

ZESZYTY NAUKOWE NR 9(81)  
AKADEMII MORSKIEJ  
W SZCZECINIE

---

INLAND SHIPPING 2005

---

Lucjan Gucma

**Bezpieczeństwo przejścia jednostek żeglugi śródlądowej  
pomiędzy filarami mostu Kolejowego w Szczecinie  
(metoda symulacyjna i fotogrametryczna)**

Słowa kluczowe: fotogrametria bliskiego zasięgu, symulacja ruchu statku,  
bezpieczeństwo nawigacji

*W artykule przedstawiono metodę określania bezpieczeństwa przejścia jednostek żeglugi śródlądowej pomiędzy filarami mostu na przykładzie mostu Kolejowego w Szczecinie. Jest to metoda kompleksowa składająca się z metody symulacyjnej czasu rzeczywistego oraz metody fotogrametrycznej wykorzystanej do weryfikacji otrzymanych wyników. Metoda ta pozwala na określanie poziomu bezpieczeństwa mostu w aspekcie możliwej kolizji jednostek żeglugi śródlądowej z podporami mostu oraz takie zaprojektowanie zabezpieczeń podpór w formie prowadnic, które zminimalizuje skutki ewentualnych zderzeń statków.*

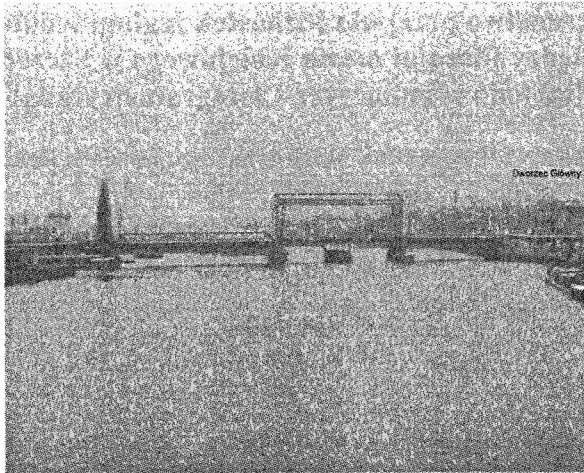
**Safety of Inland Ships Passage under the Kolejowy Bridge  
in Szczecin (Simulation and Photogrammetric Method)**

Key words: close range photogrammetry, ship manoeuvring simulation, safety of navigation

*The paper presents a method of safety evaluation of inland ships passage under the Kolejowy Bridge in Szczecin. It is a complex method which consists of real time ship manoeuvring simulation and a photogrammetric method used for verification of simulation results. Such method allows the evaluation of bridge safety in respect to possible ship's collision with bridge pillars and designing the guide fender layout which minimise the consequences of possible collisions.*

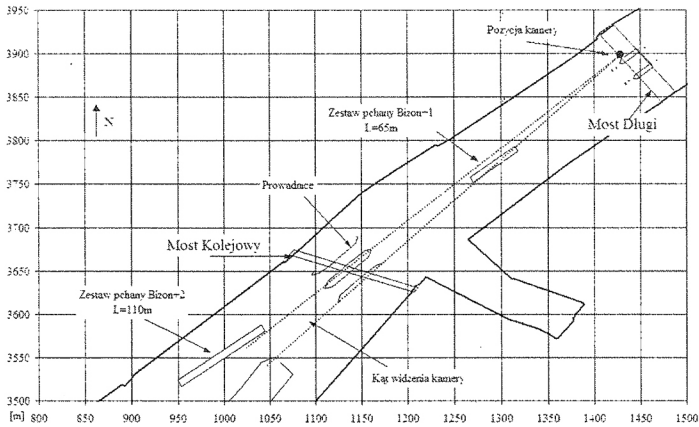
## Wstęp

W artykule zaprezentowano nową metodę wyznaczania prawdopodobieństwa awarii statku podczas przejścia pod mostem. Metoda jest kombinacją metody symulacyjnej i eksperymentu rzeczywistego opartego na badaniach fotogrametrycznych [2]. Badania fotogrametryczne zostały wykorzystane do pozyskania danych rzeczywistych oraz weryfikacji metody symulacyjnej. Celem badań było określanie aktualnego bezpieczeństwa układu prowadnic mostu Kolejowego w Szczecinie (rys. 1), w aspekcie zderzenia statku oraz zaprojektowanie nowego układu prowadnic przy założeniu minimalizacji uszkodzeń mostu przez uderzające w niego statki.



