

# Łukowa kładka dla pieszych przez Wartę we Wronkach Zmiana konstrukcji w wyniku analiz dynamicznych

Dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. nadzw. PG, mgr inż. Mikołaj Binczyk  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

W XXI wieku rozwój infrastruktury komunikacyjnej na świecie oraz coraz gęstsza zabudowa w dużych miastach powodują konieczność budowy dużej liczby obiektów inżynierskich dla pieszych. Ich wizerunek często zmienia otoczenie, a same kładki dla pieszych stają się dziełem współczesnej architektury. Wszystkie te aspekty powodują, że projektanci szukają nowych rozwiązań geometrycznych oraz materiałowych podczas projektowania kładek dla pieszych. Nowe konstrukcje bez problemu spełniają normowe wymagania warunków wytrzymałościowych i użytkowych pod działaniem obciążenia statycznego. Niestety, często mają one zmniejszoną sztywność przestrzenną. Wynika to z lepszego niż wcześniej wykorzystania właściwości wytrzymałościowych, stosowania smuklejszych przekrojów poszczególnych elementów konstrukcji oraz nowych lekkich i wytrzymałych materiałów. Dodatkowo poszukiwanie ciekawych, nie zawsze inżyniersko uzasadnionych form architektonicznych sprawia, że konstrukcje kładek dla pieszych stają się wyzwaniem. Celem staje się pogodzenie często nieracjonalnej mechanicznie struktury z warunkami użytkowymi. Problemem w projektowaniu takich struktur jest charakter obciążenia użytkowego. Piesi oddziałują na pomost w czasie marszu i biegu. Na pomostach występują również obciążenia celowe przez podskoki lub przysiady. Analizy projektowanych kładek nie mogą być zatem upraszczane do obciążenia statycznego o wartości normowej. Należy uwzględnić dynamiczne (zmiennie w czasie) obciążenia wywoływane podczas różnej aktywności pieszych [1, 3, 5, 6].

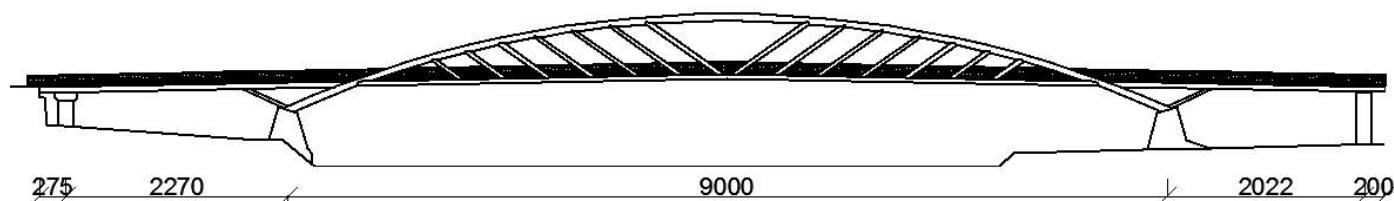
Specyficzne obciążenia oraz mała sztywność przestrzeni na kładki dla pieszych powodują, że konstrukcje te są wrażliwe dynamicznie. Oznacza to, że nawet stosunkowo niewielka

grupa ludzi może spowodować drgania niebezpieczne lub co najmniej nieprzyjemne dla reszty użytkowników. Zjawisko takie może nastąpić, gdy częstotliwość oddziaływania pieszych będzie zbliżona do częstotliwości drgań własnych konstrukcji. Zakresy częstotliwości stąpania przy normalnym chodzie [1] określono przy częstości oddziaływań pionowych w granicach  $1,7 \div 2,2$  [Hz], natomiast przy częstości oddziaływań poziomych w granicach  $0,6 \div 1,3$  [Hz]. Należy zatem projektować tak, aby unikać tych zakresów częstotliwości w drganiach własnych przęseł. Tak sformułowany warunek dotyczy normalnej eksploatacji i na ogół jest niewystarczający, gdy w grę wchodzi celowe wymuszenie (np. w tańcu lub przez wandalów). W praktyce trudno jest pogodzić idee architektoniczne z mechaniką. Z tego powodu często jest konieczna analiza odpowiedzi konstrukcji na dynamiczne oddziaływanie pieszych.

