

Wzmacnianie mostu ze względu na bardzo duże obciążenie drogowe

Strengthening of a road bridge due to a very large load



Czesław Machelski

prof. dr hab. inż.

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; Katedra Mostów i Kolei

czeslaw.machelski@pwr.edu.pl



Maciej Hildebrand

dr inż.

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; Katedra Mostów i Kolei

maciej.hildebrand@pwr.edu.pl

Streszczenie: W pracy rozpatruje się przypadek przejazdu transport drogowego o bardzo dużej masie. Występuje on sporadycznie w infrastrukturze drogowej i jest trudny do realizacji z uwagi na ograniczone nośności użytkowe obiektów mostowych. W wynikach analiz podanych w pracy i literaturze widoczne jest, że współcześnie budowane (i stare) mosty nie są przystosowane do takich transportów. Do realizacji takich przewozów niezbędne są wzmocnienia (przebudowy) konstrukcji – jak w przykładzie podanym w pracy. W podsumowaniu zwrócono uwagę na administracyjne określanie nośności użytkowej mostów jako masy pojazdu dopuszczanego do przejazdu przez most. Jest ona nieprecyzyjna.

Słowa kluczowe: Mosty drogowe; Duże obciążenia; Wzmacnianie

Abstract: Extremely heavy oversized transport is considered in the paper. Such oversized loads appears occasionally along the road network due to the restrictions of load capacity of bridges. The results of the analyses involved in the paper shows that old bridges as well as new ones are not adapted to such oversized loads. The strengthening or reconstructions of structural elements are required as presented in the paper. The final remark refers to the administrative understanding of the load capacity of the bridge which is based on the total weight of a vehicle. Such approach of the load capacity is not precise.

Keywords: Road bridge; Large load; Strengthening

W eksploatacji drogowej infrastruktury komunikacyjnej zasadniczym obciążeniem są pojazdy samochodowe. Jest to jeden z rodzajów obciążeń zmiennych mostów nazywany w normach obciążeniem ruchomym [1, 2]. Podstawową charakterystyką techniczną pojazdów jest ich ogólna masa M . Jest ona podstawą administracyjnej kwalifikacji nośności użytkowej mostów [2]. W przypadku pojazdów o dużych masach korzystne jest rozłożenie masy M na wiele osi i kół, jak na rysunku 1. W praktyce drogowej i kolejowej podaje się też naciski na oś Q . W ocenie bezpieczeństwa dźwigarów

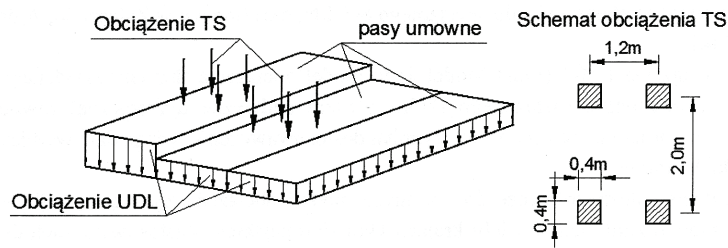
głównych istotne są zależności geometryczne pomiędzy schematem obciążenia i schematem obiektu mostowego: układ osi i ich wzajemne odległości wzdłuż drogi. W pojazdach drogowych, jak na rysunku 1 oś oznacza szereg kół położonych w jednej linii prostopadłej do kierunku jazdy. W przypadku oceny bezpieczeństwa elementów pomostu istotne jest obciążenie P jezdni pojedynczymi kołami pojazdu. Wielkości P i Q są ważne także w przypadku sprawdzania nośności nawierzchni jezdni drogowych.