Rys. 1. Widok z mostu Długiego na most Kolejowy  
*Fig. 1. A view from Długi Bridge on Kolejowy Bridge*

Most Kolejowy, przez który przechodzi duża część ruchu kolejowego do i ze Szczecina, jest zlokalizowany na 35,6 km rzeki Odry (rys. 2). Most został zbudowany przed II wojną światową, w latach 70. dobudowano prowadnice, które pierwotnie zaprojektowane były do prawostronnego ruchu statków. W związku ze zwiększeniem wielkości jednostek pływających i zestawów wprowadzono ruch lewostronny, co miało wspomóc duże zestawy żeglujące w dół rzeki. Ruch lewostronny jednak powoduje zagrożenia związane z możliwością uderzenia statku w podporę mostu pod zbyt dużym kątem, co wiąże się z większą energią zderzenia i możliwością uszkodzenia konstrukcji mostu.



Rys. 2. Szczegółowa mapa badanego rejonu oraz lokalizacja stanowiska pomiarowego  
 Fig. 2. Detailed map of the examined area (location of the measurement point)

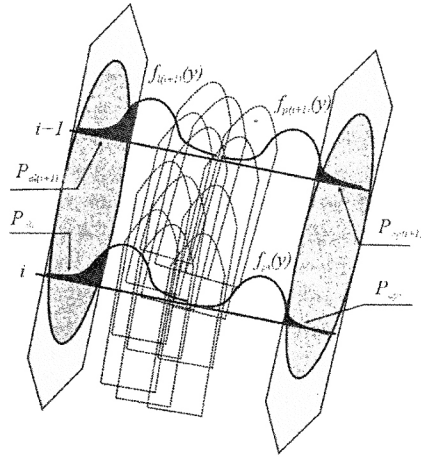
## Metoda symulacyjna

Po przeprowadzeniu badań symulacyjnych na podstawie estymowanych parametrów rozkładu pozycji statku o średniej  $m$  i wariancji  $\sigma^2$  wyznaczono prawdopodobieństwo zderzenia  $P_{api}$  statku z podporami mostu na podstawie następującej zależności (rys. 3):

$$P_{api} = \int_{d_{max\ i}}^{+\infty} f_{pi}(y) \quad (1)$$

gdzie:

- $P_{api}$  – prawdopodobieństwo zderzenia z prawą podporą w  $i$ -tej sekcji podziału toru,
- $d_{max\ i}$  – odległość podpory mostu od środka toru wodnego  $i$ -tej sekcji podziału toru,
- $f_{pi}(y)$  – funkcja gęstości rozkładu skrajnych pozycji statku po prawej stronie  $i$ -tej sekcji podziału toru.



Rys. 3. Rozkład skrajnych odległości punktów od środka toru wodnego  
 $(f_{pi}(y))$  – funkcja gęstości rozkładu skrajnych punktów statku  
w  $i$ -tej sekcji podziału prawej strony toru)

Fig. 3. Distribution of the extreme distances of the points from the fairway centre  
 $(f_{pi}(y))$  – distribution density function of ship's extreme points  
in the  $i$ -th fairway starboard section

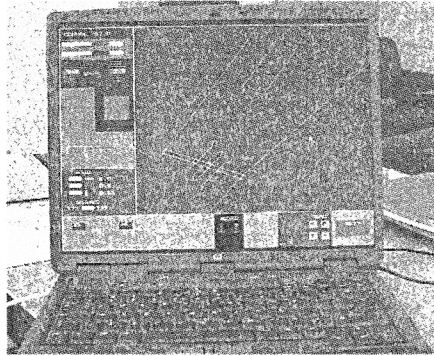
Symulacje wykonywali kapitanowie i szyprowie ze stażem w manewrowaniu tego rodzaju jednostkami. Układ eksperymentalny zaprojektowano tak, aby obejmował 6 serii symulacyjnych (tabela 1). Symulacje przeprowadzono na zbudowanym modelu komputerowym z uproszczoną wizualizacją sytuacji nawigacyjnej (typu mapa elektroniczna) i urządzeniami sterowniczymi statku (rys. 4).