## OPIS WERSJI PIERWOTNEJ KONSTRUKCJI

Nowoprojektowana kładka dla pieszych przez rzekę Wartę we Wronkach (woj. wielkopolskie) połączy północną część miasta z historycznym centrum [4]. Lokalizacja kładki w wybranym miejscu poprawi komfort i bezpieczeństwo pieszych mieszkańców, którzy muszą korzystać z mostu drogowego w ciągu drogi wojewódzkiej.

Cała przeprawa składa się z dwóch części: nurtowej i zalewowej. Na ich połączeniu zaplanowano wykonanie tarasu widokowego stanowiącego miejsce odpoczynku i obserwacji starówki miasta. Konstrukcja kładki (według [4]) w części nurtowej skła-



Rys. 1. Widok z boku na kładkę – wersja pierwotna projektu

da się z trzech przęseł o rozpiętościach: 22,70 + 90,00 + 20,22 m (rys. 1). Główne przęsło zaprojektowano jako łukowe o jednym dźwigarze stalowym. Łuk z rur  $\phi$  711/16 ze stali S355J2H jest odchylony od pionu o  $12^\circ$  w kierunku górnej wody i oparty na masywnych żelbetowych podporach. Przekrój poprzeczny przęsła łukowego pokazano na rys. 2. Łuk wznosi się 15,50 m ponad średni poziom wody w Warcie, a jego strzałka teoretyczna wynosi 9,40 m, zaś wyniosłość ponad pomost 6,05 m. Pomost skrzynkowy o szerokości użytkowej 3,00 m połączono z łukiem poziomym wykonanym z rury  $\phi$  508/16. Podwieszenie pomostu zaprojektowano z ukośnych belek z 14 rur stalowych  $\phi$  508/16.

Tak zaprojektowana konstrukcja cechowała się niekorzystnymi własnościami dynamicznymi. Po rozwiązaniu problemu własnego otrzymano postacie drgań własnych oraz odpowiadające im częstotliwości drgań (rys. 3). Przedstawione częstotliwości drgań własnych odpowiadają częstotliwości obciążenia generowanego przez ruch pieszych i tym samym mogą spowodować poważne utrudnienia w użytkowaniu obiektu. Mając w pamięci doświadczenia z innych mostów [2], postanowiono, na zlecenie wykonawcy przeprawy (firma EUROVIA/Polska), przeanalizować konstrukcję pod kątem ewentualnych zmian strukturalnych redukujących ryzyko niekontrolowanego wzbudzenia dynamicznego przęseł [7].

## WPROWADZONE ZMIANY W KONSTRUKCJI OBIEKTU

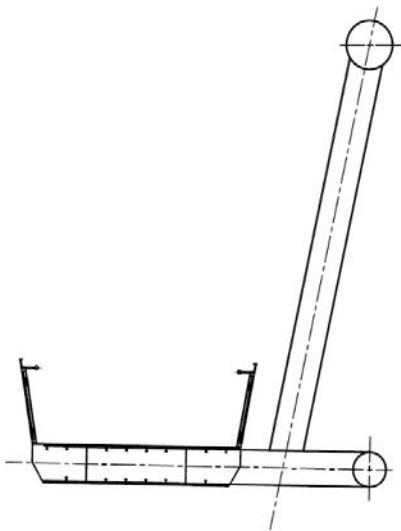
Przed przystąpieniem do projektowania przyjęto następujące założenia:

Konstrukcja będzie w swojej formie architektonicznej zbliżona do pierwotnego zamysłu. W szczególności będą utrzymane następujące cechy:

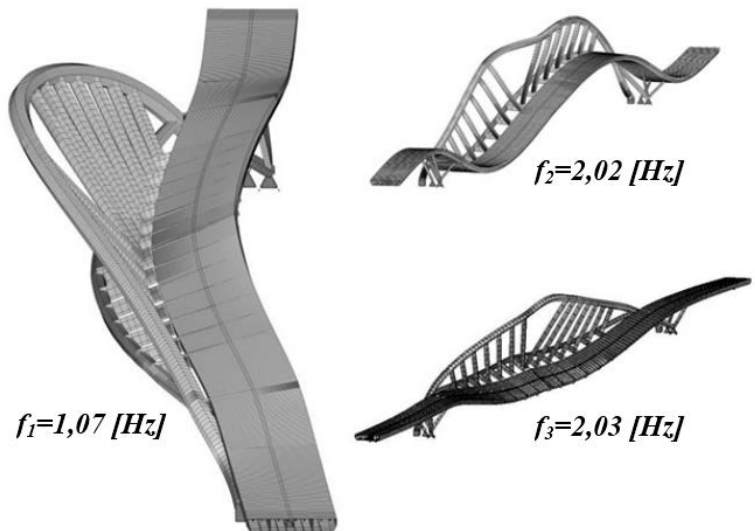
- liczba przęseł oraz ich rozpiętość w części nurtowej kładki,
- geometria głównego łuku (strzałka i wychylenie),
- szerokość użyteczna pomostu,
- układ i pochylenie czternastu wieszaków podwieszających pomost do łuku.

