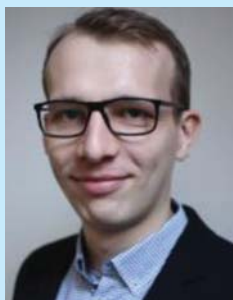


# Wybrane przykłady zrealizowanych przęseł mostów stalowych



KRZYSZTOF ŻÓŁTOWSKI

Politechnika Gdańska  
krzysztof.zoltowski@  
pg.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-5050-0068



MIKOŁAJ BINCZYK

Politechnika Gdańska  
mikolaj.binczyk@pg.edu.pl  
ORCID: 0000-0003-0128-0991



PRZEMYSŁAW  
KALITOWSKI

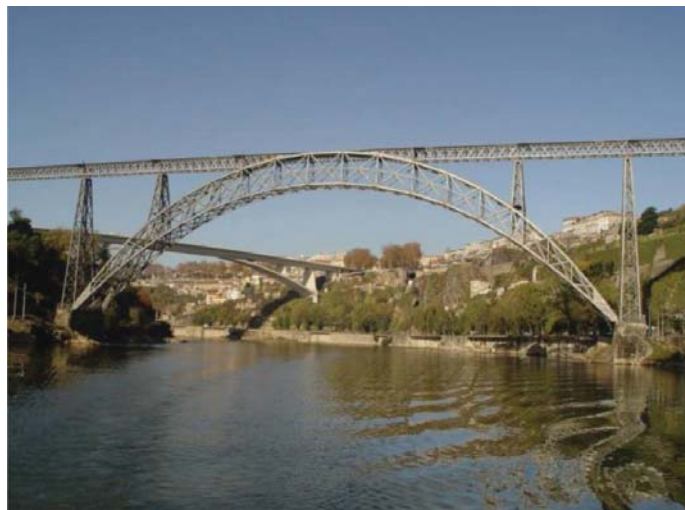
Politechnika Gdańska  
przemyslaw.kalitowski@  
pg.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-2083-1616

## Mosty stalowe w Europie

Początek wielkiego rozwoju mostowych konstrukcji stalowych to połowa XIX wieku. Wtedy to rozwój sieci kolejowej w Europie i Ameryce spowodował gwałtowny postęp w projektowaniu i wytwarzaniu konstrukcji stalowych przęseł mostów. Z uwagi na wysoką cenę stali, już wówczas przykładano dużą wagę do optymalnego wykorzystania materiału. Projektowano głównie ustroje kratownicowe o złożonej strukturze. Podporządkowywano formę i architekturę do wyników analiz teoretycznych i możliwości technicznych. Przykładem dzieła z tamtych czasów może być Most Maria Pia z przęsłem nurtowym w formie łuku kratownicowego o rozpiętości 352 m (rys. 1).

Z czasem uprzemysłowienie procesu produkcji stali, a także czynniki technologiczne i utrzymanie spowodowały, że ograniczono proces optymalizacji materiałowej na korzyść walorów technologicznych i utrzymaniowych. Bezspornie przełomem jakościowym dla konstrukcji stalowych okazała się technologia spawania, która wyparła całkowicie nitowanie.

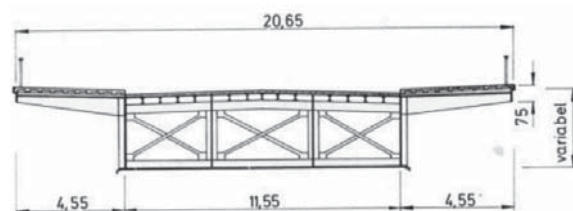
W Europie po drugiej wojnie światowej rozwinięto blachownicowo-



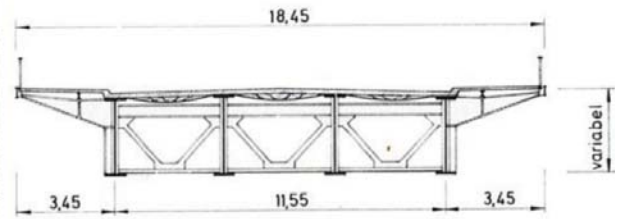
Rys. 1. Most Maria Pia, Portugalia 1877 (wikimedia.org)

we konstrukcje przęseł drogowych o nieosiągalnych wcześniej rozpiętościach. W 1948 roku zbudowano most przez Ren w Kolonii o rekordowych w tym czasie rozpiętościach przęseł 132+184+121 m (rys. 2). W tym samym czasie realizowano podobny most drogowy w Bonn o rozpiętościach 99+196+99 m. Wysokość konstrukcji jest również zmienna i wynosi 11,0 m nad podporą i 3,45 m w środku przęsła nurtowego (rys. 3). W latach sześćdziesiątych XX wieku bito dalsze rekordy. Zoo Bridge przez Ren w Kolonii to całkowicie stalowa konstrukcja z ortotropową płytą jezdni. Osiągnięto tam rozpiętość 259 m w przęśle nurtowym. Widok na most i przekrój poprzeczny pokazano na rysunku 4.

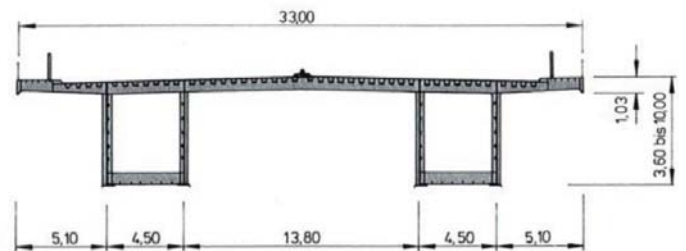
Jednym z pierwszych polskich blachownicowych mostów całkowicie spawanych jest most przez Wisłę w Kieźmarku (1973). Jest to most czterodźwigarowy, z płytą ortotropową



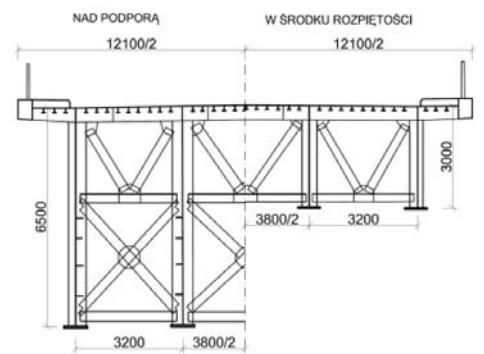
Rys. 2. Most przez Ren w Kolonii, Niemcy (1946–1948) [1]



Rys. 3. Most przez Ren w Bonn, Niemcy (1946–1948) [1]



Rys. 4. Zoo Bridge przez Ren w Kolonii, Niemcy (1962) [1]



Rys. 5. Most przez Wisłę w Kiezmarku. Przekrój poprzeczny i transport wodny (fot. K. Wysiatycki)

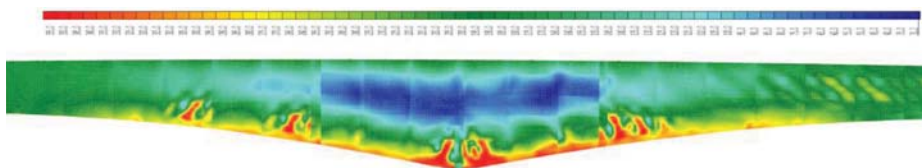
współpracującą o rozpiętościach 91 + 130 + 91 + 52 m. Most zastąpił dzięki nowoczesnej technologii budowy polegającej na wykonaniu całych przęseł w stoczni, transporcie wodnym i spektakularnym montażom. Widok na przekroje poprzeczne i jedną z wielu faz montażu pokazano na rysunku 5.