Tabela 1

Główne parametry wykonanych prób symulacyjnych  
Main parameters of simulation trials

Nr serii	1	2	3	4	5	6
Kierunek	w dół rzeki	w górę rzeki	w dół rzeki	w górę rzeki	w dół rzeki	w górę rzeki
Prowadnice	NW	SE	NW	SE	SE	SE
Statek, zestaw	Bizon zestaw 110 m	Bizon zestaw 110 m	Bizon zestaw 110 m	Bizon zestaw 110 m	BM500 barka motorowa 57 m	Adler River barka pasażerska 53 m
Prąd: kierunek zmienny średni ok. $0.043^0$ , prędkość 0.5 m/s. Wiatr: NW 7 m/s. liczba prób w serii: 15.						



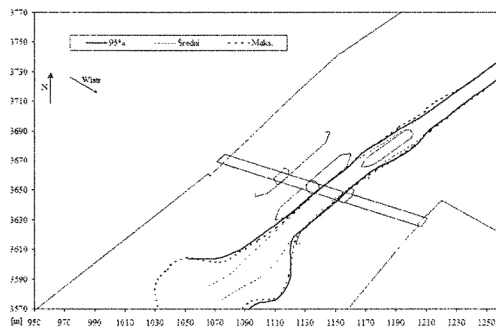


Rys. 4. Symulacyjny model komputerowy manewrowania statków w rejonie mostu Kolejowego w Szczecinie  
*Fig. 4. Computer-simulated model of ship manoeuvring in the area of Kolejowy Bridge in Szczecin*

Z uwagi na to, że kontakt z prowadnicami jest często elementem taktyki manewrowania, symulacje wykonano w dwóch etapach:

- bez symulowanej na uderzenie statku reakcji prowadnic w celu wstępnego zaprojektowania kształtu prowadnic,
- z reakcją prowadnic celem obliczenia sił i energii na prowadnicach oraz zachowania się statku podczas kontaktu.

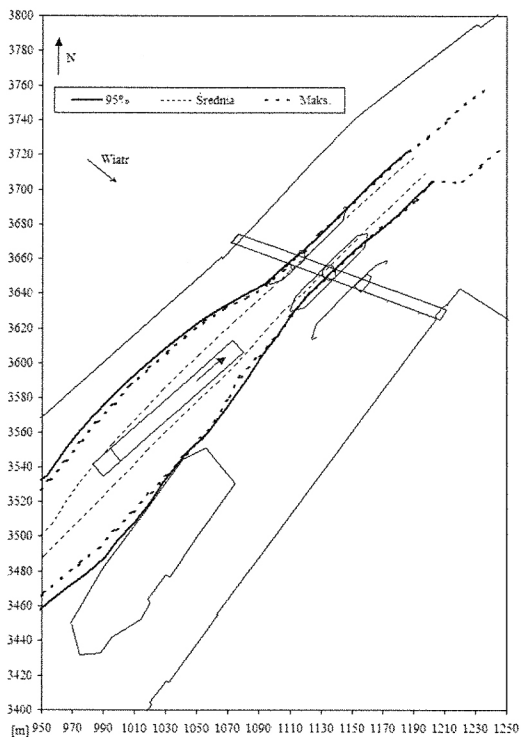
Przykładowe wyniki badań symulacyjnych w postaci bezpiecznych obszarów manewrowych na poziomie ufności 0,95 przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Przedstawiono również obszar maksymalny i średni, które są pomocne w przeprowadzaniu analiz.