Przykłady najcięższych pojazdów samochodowych omówiono w [2, 3]. W grupie

pojazdów budowlanych występują m.in. dźwigi samochodowe np. Grove RT 1650 o masie $M = 106,8$ ton. Wielosiowe przyczepy ciągnięte przez samochód, jak na rys. 1 są częstym obciążeniem mostów, a ich masa wraz z ciągnikiem osiąga $M = 210$ ton [2]. W niektórych przypadkach na przyczepie przewożony jest ciężki element, np. transformator o łącznej masie zestawu z ciągnikiem i pchaczem wynoszącej $M = 414$ ton [4]. Rekordowy układ transportowy z własnym napędem o masie łącznej (z ładunkiem) $M = 637$ ton przejechał w roku 2016 przez most na Brzeźnicy w Płocku. Naj-



1. Transporty nienormalne realizowane na drogach publicznych (www.mtdskuratowicz.pl)



Numer pasa jezdni	Obciążenie TS (na oś) [kN]	Obciążenie UDL [kN/m ²]
1	300 α_{Q1}	9,0 α_{q1}
2	200 α_{Q2}	2,5 α_{q2}
3	100 α_{Q3}	2,5 α_{q3}
Pozostałe pasy	-	2,5 α_{qi}
Obszar pozostały	-	2,5 α_{qr}

2. Model obciążenia LM-1 [1]



3. Widok ogólny mostu po wzmocnieniu

Tab. 1. Współczynniki dostosowawcze w Załącznikach Krajowych

Państwo	Do obciążenia TS na pasach jezdni, α_q			Do obciążenia UDL na pasach jezdni, α_q		
	$i=1$	$i=2$	$i \geq 3$	$i=1$	$i=2$	$i > 2$
Niemcy	1	1	1	1,33	2,4	1,2
Holandia	1	1	1	1,15	1,4	1,4
Francja	1	1	1	1	1,2	1,2
Polska*	1	1	1	1	1	1
Belgia	1	1	0	1	1	1
Anglia	1	1	1	0,61	2,2	2,2
Dania	1	1	1	0,67	1	1
Słowacja	0,9	0,9	0,9	0,9	1	1
Czechy	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1

*Austria, Bułgaria, Chorwacja, Grecja, Łotwa, Węgry, Włochy, Rumunia

większym znanym obciążeniem mieszczącym się w całości na obiekcie mostowym nad Whitehorse Creek w stanie Alberta (Kanada) o rozpiętości $L = 24$ m była koparka o masie $M = 1144$ ton [5]. Konstrukcja gruntowo-powłokowa tego obiektu była specjalnie przystosowana do tego obciążenia.

Obciążenia projektowe obiektów mostowych

Obiekty mostowe o dużym znaczeniu komunikacyjnym są sprawdzane na możli-

wość przejazdu pojazdów wojskowych klasy 150 i klasy 100, zgodnie ze standardem NATO (Stanag 2021). Są to kolumny pojazdów o maksymalnej masie $M = 151,3$ ton [2, 3]. Jako obciążenie projektowe drogowych obiektów mostowych wprowadza się obecnie schemat obciążeń LM-1 [1] pokazany na rysunku 2. Składa się on z dwóch rodzajów obciążeń: powierzchniowego UDL i nałożonego na niego tandemu sił skupionych TS. W obciążeniu ujęta jest nadwyżka dynamiczna. Położenie tych obciążeń ma wywoływać niekorzystne siły wewnętrz-

ne w analizowanym elemencie konstrukcji mostu. Każda z wartości podstawowych jest korygowana przez współczynniki dostosowawcze ujęte w tabeli na rysunku 2 jako wartości α_Q i α_q . Taki układ obciążeń już obowiązuje w krajach europejskich łącznie z indywidualnym Załącznikiem Krajowym, podanym w tabeli 1. Z porównania wartości współczynników dostosowawczych podanych w tabeli 1 wynika, że do największych obciążeń eksploatacyjnych będą przystosowane mosty niemieckie. Do licznej grupy krajów przyjmujących współczynniki o wartości 1 należy także Polska.