Most w Kiezmarku projektowano klasycznie bez wykorzystania metod numerycznych, ale 30 lat później podczas

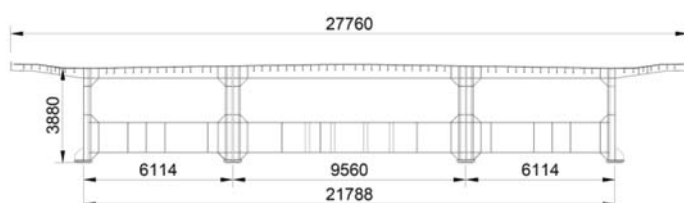
modernizacji wykorzystano nieliniową analizę sprężysto-plastyczną w modelu powłokowym przęsa w celu uwzględnienia wpływu zidentyfikowanych imperfekcji na nośność [2].

Na rysunku 6 pokazano rozkład naprężeń zastępczych HMH z widoczną ich koncentracją w miejscach zmiany grubości pasa. Zauważalne są też „pola ciągnięć” na środnikach uzyskane w nieliniowej analizie nośności.

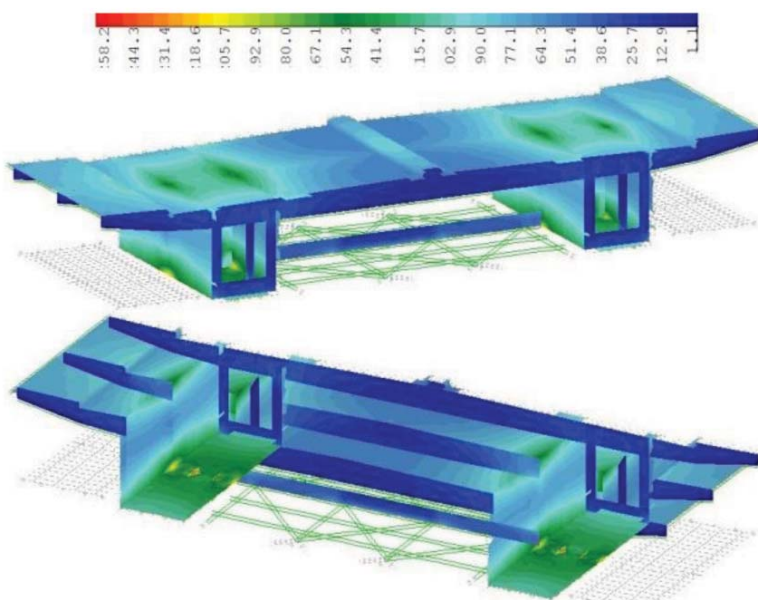
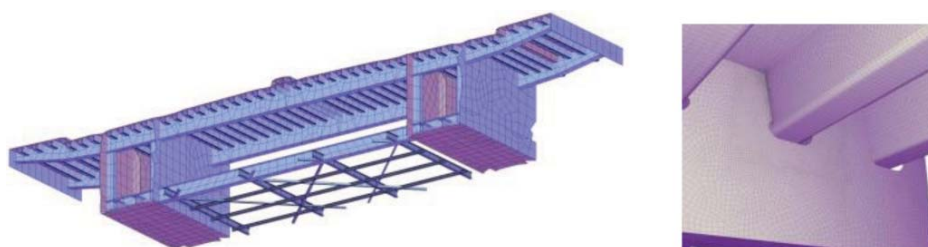
Koniec lat siedemdziesiątych XX wieku to rozwój infrastruktury drogowej w Polsce. Wówczas powstało kilka dużych przepraw drogowych przez Wisłę. Najbardziej znane to Most Łazienkowski (rys. 7) oraz Most Grota Roweckiego w Warszawie. Są to konstrukcje o stałej wysokości z płytą ortotropową jezdni.



Rys. 6. Most przez Wisłę w Kiezmarku. Koncentracje naprężeń. Model MES SOFiSTiK [2]



Rys. 7. Most Łazienkowski w Warszawie (polskieradio.pl, wykop.pl)



Rys. 8. Model numeryczny MES mostu (wybrany fragment), Mapa max. naprężeń zastępczych H-M-H nad podporą nr 11 od obciążeń charakterystycznych

Most Łazienkowski uległ awarii po pożarze w 2015 roku. Nowe przęsła zostały odbudowane podobnie do konstrukcji pierwotnej. Jednak modele obliczeniowe obu wersji znacznie się różniły. Na rysunku 8 pokazano elementy modelu MES przęsła mostu wykonane na potrzeby badań odbiorowych [3].

Opisane powyżej projekty zostały zrealizowane w czasach przedkomputerowych. Wprowadzie w latach 70. XX wieku techniki obliczeniowe były już dobrze rozwinięte, jednak w porównaniu do czasów obecnych ich praktyczny udział w technicznym projektowaniu mostów trzeba uznać za marginalny. Tylko w sytuacjach wyjątkowych analizowano metodami cyfrowymi niektóre aspekty teoretyczne w środowisku naukowym. Można tutaj wyróżnić prace prof. Kazimierza Wysiatyckiego i prof. Henryka Czudka z zespołem.

## Wybrane przykłady polskie po roku 1990

### Most przez Bug w Broku (1995) [4]

Niewątpliwie oryginalnym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest most przez Bug w Broku (rys. 9). Projekt wykonała pracownia Pomost. Przed projektantami postawiono zadanie zminimalizowania ciężaru stali konstrukcyjnej. W wyniku powstała konstrukcja belkowo-kratownicowa ze współpracującą płytą żelbetową jezdni.

### Most przez Wisłę w Wyszogrodzie (1999) [4]

W roku 1999 oddano do użytku most przez Wisłę w Wyszogrodzie (rys. 10). Projekt Transprojektu Warszawa cechował się minimalistycznym podejściem do kształtowania przekroju poprzecznego. Przęsła składają się z dwóch blachownic i współpracującej płyty żelbetowej. Projekt został opracowany z uwzględnieniem optymalizacji nakładów na konstrukcję stalową i technologii montażu.

### Most Północny w Warszawie (2012)

Most przecina Wisłę i przeprowadzi nad nią dwie jednokierunkowe jezdnie ruchu kołowego i dwutorową trasę tramwajową ze ścieżką pieszo rowerową po jednej stronie.