Rys. 5. Wyniki 15 przejazdów statkiem pasażerskim typu „Adler River”  
*Fig. 5. Results of 15 passages by the ship of Adler River type*

Jak można zauważyć z rysunku 5 niemożliwe jest w zadanych warunkach manewrowanie bez kontaktu z prowadnicami. Zatem celem dalszych prac powinno być takie ich usytuowanie, aby:

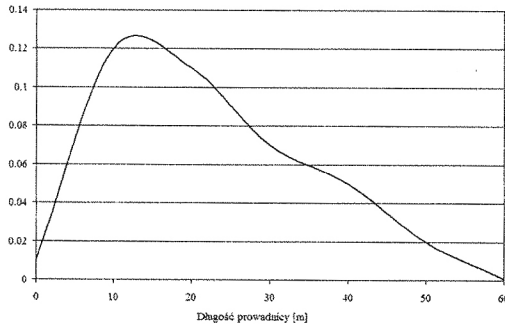
- zminimalizować skutki zderzeń statków z prowadnicami,
- dostatecznie zabezpieczyć filary mostu przed ewentualnymi zderzeniami,
- ułatwić przejście statku pod mostem w szczególnie niekorzystnych warunkach.



Rys. 6. Wyniki 15 przejazdów zestawem dwubarkowym o długości 110 m z pchaczem Bizon

*Fig. 6. Results of 15 passages by two barges pushed by the Bizon tug*

Dla każdej serii symulacyjnej i każdej z prowadnic obliczono prawdopodobieństwa zderzenia statków w funkcji długości prowadnic. Posłużyły one do wskazania położenia miejsc najbardziej eksponowanych na uderzenia od statków. Przykładowe wyniki dla statku „Adler River” przechodzącego południowym przęsłem dla serii symulacyjnej nr 6 przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Prawdopodobieństwo zderzenia ze środkową prowadnicą statku „Adler River”  
(0 – południowy kraniec prowadnicy)

*Fig. 7. Probability of collision with the middle guide fender of the Adler River ship  
(0 – southern end of the middle guide fender)*



Rys. 8. Lokalizacja kamery na Moście Długim

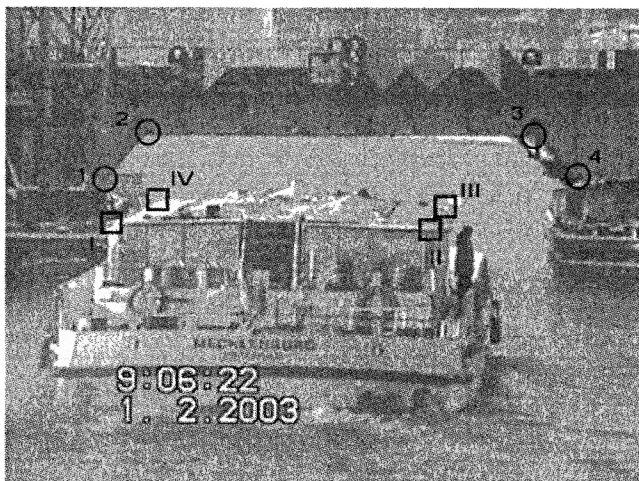
*Fig. 8. Location of the video camera on Most Długi*

## Badania fotogrametryczne

Badania zostały przeprowadzone za pomocą cyfrowej kamery amatorskiej typu Panasonic NV-DS11 MiniDV, posiadającej 1/4 calową matrycę CCD o 0,57 mln punktów. Obiektyw kamery ma możliwość powiększenia 20:1

i długość ogniskową od 3,8 mm do 76 mm. Jak pokazują inne badania, kamera taka nadaje się do podobnych zastosowań [1].