Porównanie skuteczności obciążenia normowego i ciężkiego pojazdu

Analizę skuteczności obciążeń przewidzianych w Eurokodach [1] przeprowadzono na przykładzie mostu przez rzekę Brzeżnicę w Płocku [6]. Ogólny widok mostu przedstawiono na rys. 3, a widok od spodu przęsła – na rys. 4. Obie fotografie wykonano po przebudowie obiektu. Ustrój nośny analizowanego obiektu tworzy 8 belek stalowych HEB 700 w rozstawie $b = 1,15$ m i ich numeracji jak na rysunku 5. Belki są ze sobą stężone lekkimi poprzecznikami kratowymi z kątowników. Pomost stanowi płyta żelbetowa o grubości około $t = 17$ cm, pogrubiona w rejonie chodników do około $t_1 = 40$ cm. Szerokość całkowita pomostu $B = 10,40$ m, szerokość użytkowa jezdni $B_j = 6,94$ m, szerokość użytkowa obustronnych chodników $B_c = 2 \times 1,5$ m. Przęsło podparte jest na przyczółkach masywnych, oraz na dodatkowych podporach pośrednich, stalowych, ramowych, które zostały wbudowane w celu przystosowania obiektu do zwiększonych obciążeń. Układ konstrukcyjny mostu stanowią belki stalowe z betonową płytą pomostową. Aktualna rozpiętość głównego przęsła mostu $L_1 = 13,10$ m, a długość ustroju nośnego w osiach podparć na przyczółkach $L_c = 16,84$ m.

Most pierwotnie był więc konstrukcją jednoprzęsłową o rozpiętości 16,84 m. W związku z planowanymi transportami niernormatywnymi obiekt został w poprzednich latach przebudowany. Wbudowano dwie podpory pośrednie w celu zmniejszenia maksymalnej rozpiętości z 16,84 do 13,10 m. Wykonano także inne prace.

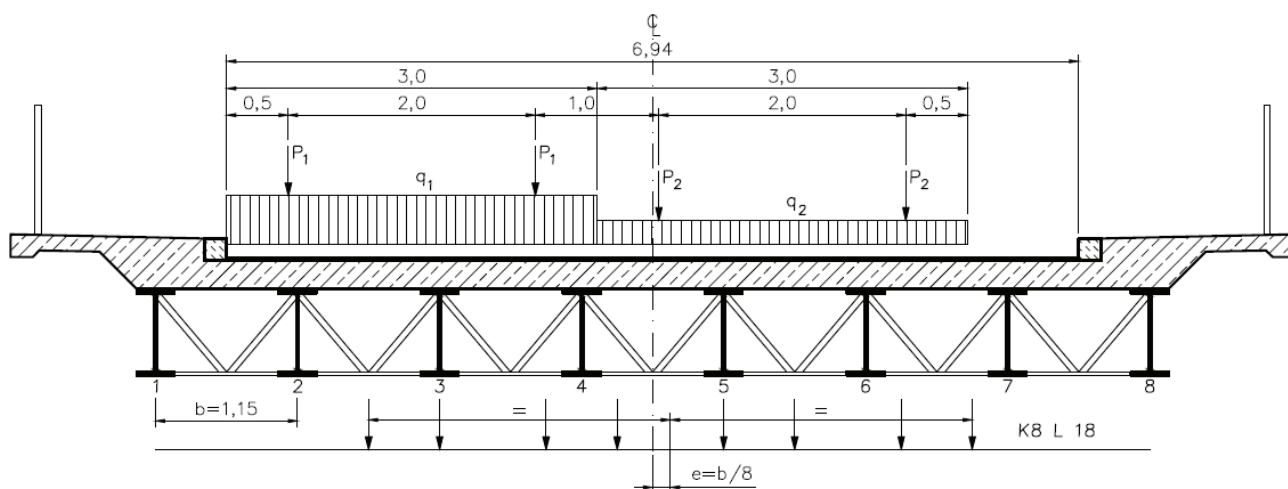
Wiosną 2016 roku wystąpiła potrzeba przeprowadzenia transportu elementu instalacji przemysłowej o bardzo dużej masie, rys. 6. Do przewozu ładunku zastosowano samojezdne (z własnym napędem) podwozie zestawione z dwóch pojazdów o sumarycznej liczbie 144 kół. Całkowita masa pojazdu z ładunkiem osiągnęła $M = 637$ t.