Typową dla przeprawy konstrukcją stanowi dźwigar zespolony (rys. 11, 12) o zmiennej wysokości, obejmujący 10 przęseł, których rozpiętości kolejno z zachodu na wschód wyniosły: 45 m – 65 m – 110 m – 160 m (przęsło nurtowe) – 110 m – 3 × 66,67 m – 60 m – 45 m. Przęsła do-

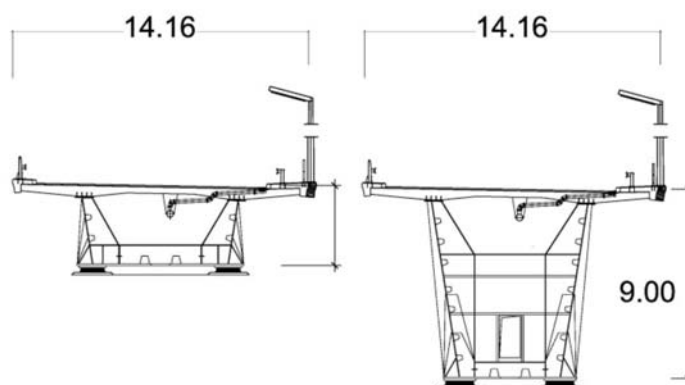
Rys. 9. Most przez Bug w Broku (1995 r.)

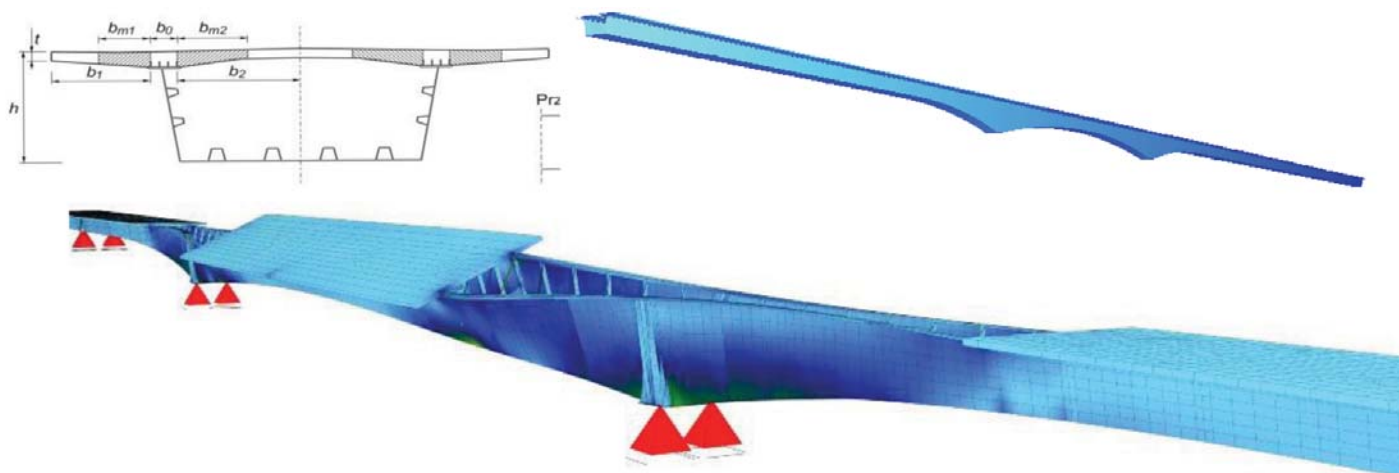


Rys. 10. Most przez Wisłę w Wyszogrodzie 1999. Wykonanie Mostostal Kraków-Dromex (foto mostostalzabrze.pl)



Rys. 11. Most Północny – przęsła nurtowe (fot. Adam Stępień / Agencja Gazeta). Typowe przekroje





Rys. 12. Most Północny. Modele MES wykorzystane w fazach projektowania i budowy

jazdowe zmontowano przy pomocy nasuwki. Przęsto nurtowe podniesiono z pontonów.

Projekt mostu wykonała firma Schuessler-Plan Inżynierzy Sp. z o.o. Przeprawę zrealizowała firma Sando Budownictwo Polska. Wykonanie konstrukcji stalowej i jej montaż przeprowadziła firma Vistal SA.

W fazach projektowania i budowy przeprawy przęsta analizowano modelami belkowymi i powłokowymi (rys. 12).

### Most przez Wisłę w Toruniu (2013)

Trasa nowej przeprawy przebiega na estakadach na pra-

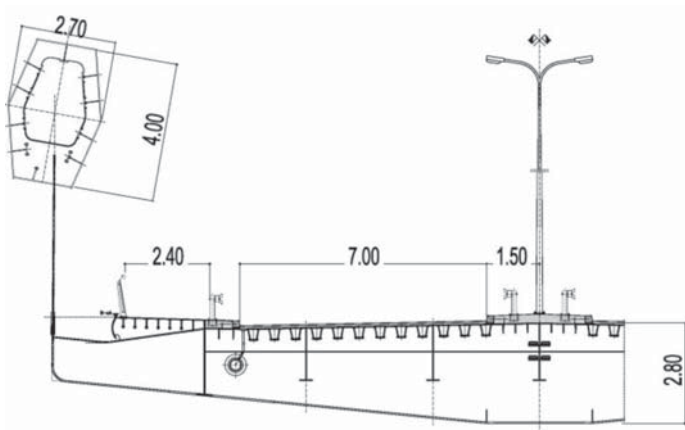
wym brzegu i dalej przechodzi przez główny nurt rzeki Wisły do lewego brzegu rzeki i ponownie na estakadach łączy się z drogą krajową nr 1 w kierunku Łodzi.

Część nurtowa (rys. 13) to konstrukcja całkowicie stalowa, składająca się z dwóch przęseł łukowych o rozpiętościach 270 m każde. Most w Toruniu jest obecnie największym obiektem w Polsce w kategorii mostów łukowych.

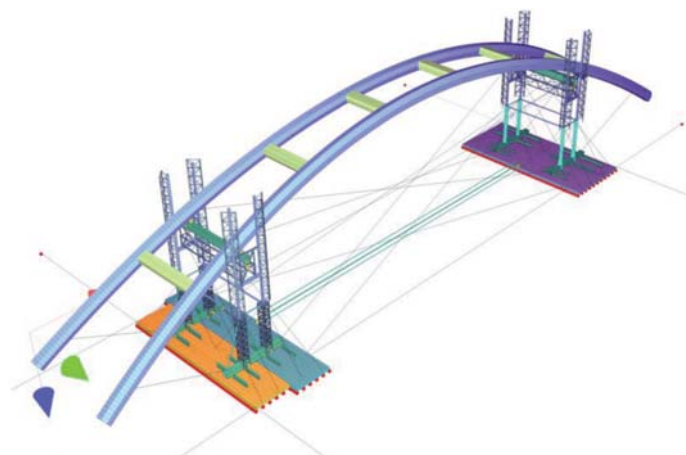
Pochylone do osi podłużnej łuki o konstrukcji stalowej, skrzynkowej oparto na żelbetowych węzłach stojących na masywnych podporach posadowionych na palach. Łuki zaprojektowano bez ściągów i w konsekwencji praktycznie cały rozpór przenoszą podpory. Do łuków podwieszono



Rys. 13. Przęsta podwieszona mostu przez Wisłę w Toruniu (fot. M. Nasieniewski)



Rys. 14. Przekrój poprzeczny przez przęsto łukowe



Rys. 15. Most w Toruniu. Model MES transportu wodnego

prześia jezdni za pomocą rurowych wieszaków stalowych.