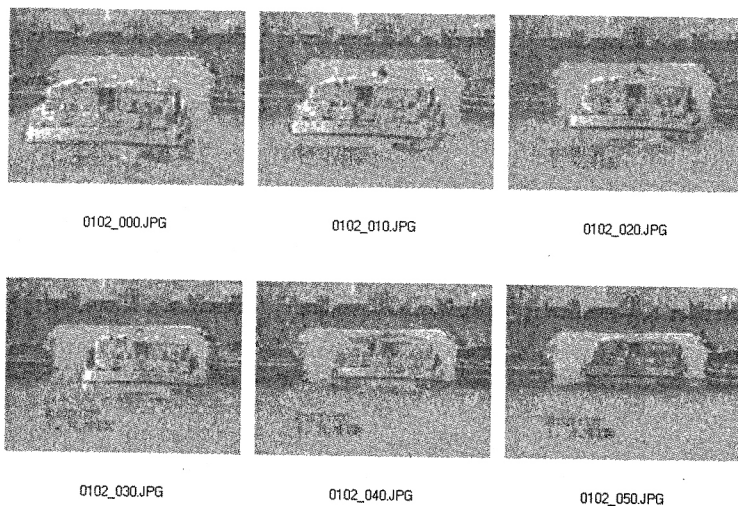
Kamera została ulokowana na Moście Długim (rys. 8). Umieszczenie stanowiska kamery na moście Kolejowym nie było możliwe z uwagi na ruch pociągów. Kamera została zorientowana przed każdymi badaniami w taki sposób, aby jej oś pokrywała się z osią prowadnic. Do precyzyjnego określenia orientacji zewnętrznej kamery w stosunku do mostu wykorzystano 4 punkty kontrolne położone na moście Kolejowym (rys. 9) [3]. Wartość powiększenia kamery ustawiono na 15x. Zdjęcia z kamery przechwytywano z rozdzielczością 1024 x 768 co 1 sekundę.



Rys. 9. Lokalizacja punktów kontrolnych (1, 2, 3, 4) i punktów obiektu (I, II, III, IV)  
 Fig. 9. Location of control points (1, 2, 3, 4) and the points of the object (I, II, III, IV)

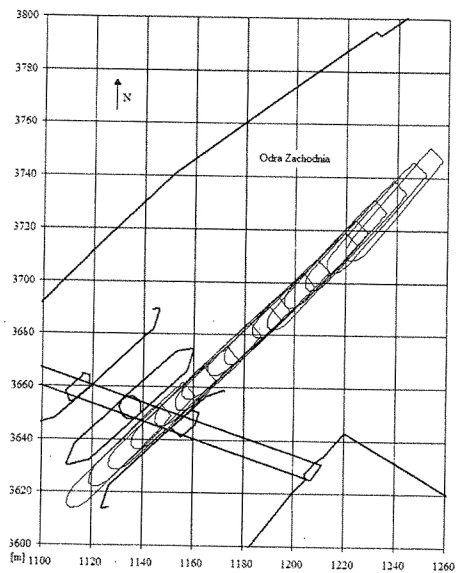
Przedmiotem badań były statki typu „Adler River” i „Mecklenburg” o parametrach:  $L = 53$  m,  $B = 8,08$  m,  $T = 1,26$  m.

Do określenia położenia punktów obiektu zastosowano metodę wykorzystującą znajomość wysokości statku. Wysokości charakterystycznych punktów statku poprawiono o odczytane wartości stanu wody. Należy zauważyć, że błąd metody jest zależny od różnicy wysokości pomiędzy kamerą a obiektem. Błąd pomiaru pozycji statku jest mniejszy w kierunku poprzecznym do osi kamery niż w kierunku wzdłużnym. Jego wartości oszacowano odpowiednio na 0,5 m i 0,1 m. Na rysunku 10 przedstawiono sekwencję zdjęć z przejścia badanego statku pod mostem Kolejowym.



Rys. 10. Sekwencja przechwyconych zdjęć z kamery podczas przejścia statku „Mecklenburg” pod mostem Kolejowym

*Fig. 10. Sequence of photos captured by the video camera during a passage of the ship Mecklenburg under Kolejowy Bridge*



Rys. 11. Rekonstrukcja fotogrametryczna przejścia pod mostem statku Adler

*Fig. 11. Photogrammetric reconstruction of the Adler's passage under the bridge*

Przykładową rekonstrukcję przejścia za pomocą metody fotogrametrycznej przedstawiono na rys.11. W dalszym kroku, postępując identycznie jak w metodach symulacyjnych, można otrzymać rozkłady położenia statku w stosunku do akwenu. Aby tego dokonać należy dysponować odpowiednio liczną próbą w jednakowych warunkach hydrometeorologicznych.

Metoda fotogrametryczna posłużyła głównie do weryfikacji metod symulacyjnych pod kątem taktyki manewrowania. Za jej pomocą określono również miejsca najczęstszego zderzenia się statku z prowadnicami oraz miejsca, gdzie prawdopodobieństwo zderzenia było największe (rys. 11).