4. Konstrukcja mostu w widoku od spodu przęsła po wzmocnieniu



6. Transport o masie całkowitej 637 ton zrealizowany w Płocku



5. Położenie analizowanych obciążeń w przekroju poprzecznym mostu

Szerokość zajmowanej przestrzeni na jezdni wynosiła około 5,6 m a długość $L_0 = 29,6$ m. Całkowita masa zespołu wraz z ładunkiem rozkładała się równomiernie na 18 osi z naciskiem na oś $Q = 354$ kN rozłożonym na osiem kół o nacisku $P = 44,25$ kN. Naciski na koła regulowane są w tym pojeździe automatycznie. Efekty oddziaływań na most tego pojazdu porównano ze skutecznością obciążeń normowych [1]. Założono w analizie, że tor ruchu pojazdu jest odsunięty od osi jezdni o $b/8$, tzn. że pojazd nie jedzie dokładnie w osi drogi na moście.

Rozpatrzono możliwość przejazdu pojazdu o masie 637 t przez przedmiotowy most, gdyby był zaprojektowany według Eurokodu [1] z największymi wartościami współczynników dostosowawczych przyjętych w Niemczech, jak w tabl. 1. Analizie poddano dźwigar 3 (rys. 4). Obciążenia normowe usytuowane w przekroju poprzecznym mostu, niekorzystnie dla dźwigara 3 w postaci sił skupionych wynoszą: $P_1 = 300/2 = 150$ kN i $P_2 = 200/2 = 100$ kN. Obciążenia rozłożone są o wartości $q_1 = 9 \cdot 1,33 = 12$ kN/m² oraz $q_2 = 2,5 \cdot 2,4 = 6$ kN/m². Na rysunku 7 podano linie wpływu rozdziału poprzecznego obciążenia dotyczące dźwigarów oznaczonych numerami 2, 3, 5, (rys. 4). W wyniku prze-

prowadzonego rozdziału poprzecznego obciążenia, otrzymano obciążenie skupione $P = 86,75$ kN oraz rozłożone $q = 9,06$ kN/m dotyczące dźwigara 3. Moment zginający w środku rozpiętości dźwigara 3 od obydwu rodzajów sił TS i UDL, tj. od obciążenia normowego [1], (przy rozpiętości przęsła 16,84 m), wynosi

$$M_{EN} = 678,4 + 221,0 = 899,4 \text{ kNm} \quad (1)$$

Proporcja składników pochodzących od P i q w (1) wynosi $678,4/221,0 = 3,07$. Zatem skuteczność tandemu sił TS jest trzykrotnie większa od skuteczności obciążeń rozłożonych UDL. W mostach małych rozpiętości proporcja ta jest większa [2], stąd wynika ogólny wniosek, że w większości mostów małych i średnich rozpiętości iloraz ten będzie zbliżony, bowiem współczynniki dostosowawcze ujęte w tabeli 1 dla sił TS są w większości przypadków równe 1. Istotne różnice będą dotyczyć mostów o dużych rozpiętościach, dla których duże znaczenie ma obciążenie UDL, a ponadto występuje istotne zróżnicowanie wartości współczynników dostosowawczych w Załącznikach Krajowych, przywołanych w tabeli 1.

Przedmiotowy pojazd nienormatywny o

masie całkowitej $M = 637$ ton przejeżdżający przez analizowany most w Płocku wywołuje inne siły wewnętrzne niż obciążenia normowe [1]. Jako kryterium porównawcze przyjęto maksymalny moment zginający w belkach stalowych przęsła mostu.