W wyniku studiów nad innymi zrealizowanymi obiektami i analiz własnych ostatecznie wprowadzono następujące modyfikacje projektu:

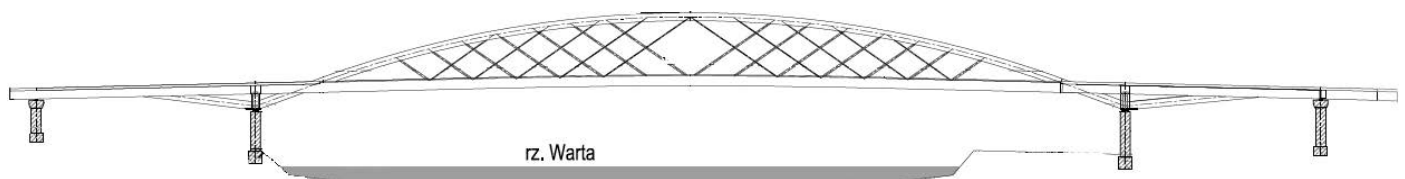
- skrzynka stalowa jest podwieszona do łuku za pomocą wieszaków o geometrii jak w projekcie pierwotnym oraz dodatkowych wieszaków ciągnowych (rys. 4),
- ortotropową płytę pomostu oparto na wspornikowych poprzecznicach, które są utwierdzone w stalowej skrzynce umiejscowionej niesymetrycznie po stronie łuku (rys. 5),
- zrezygnowano z łuku poziomego,
- zmieniono schemat statyczny, z łuku rozporowego na łuk przegubowy swobodnie podparty ze ściągiem w postaci skrzynki stalowej,
- przęsła skrajne zaprojektowano jako zespolone, stalowe z żelbetową płytą pomostu,
- taras widokowy kładki postanowiono wykonać jako poszerzoną część skrajnego przęsła części nurtowej kładki,
- zmieniono pochylenie zastrzałów łuku.



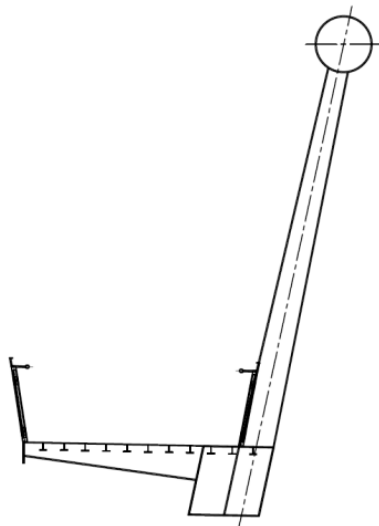
Rys. 2. Przekrój poprzeczny przez przęsło łukowe – wersja pierwotna projektu



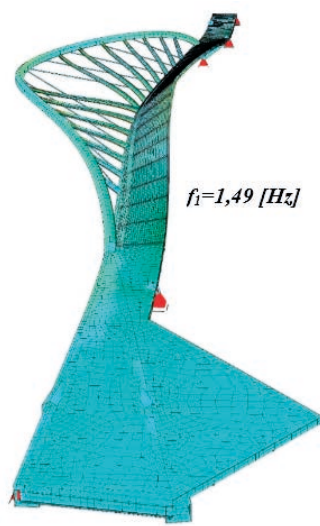
Rys. 3. Pierwsze trzy postaci drgań własnych wraz z odpowiadającymi częstotliwościami drgań – wersja pierwotna projektu