Konstrukcja łuków to stalowe przekroje skrzynkowe o przekroju 6-kątnym. Wyniosłość łuku wynosi 42 m. Podwieszona do łuków jezdni to konstrukcja całkowicie spawana (rys. 14), złożona z rusztu belkowego z ortotropową płytą jezdni. Całkowita szerokość pomosty wynosi 28,0 m. Na budowę zużyto ~9350 ton stali, czyli średnio ~618 kg/m<sup>2</sup> powierzchni jezdni. Projekt konstrukcji mostowych opracowała firma Pont Projekt.

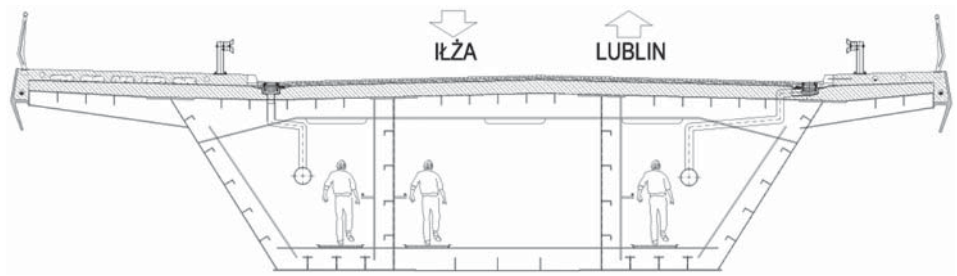
Spektakularnym elementem budowy był transport wodny konstrukcji łuków [5]. Na potrzeby tej operacji został wykonany kompleksowy model MES uwzględniający pływające pontony i konstrukcje pomocnicze (rys. 15). Most zrealizowała firma STRABAG SA.

## Prześia stalowe – przykłady analizy nietypowych rozwiązań

Wszystkie opisane wcześniej mosty należą do grupy rozwiązań tradycyjnych i teoretycznie mogłyby zostać zaprojektowane bez zastosowania współczesnych metod analizy konstrukcji. Nie oznacza to w żadnym razie, że są to obiekty przestarzałe. Wręcz odwrotnie, łączą w sobie wypracowane przez lata zasady z nowoczesną analizą i wykonaniem. Dzisiaj możliwości analizy, połączone z fantazją projektanta, mogą prowadzić do rezultatów, które można uznać za oryginalne rozwiązania autorskie. Należy przy tym pamiętać, że wprowadzenie niestosowanych wcześniej rozwiązań strukturalnych powinno być poprzedzone bardzo wnikliwym studium problemu, ponieważ nowe rozwiązania mogą okazać się błędne lub ekonomicznie nieracjonalne. Zawsze wtedy należy podejść do projektu niestandardowo. Wtedy nieocenionym narzędziem staje się rozbudowany model MES konstrukcji. Poniżej przedstawiono szereg rozwiązań konstrukcyjnych, wymagających niestandardowego podejścia do analiz obliczeniowych.

### Most przez Wisłę w Kamieniu (2015) [6]

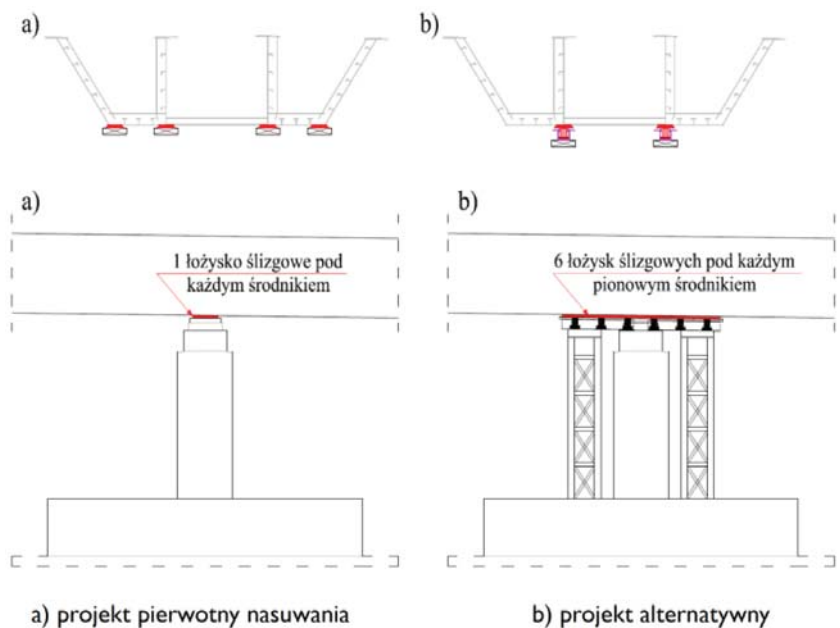
Most przez Wisłę w Kamieniu (woj. lubelskie) to obiekt drogowy o schemacie statycznym belki ciągłej dziesięcioprześłowej (80+8×108+80 m).



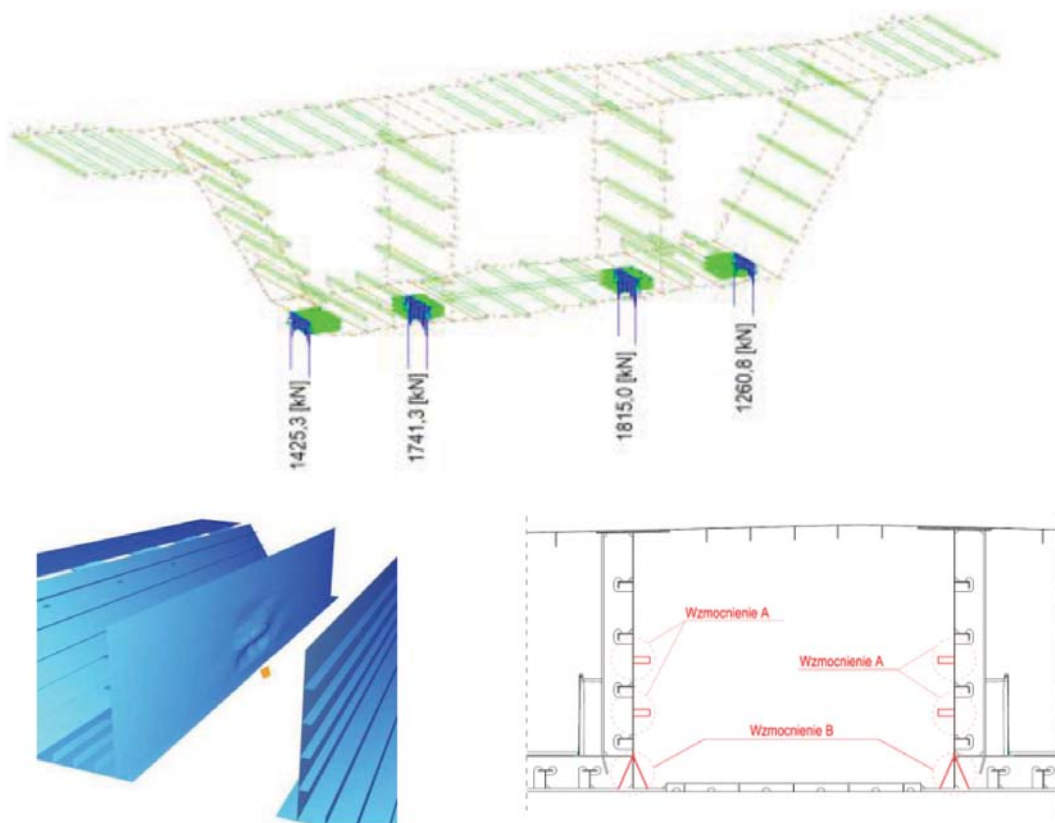
Rys. 16. Typowy przekrój poprzeczny dźwigara skrzynkowego