## Skutki uderzenia statku w podpory mostu

Siłę uderzenia statku w prowadnice obliczono za pomocą metody JCSS [4]. Metoda zakłada, że statek podczas zderzenia jest traktowany jako elastyczny jednowymiarowy system ze współczynnikiem sztywności  $k$  i masą  $m$ . Maksymalna możliwa siła wzdłużna ( $F_x$ ) i poprzeczna ( $F_y$ ) zderzenia może być określona jako (rys.12):

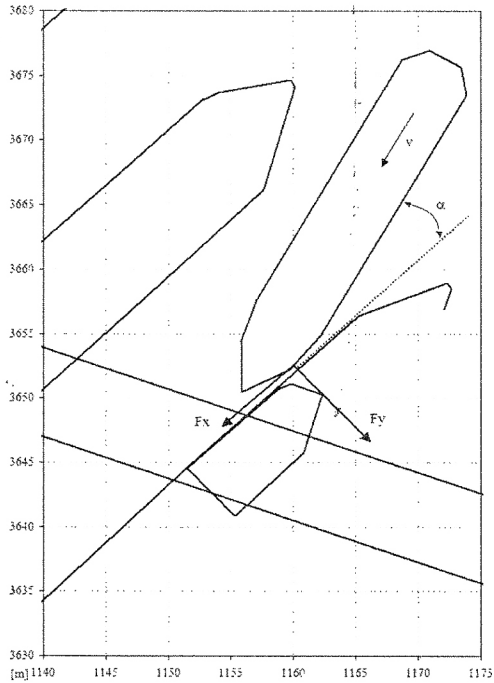
$$\begin{aligned} F_x &= \mu F_y \\ F_y &= \sin \alpha v \sqrt{km} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

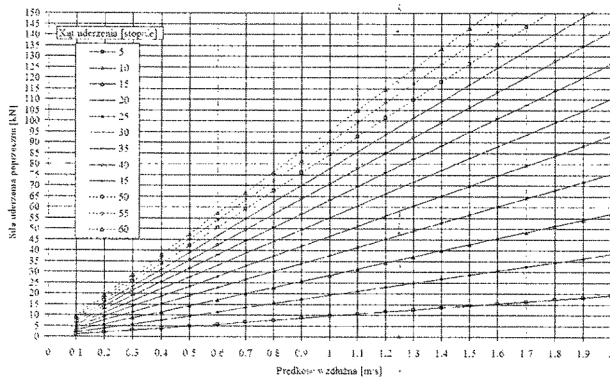
- $v$  – prędkość zderzenia statku [m/s],
- $k$  – współczynnik sztywności [MN/m],
- $m$  – masa [ton],
- $\mu$  – współczynnik tarcia kadłub – obiekt,
- $\alpha$  – kąt zderzenia.

Do obliczeń przyjęto: współczynnik sztywności statku  $k = 9$  MN/m, współczynnik tarcia  $f = 0,3$ .

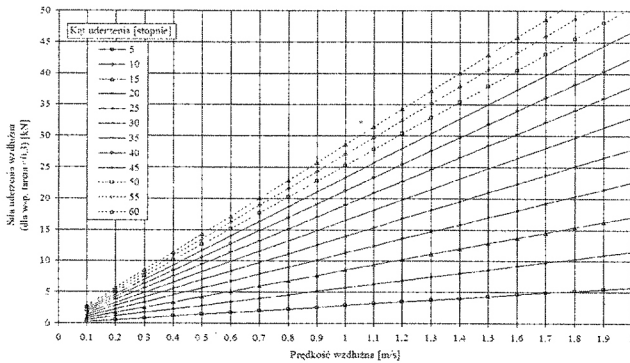
Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono zależności wartości sił dla załadowanego zestawu typu Bizon i 2 barek BP500 dla różnych prędkości i kątów podejścia. Należy zauważyć, że prędkości takich jednostek podczas przejścia wahają się od 1 do 2m/s. Na podstawie takich wykresów i znajomości obciążeń, jakie może przyjąć system prowadnice-podpora mostu można obliczyć maksymalny kąt, z jakim statek może uderzyć w prowadnicę na wysokości podpory oraz zaprojektować odpowiednio długość prowadnic, aby wartość takiego kąta była zachowana podczas wszystkich warunków eksploatacyjnych.