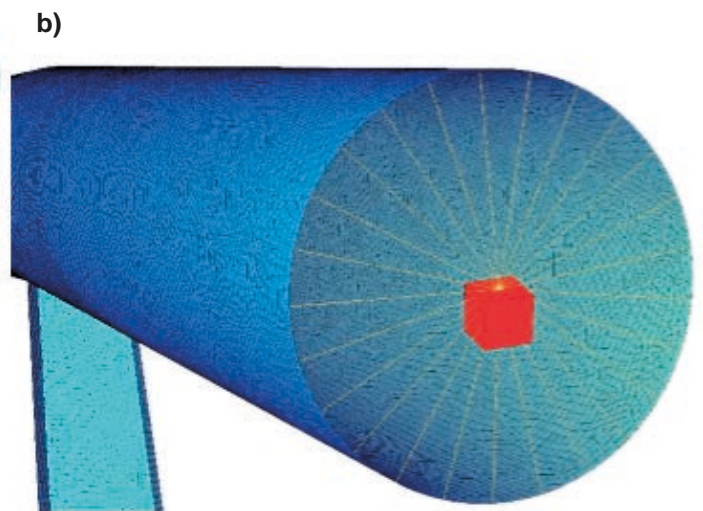
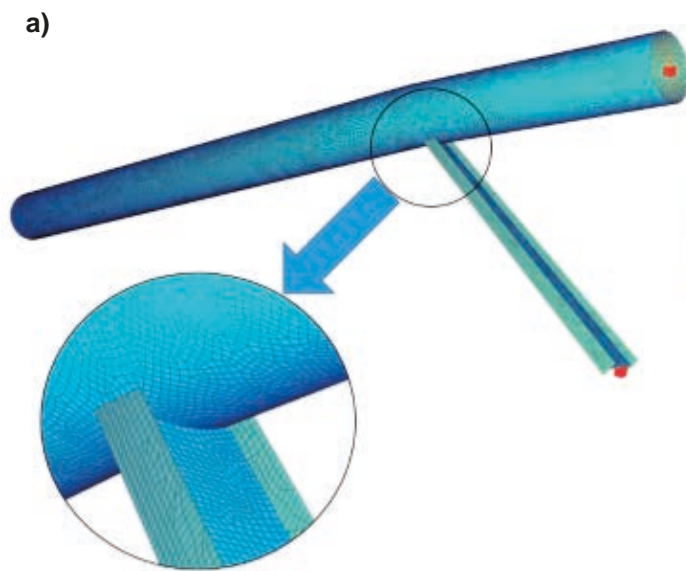
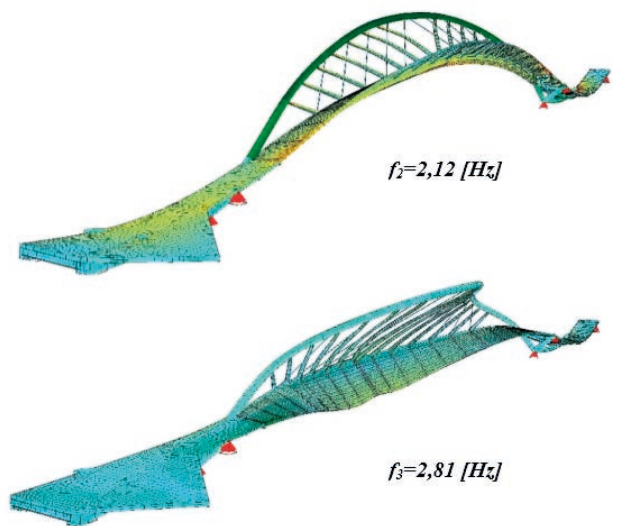
Rys. 4. Widok z boku na kładkę – wersja zmodyfikowana projektu



Rys. 5. Przekrój poprzeczny przez przęsło łukowe – wersja zmodyfikowana projektu



Rys. 6. Pierwsze trzy postaci drgań własnych wraz z odpowiadającymi częstotliwościami drgań – wersja zmodyfikowana projektu

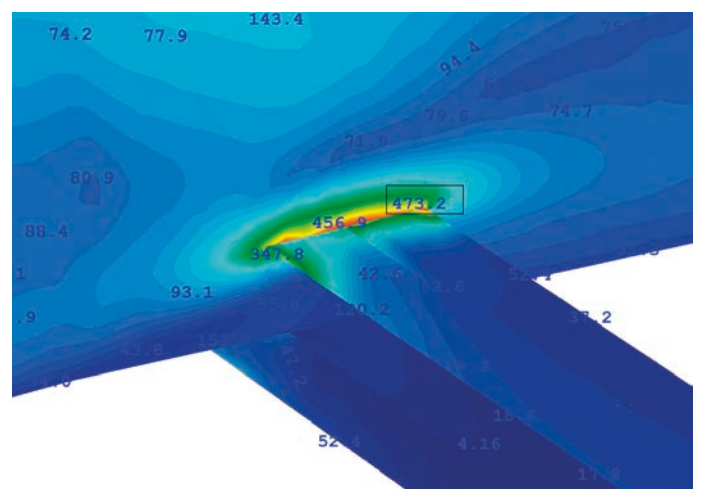


Rys. 7. Wizualizacja modelu obliczeniowego (W14) wersja pierwotna  
a) widok ogólny i szczegółowy modelu, b) sztywne elementy belkowe łączące krawędzie elementów powłokowych z punktem brzegowym

