma L. (2013): Zarządzanie ryzykiem w rejonie mostów usytuowanych nad drogami wodnymi w aspekcie uderzenia jednostek pływających. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Szczecinie. Szczecin.
- [4] Radomski W. (2011): Katastrofy i awarie mostów a rozwój wiedzy budowlanej. Konferencja Naukowo-Techniczna – Awary Budowlane. Międzyzdroje.
- [5] Scheer J. (2010): Failed Bridges – Case Studies, Causes and Consequences, Ernst&Sohn, 2010
- [6] USCG (2003): Report of U.S. Coast Guard and American Waterways Operators. Bridge Allision Work Group. A Product of the Coast Guard – AWO Safety Partnership. May.



dr hab. inż. Lucjan Gucma jest od 1993 roku zatrudniony w Akademii Morskiej w Szczecinie. Specjalizuje się w projektowaniu infrastruktury portowej, analizach ryzyka systemów morskich oraz projektowaniu technicznych systemów bezpieczeństwa nawigacji.