Rys. 17. Most w Kamieniu,  $L = 80,00 + 8 \times 108,00 + 80,00$  m. Montaż wspornikowy przez nasunięcie podłużne (foto. K. Żółtowski)



Rys. 18. Most w Kamieniu. Schematy podparcia przy nasuwce



Rys. 19. Rozkład obciążenia pod łożyskami – wersja pierwotna. Fragment modelu MES określający nośność teoretyczną przęsła w sąsiedztwie łożyska i schemat wzmocnienia – wersja finalna

Konstrukcję przęseł stanowi stalowa skrzynka trapezowa, trzykomorowa o stałej wysokości 3,75 m (rys. 16). Skrzynka zespolona jest z żelbetową płytą pomostu grubości 0,28 m. Całkowita szerokość pomostu obiektu wynosi 19,94 m. Montaż wykonano przez nasunięcie podłużne (rys. 17) pokonując rozpiętość 108 m przy wzmocnieniu tymczasowym układem wantowym. Most w Kamieniu to niespotykana na co dzień konstrukcja. Zaprojektowano tam stalową płytę ortotropową jezdni zespoloną z płytą betonową. Trójkomorowy przekrój skrzynkowy słabo się broni w kontekście racjonalności zużycia stali. Za to most dobrze się prezentuje i z uwagi na skrzynkowy przekrój nie powinien sprawiać kłopotów administracji drogowej. Projektantem przeprawy jest Halcrow. Most zbudowało konsorcjum firm EnergoPol, Gotowski.

Nietypowe rozwiązanie konstrukcyjne, połączone z odważną technologią montażu spowodowało konieczność zatrzymania budowy, wykonanie szeregu naukowych analiz oraz w konsekwencji przeprojektowanie elementów konstrukcji i technologii nasuwania. Główne odstępstwa od tradycyjnych rozwiązań to:

- mimośrodowe podparcie montażowe na środnikach (rys. 18a),
- podparcie konstrukcji w czterech punktach w przekroju bez uwzględnienia różnic w podatności i imperfekcji,
- przesuwanie konstrukcji na podporach stałych bez uwzględnienia strzałek montażowych,
- zbagatelizowanie sił tnących w analizie faz nasuwki.

W konsekwencji złożonych analiz statycznych układu globalnego (model belkowy) i zagadnień lokalnych (model

powłokowy) przeprojektowano technologię nasuwki, wprowadzono niewielkie wzmocnienia konstrukcji i wykonano z sukcesem operację montażu przęseł (rys. 25). Analizy MES obnażyły słabości pierwotnej koncepcji montażu. Ostatecznie przyjęte rozwiązania były zgodne z wypracowaną przez lata metodą postępowania (rys. 18 b).

W obliczeniach zastosowano:

- rozwiązanie zagadnienia własnego wybożenia w modelu powłokowym,
- nieliniową analizę stateczności i nośności z uwzględnieniem plastyczności w modelu powłokowym,
- nieliniową analizę kontaktu pomiędzy łożyskiem i konstrukcją przęsła.

Wybrane elementy z modelu MES pokazano na rysunku 19.

### Most przez kanał Pauzeński w ciągu drogi krajowej nr 7 w Ostródzie (2017)

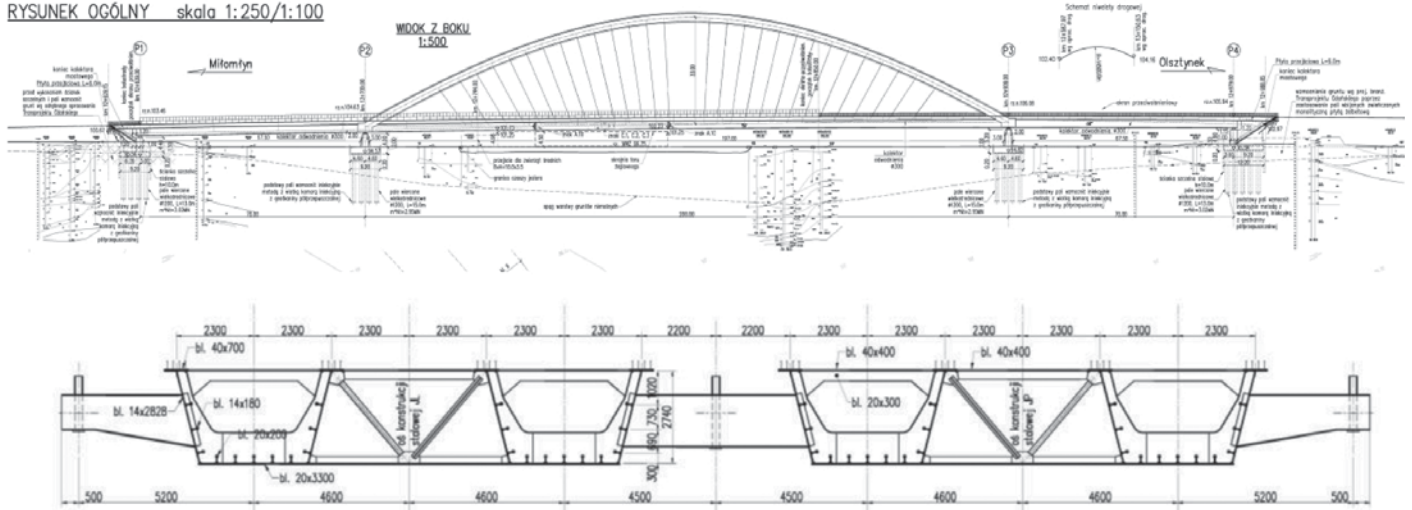
Most został zaprojektowany przez Transprojekt Gdański. Przeprawa składa się z trzech przęseł o rozpiętościach 70 m, 200 m, 70 m (rys. 20).

W projekcie przyjęto nietypowe rozwiązania dotyczące kształtowania konstrukcji stalowej. Obiekt stał się zatem przedmiotem dodatkowych analiz prowadzonych przez Wykonawcę i tematem prac dyplomowych [7]. Na rysunku 20 przedstawiono wycinkowy model powłokowy konstrukcji stalowej i jeden z wyników. Obawy zostały potwierdzone. Detal teoretycznie nie uzyskuje nośności nawet pod obciążeniem charakterystycznym przy pełnym uplastycznieniu. W wyniku działań Wykonawcy obiekt został przeprojektowany. Zmieniono przekrój poprzeczny na otwarty-błachownicowy z kratownicowymi poprzecznikami (rys. 21).