Zaproponowane zmiany struktury i geometrii pozwoliły na uzyskanie wyższych wartości częstotliwości drgań własnych kładki (rys. 6) i tym samym zminimalizowano potencjalne efekty dynamiczne.

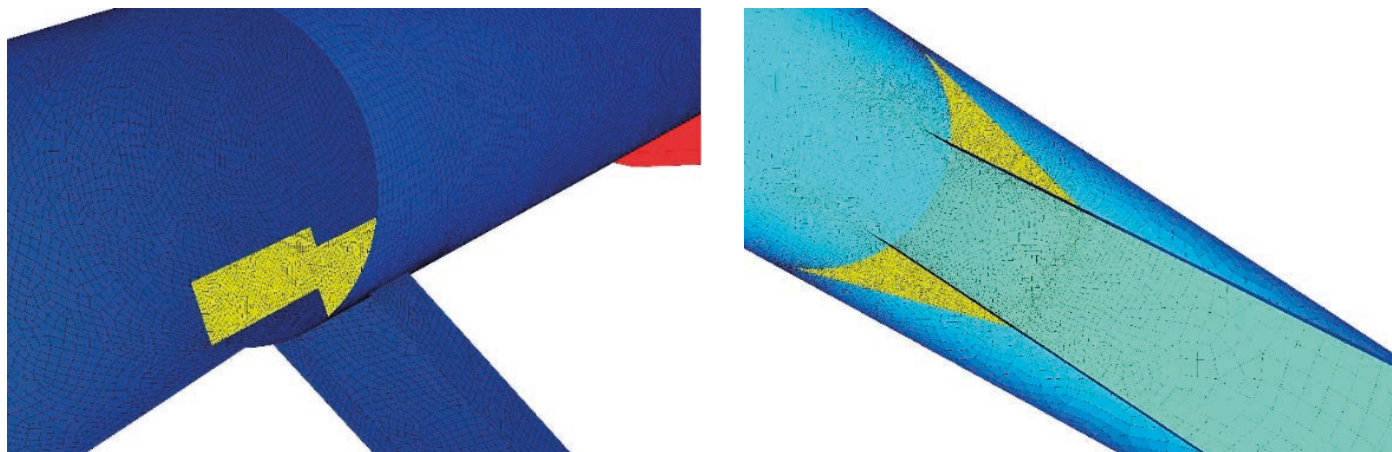
### ANALIZA KONSTRUKCJI POŁĄCZENIA WIESZAKA Z ŁUKIEM

Połączenie sztywnego wieszaka z rurą łuku sprawia obiektywne trudności w wykonaniu wewnętrznego wzmocnienia obejmującego lokalne efekty działania dwuteownika na płaszczyźnie rury. Chęć zminimalizowania wzmocnień wewnątrz stała się powodem do poszukiwań rozwiązań konstrukcyjnych przy wykorzystaniu powłokowego modelu MES. Do analizy wytypowano wieszak najbardziej wyężony. Stworzono model wycinkowy o warunkach brzegowych umożliwiających wprowadzenie