Rys. 12. Siła wzdłużna i poprzeczna zderzenia statku z prowadnicami mostu  
 Fig. 12. Longitudinal and transverse load during ships impact with guide fenders



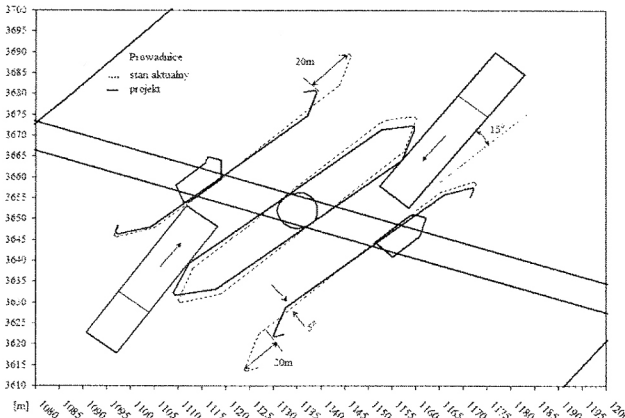
Rys. 13. Siła poprzeczna na prowadnicach mostu w zależności od prędkości statku kąta uderzenia  
 Fig. 13. Transverse force on the bridge guide fender dependent on ship's speed and the angle of impact



Rys. 14. Siła wzdłużna na prowadnicach mostu w zależności od prędkości statku i kąta uderzenia  
 Fig. 14. Longitudinal force on the bridge guide fender dependent on ship's speed and the angle of impact

### Optymalny układ prowadnic

Głównym celem omawianych badań było ustalenie optymalnego układu prowadnic z minimalizacją możliwości uszkodzenia podpór mostu w wyniku zderzenia ze statkami z zastosowaniem probabilistycznej metody kompleksowej opartej na symulacji komputerowej i badaniach rzeczywistych. Analiza wyników badań wskazuje na celowość skrócenia obecnych prowadnic o 20 m w stosunku do istniejącego rozwiązania oraz powrót do ruchu prawostronnego (rys. 15). Układ taki powinien zapewnić, że kąt uderzenia charakterystycznego statku w podpory będzie zawsze mniejszy od 15°.



Rys. 15. Sugerowane zmiany w układzie prowadnic  
 Fig. 15. Recommended changes in the guide fender layout



## Wnioski

Przedstawiona metoda składa się z kombinacji dwóch metod eksperymentu rzeczywistego i modelowego (metody symulacyjnej). Wyznaczone w wyniku symulacji prawdopodobieństwa awarii wykorzystano do wskazania miejsc najbardziej narażonych na zderzenia. Metodę rzeczywistą fotogrametrii bliskiego zasięgu zastosowano do weryfikacji wyników metody symulacyjnej oraz wskazania taktyki manewrowej stosowanej przez kapitanów jednostek w rzeczywistości. Metoda wykazała dużą użyteczność do oceny poziomu bezpieczeństwa mostów wyposażonych w prowadnice i może być stosowana w praktyce.

## Literatura

1. D'Apuzzo N., Maas H., G. (1999), *On the suitability of digital camcorders for virtual reality image data capture*. Videometrics VI, Symposium on Electronic Imaging, San Jose, USA.
2. Gucma L. (2003), *Combination of Photogrammetric and Simulation Method for Safety Evaluation of Ships Passage through the Bridges*. Proc. of the XI Int. Congress IAIN–International Association of Institutes of Navigation, Berlin.
3. Quan L., Lan Z. (1999), *Linear N-Point Camera Pose Determination*. IEEE Transaction on PAMI, vol. 21.
4. JCSS (2001), *Probabilistic Model Code*. Joint Committee on Structural Safety (JCSS), Number 99-CON-DYN/M0098.

*Wpłynęło do redakcji w grudniu 2005 r.*

## Recenzent

prof. dr hab. inż. Mieczysław Hann

## Adres Autora

dr inż. Lucjan Gucma  
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego  
Akademia Morska w Szczecinie  
ul. Wały Chrobrego 1/2  
70-500 Szczecin  
e-mail: lucek@am.szczecin.pl