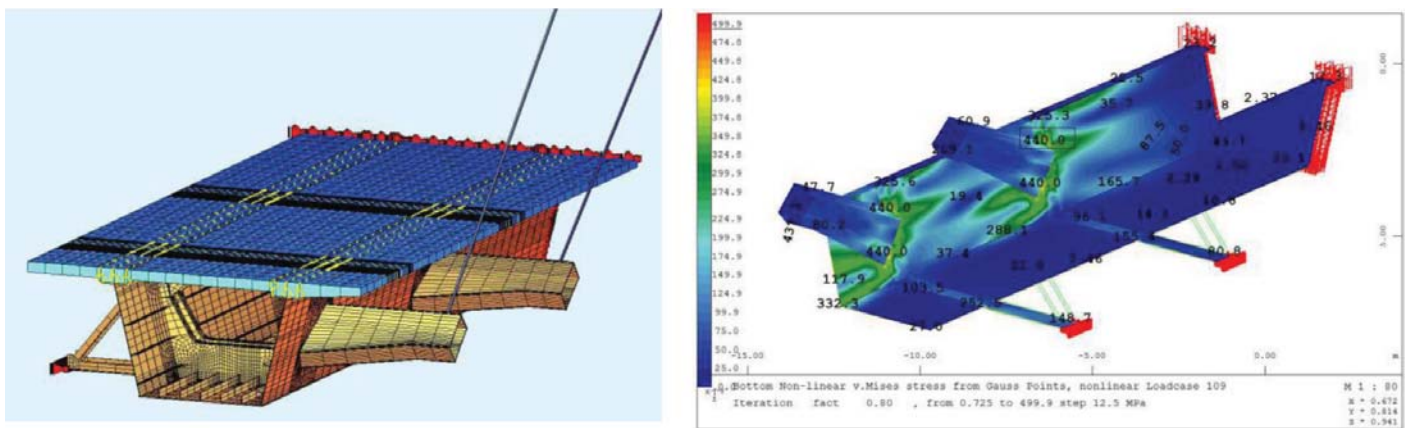
### Zwodzona kładka prze Motławę (2017)

Obiekt został opracowany przez słoweńską firmę PONTI, wylonioną w drodze konkursu architektonicznego. Projekt budowlany i wykonawczy opracowało biuro Mosty Gdańsk. Wykonawcą jest firma Intercor.

Kładka dla pieszych składa się z dwóch części. Część betonowa to przęsło wolnopodparte o rozpiętości 13,4 m. Część zwodzoną kładki stanowi stalowa konstrukcja w formie skrzynkowego dźwigara o zmiennej geometrii oraz pomostu

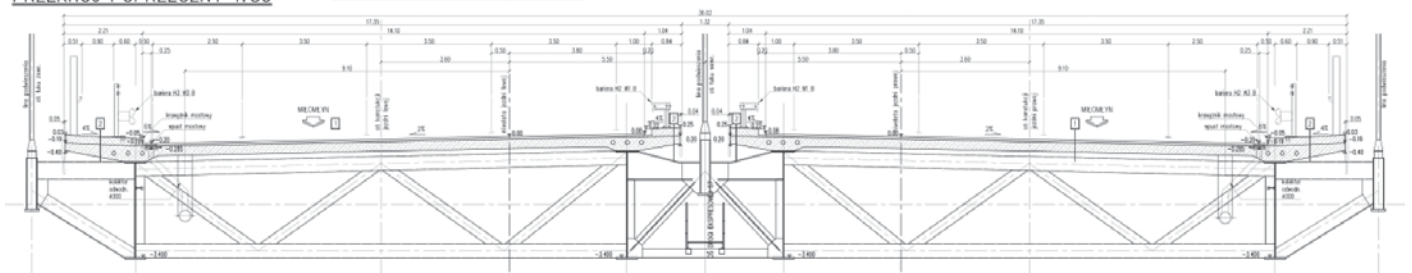


Rys. 20. Most przez kanał Pauzeński – wersja pierwotna, przekazana do realizacji



PRZEKRÓJ POPRZECZNY 1:50

PRZEKRÓJ POPRZECZNY – PRZESŁO ŁUKOWE



Rys. 21. Most przez kanał Pauzeński – Analiza MES detalu. Uzyskano przy pełnym uplastycznieniu 80% obciążenia charakterystycznego [7], poniżej przekrój poprzeczny po zmianach (Budimex, Vistal)

w postaci płyty ortotropowej opartej na wspornikowych poprzecznicach zamocowanych w dźwigarze głównym (rys. 22). Przęsło stalowe zaprojektowano ze stali konstrukcyjnej S460N oraz S355N. Konstrukcja z uwagi na skomplikowany kształt została poddana sprawdzeniu przy pomocy powłokowego modelu MES (rys. 23).

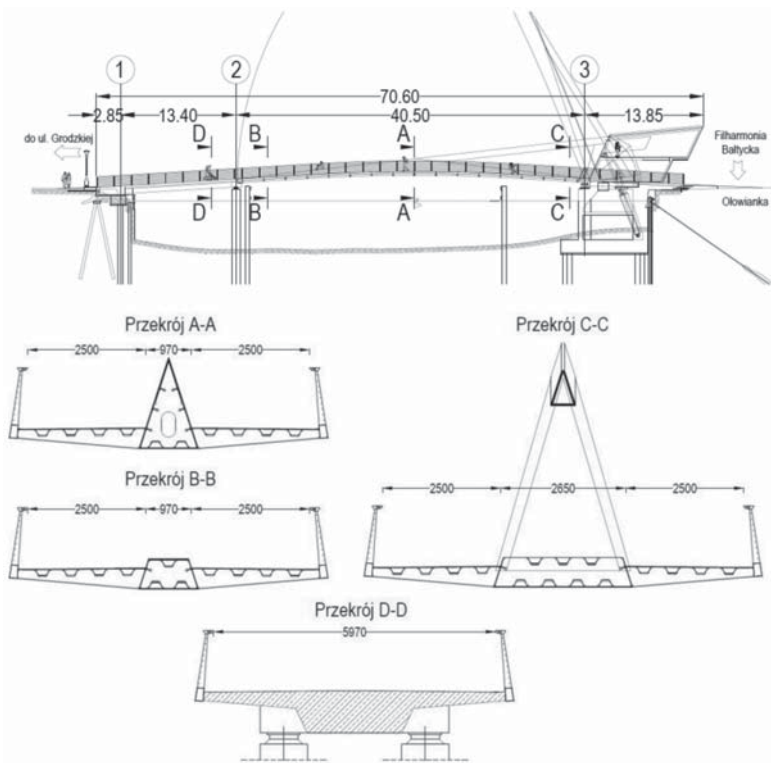
Obliczenia numeryczne MES przestrzennego modelu powłokowego pozwoliły na możliwie obiektywną ocenę wyłączenia konstrukcji i jej odpowiedzi dynamicznej na działania

pieszych. Kładka jest obecnie w końcowej fazie budowy przęsła zwodzonego.