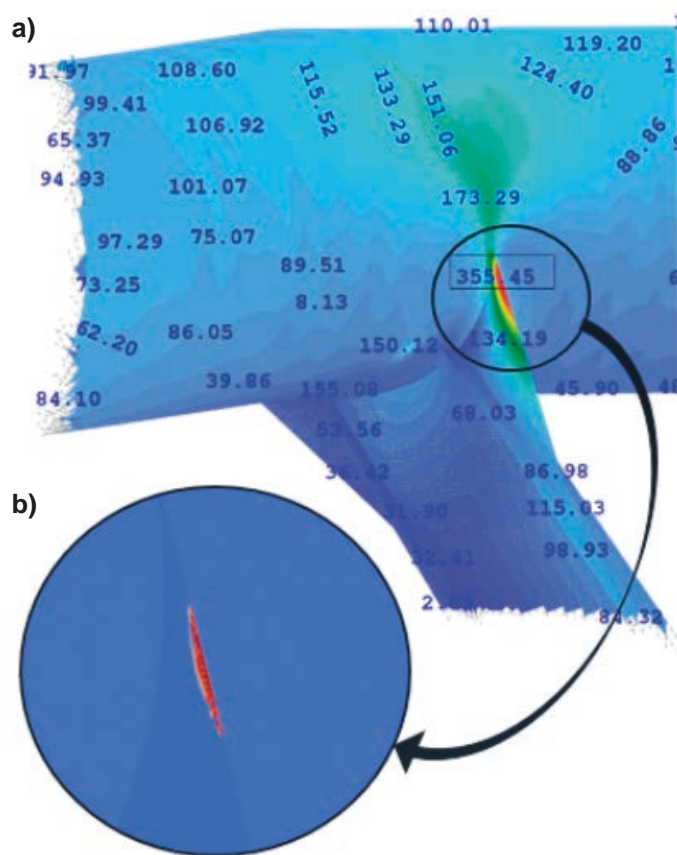


Rys. 8. Ekstremalne naprężenia według HMM [MPa] połączenia wieszaka W14 z łukiem – wersja pierwotna, analiza liniowa





Rys. 9. Wizualizacja zmodyfikowanego szczegółu połączenia wieszaka W14 z łukiem



Rys. 10. Wyniki analizy nieliniowej W14

- a) naprężenie według HMM na dolnych powierzchniach elementów [MPa],  
 b) strefa uplastycznienia w jednej z blach węzłowych

uogólnionych przemieszczeń otrzymanych z modelu prętowego całego przęsła. Model MES (rys. 7) połączenia wieszaka nr 14 z łukiem składał się z elementów powłokowych oraz belkowych. Wyniki analizy potwierdziły, że połączenie wieszaka z łukiem bez dodatkowego wzmocnienia skutkuje przekroczeniem dopuszczalnych naprężeń stali S355J2H (rys. 8). Niestety nie udało się wyeliminować wzmocnień wewnątrz rury. Zaproponowano wzmocnienie węzła blachami wewnątrz łuku na przedłużeniu pasów wieszaka oraz blachami zewnętrznymi na przedłużeniu średnika wieszaka (rys. 9).

Wykonano analizę nieliniową geometrycznie i materiałowo wzmocnionego węzła. Do zastosowanej stali przyjęto materiał sprężysto – plastyczny ze wzmocnieniem ( $R = 355,0$  [MPa]). Wyniki przeprowadzonej analizy nieliniowej pozwalają na określenie zbliżonego do rzeczywistości rozkładu naprężenia w analizowanym połączeniu (rys. 10). Pomimo wystąpienia lokalnie strefy plastycznej, uznano połączenie jako prawidłowe.

## PODSUMOWANIE

Zaproponowane zmiany strukturalne w konstrukcji kładki istotnie redukują problemy rozpoznane w wersji pierwotnej projektu, jednocześnie zachowując przy tym architektoniczny wizerunek oraz główne parametry konstrukcji. Obecnie zakończono prace projektowe i rozpoczęto budowę. Ostatecznym potwierdzeniem prawidłowości przyjętych założeń i obliczeń będzie próbné obciążenie konstrukcji.

## LITERATURA

1. Bachmann H.: Lively footbridges – a real challenge. Footbridge 2002, Design and dynamic behavior of footbridges, Paris, 20-22.11.2002.
2. Dallard P., Fitzpatrick A. J., Flint A., Le Bourva S., Low A., Ridsdill-Smith R. M., Willford M.: The London, Millennium Footbridge. Structural Engineer 79 (22), 2001.
3. Flaga A.: Mosty dla pieszych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2011.
4. Projekt budowlany i wykonawczy Kładki dla pieszych przez rzekę Wartę w ramach inwestycji: „Budowa wielofunkcyjnego ośrodka rekreacyjno-sportowego w gminie Wronki”. Pracownia Projektowa „MOST” s.c. z siedzibą w Wargowie k/Poznania.
5. Stahlbau Kalender 2008: Dynamik, Brucken, Anderungen zu DIN 18800, Feuerverzinken. Ernst & Sohn, Berlin 2007.
6. Żółtowski K.: Pieszy na kładkach: obciążenia i odpowiedź konstrukcji. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007.
7. Żółtowski K., Galewski T.: Projekt koncepcyjny konstrukcji kładki przez rzekę Wartę we Wronkach. Zlecający: Eurovia Polska SA, 2014.