**Most z przęsłem zwodzonym przez Martwą Wisłę na Wyspę Sobieszewską w Gdańsku (2017)**

Przeprawa składa się z dwóch części. Część brzegowa to przęsła o nowatorskiej konstrukcji zespolonej typu VFT VIP zaprojektowane w układzie ramowym wraz z podpora-





Rys. 22. Kładka zwodzona przez rzekę Motławę w Gdańsku. Widok na przeprawę i charakterystyczne przekroje (Mosty Gdańsk)

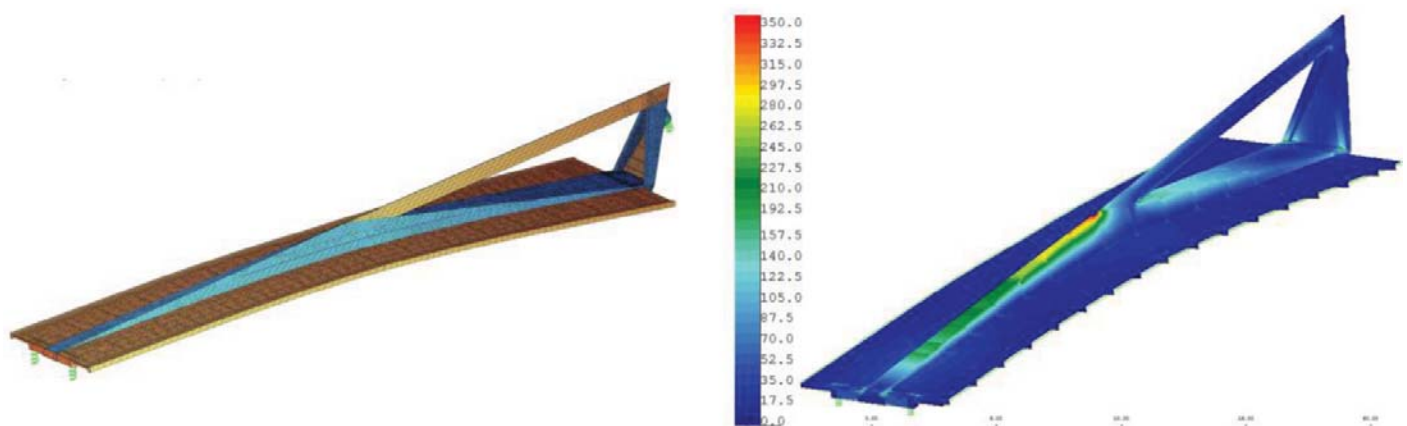
mi. Część środkowa to stalowe przęsło zwodzone składające się z dwóch symetrycznych konstrukcji kłapowych z przeciwwagą (rys. 24). Przeprawę zaprojektowało biuro Europrojekt, wykonawcą jest konsorcjum Metrostav-Vistal.

Z uwagi na nietypowość rozwiązania, przęsła zwodzone zostały sprawdzone z wykorzystaniem modelu powłokowego MES SOFiSTiK.

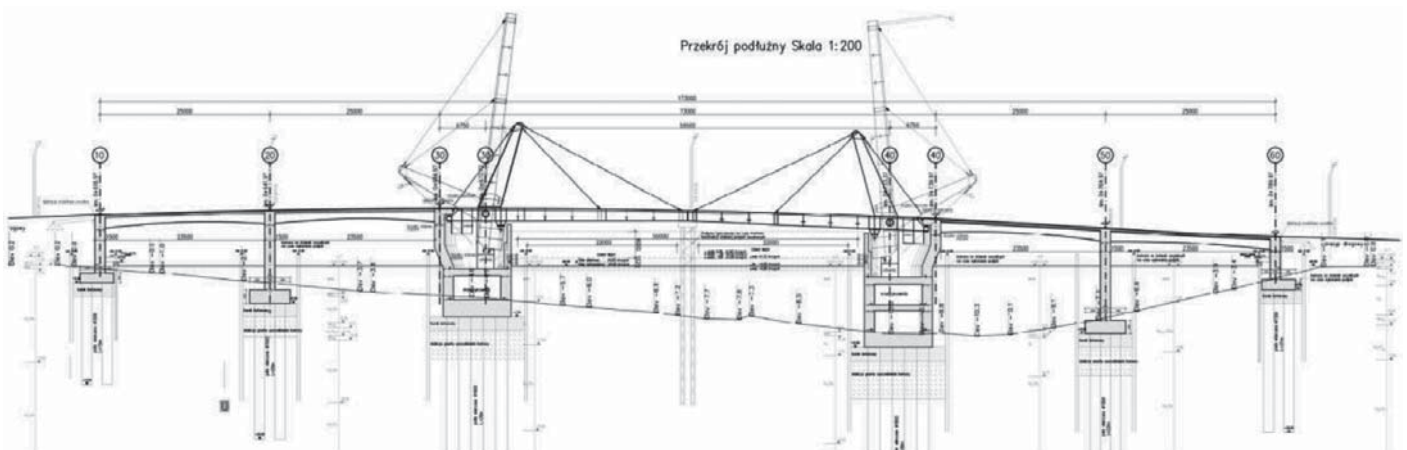
Analiza MES pokazała duże możliwości optymalizacji przęsła. W procesie aktualizacji projektu wykonano szereg zmian. Uproszczono konstrukcję dźwigarów głównych i strefę przeciwwagi. Uaktualnioną konstrukcją również zweryfikowano przy pomocy powłokowego modelu MES (rys. 26).

## Podsumowanie

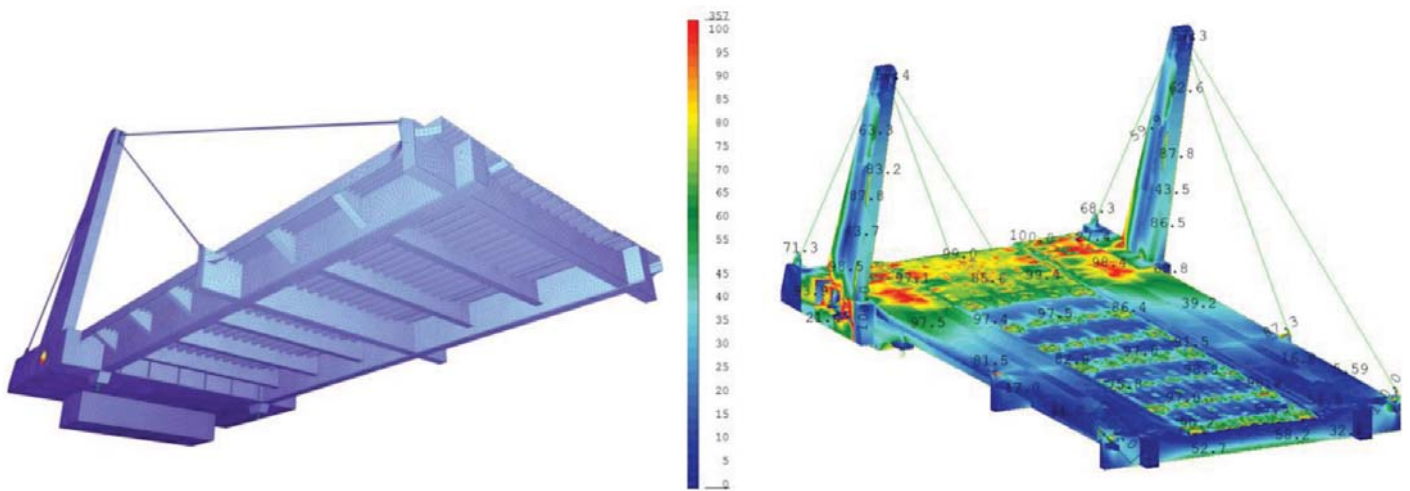
Historyczne rozwiązania przęsła mostów stalowych cechują się wypracowanymi przez lata schematami stycznymi i rozwiązaniami szczegółowymi. Dzisiaj dzięki systemom MES powstają mosty o konstrukcji często niepojętej dla tradycyjnego inżyniera. Nawet standardowe nazewnictwo przypisane typom konstrukcji mostowych już nie obowiązuje. Trudno



Rys. 23. Kładka przez Motławę. Model MES i przykładowe wyniki analizy (naprężenia zastępcze HMM)

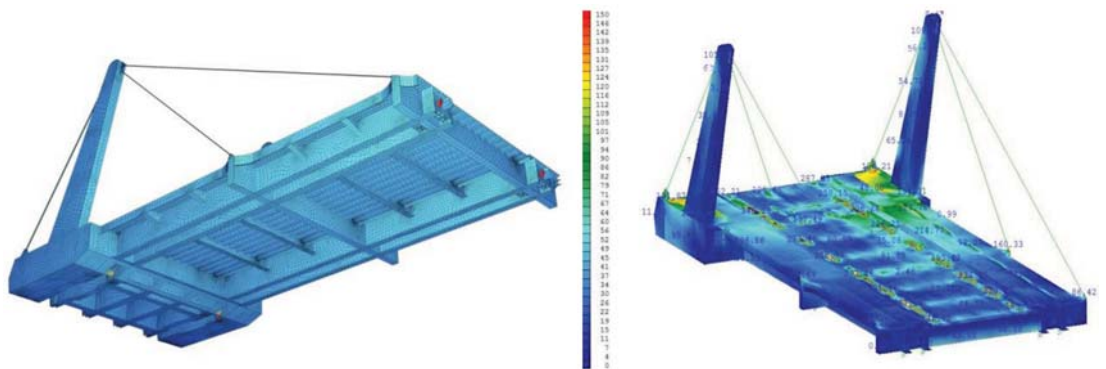


Rys. 24. Widok z boku na przeprawę



Rys. 25. Model MES i przykładowe wyniki przed aktualizacją projektu (max naprężenia zastępcze wg HMH)

Rys. 26. Model MES i przykładowe wyniki po aktualizacji projektu (max naprężenia zastępcze wg HMH)



Rys. 27. Kładka Olimpijska w Turynie, HDA PdiO Ingeneria srl, 2005, Wiadukt na drodze S3, Transprojekt Gdański, 2008



Rys. 28. Most przez rzekę Goldapę (mosty kompozytowe.pl), Wiadukt w ciągu ul. Gdańskiej w Bydgoszczy (Mapio.net)

powiedzieć czy obiekty pokazane na rysunku 27 należą do grupy podwieszonych czy też łukowych. Podobnie jest z obiektem pokazanym na rysunku 28.

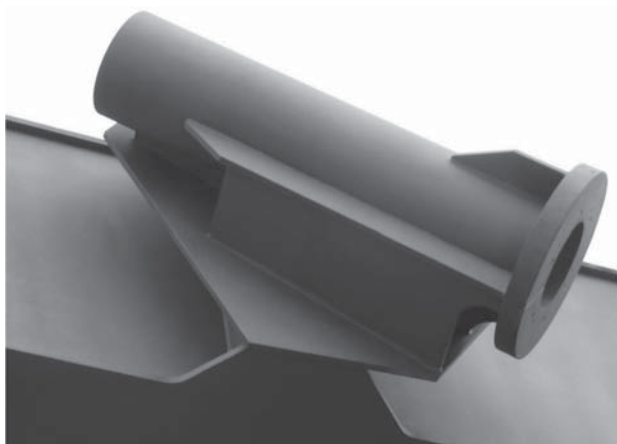
Należy mocno podkreślić, że w takich przypadkach globalne modele belkowe są niewystarczające na etapie projektowania. Niestychanie ważne są detale konstrukcyjne, szczególnie tam, gdzie rezygnuje się z klasycznych, sprawdzonych rozwiązań (przykład rys. 29).

Współczesne metody obliczeniowe otworzyły przed projektantami nowe możliwości kształtowania konstrukcji. Metoda

Elementów Skończonych umożliwia tworzenie wirtualnego laboratorium, w którym projektant może testować nowe, nietypowe rozwiązania. Jednak wiara w model MES nie może być bezkrytyczna szczególnie wtedy, gdy model ten jest trudny do zweryfikowania.

#### Bibliografia

- [1] Leonhardt F., Bridges, Deutsche Verlags – Anstalt 1984
- [2] Żółtowski K., Bridge over Vistula river in Kieźmark. Practical application of nonlinear shell FEM system. Shell structures: Theory and applications / eds. Wojciech Pietraszkiewicz, Czesław Szymczak. – London: Taylor & Francis/Balkema, 2005. – (Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences): s. 521–525.
- [3] Binczyk M., Żółtowski K., Nowy Most Łazienkowski w Warszawie. Analiza z wykorzystaniem modelu numerycznego MES. Materiały Budowlane 524 (4): s. 38–40.
- [4] Niemirko A., Budowa mostów w Polsce 1995–2005. „Drogownictwo” 2006
- [5] Galewski T., Deptuła T., Żółtowski K., Technologia montażu mostu przez Wisłę w Toruniu metodą transportu wodnego – model teoretyczny. Mosty, Elamed, 2013
- [6] Żółtowski K., Binczyk M., Most przez Wisłę w Kamieniu. Montaż przez nasuwanie podłużne. Koncepcja i realizacja. Materiały Budowlane, Sigma-NOT, 2015/7
- [7] Walkowiak E., Analiza statyczno-wytrzymałościowa mostu MS-4/B w ciągu drogi ekspresowej nr 7 pod Ostródą. Praca dyplomowa – magisterska. Promotor Krzysztof Żółtowski. Politechnika Gdańska, 2015.



Rys. 29. Nietypowe zamocowanie wanty w pomoście

## Zapraszamy do prenumerowania DROGOWNICTWA w 2023 roku

prenumerata roczna normalna 300 zł } (w tym 8% VAT)  
cena 1 egzemplarza 26 zł }

prenumerata roczna studencka 150 zł } (w tym 8% VAT)  
cena 1 egzemplarza 13 zł }

Uprzejmie informujemy Szanownych Prenumeratorów, że egzemplarze „Drogownictwa” oraz faktury będą wysyłane po przesłaniu zamówienia na adres [prenumerata.drogownictwo@sitkrp.org.pl](mailto:prenumerata.drogownictwo@sitkrp.org.pl) oraz po wpłaceniu należnej kwoty na nasze konto:

**07 1240 6973 1111 0011 0889 5231**

Wydawnictwa SITK RP sp. z o.o., ul. Świętokrzyska 14A lok. 150, 00-050 Warszawa

Redakcja