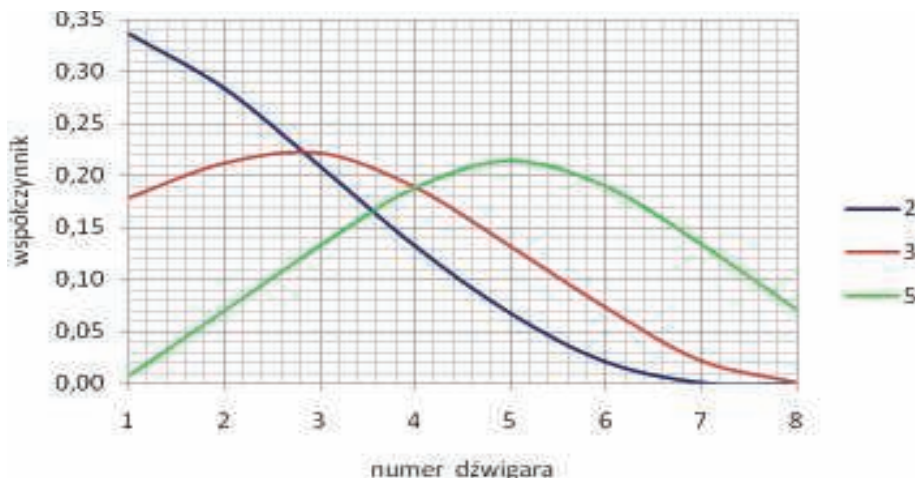
W pierwszym kroku analizy przyjęto, że most jest w stanie pierwotnym, tj. przed przebudową. Konstrukcję mostu stanowiło wówczas jedno przęsło swobodnie podparte o rozpiętości $L_{ci} = 16,84$ m. Przyjęto, że pojazd przejeżdża wzdłuż osi mostu, przy przyjęciu niewielkiego odchylenia w stosunku do osi jezdni $e = b/8$. Analizie poddano dźwigar oznaczony numerem 5. Zastępcze obciążenie dotyczące dźwigara 5, z uwzględnieniem rozdziału poprzecznego obciążenia wynosi

$$p = \frac{354 \cdot 1,333}{8 \cdot 1,4} = 42,13 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

Stąd moment zginający obliczony w środku rozpiętości wynosi

$$M_p = \frac{42,13 \cdot 16,84^2}{8} = 1493 \text{ kNm} \quad (3)$$

Porównując M_{EN} (1) i M_p (3) widoczne jest, że nawet współcześnie projektowane mosty na największe obciążenie (niemieckie) nie



7. Linie wpływu rozdziału poprzecznego obciążenia

są przystosowane do przewożenia dużych ładunków nienormatywnych. Uwaga ta dotyczy również wartości obliczeniowych momentów, gdy uwzględnimy współczynniki obciążeń 1,35 (obciążenie normowe) i 1,15 (obciążenie wyjątkowe). Zatem do przeprowadzenia takiego transportu niezbędne jest (i będzie w przyszłości) wzmocnienie konstrukcji. Podobny wniosek dotyczy również mostu podwieszonoego przez Wisłę w Płocku [3] o rozpiętości $L = 375$ m. Również w tym przypadku potencjalny przejazd pojazdu nienormatywnego o masie zbliżonej do masy pojazdu analizowanego w niniejszym artykule nie byłby bezpieczny.

Wzmocnienie konstrukcji mostu

Wzmocnienie mostów ze względu na transport drogowy dużych ładunków jest uzasadnione ekonomicznie. W pracy [4] podano przykład przewozu transformatora na przyczepie przy masie zestawu z ciągnikiem i pchaczem wynoszącej $M = 414$ ton. W obiekcie, po którym odbywał się przejazd, wzmocniono przęsło o konstrukcji zespolonej, co uzyskano z zastosowaniem sprężenia zewnętrznego. Niewielki most przez Brzeźnicę w Płocku jest ciekawym przykładem małego obiektu o dużym znaczeniu gospodarczym. Obiekt znajduje się w sieci ulic miejskich. Ruch samochodowy na moście jest niewielki, ale most znajduje się w ciągu drogi łączącej miejsce przeładunkowe ulokowane przy rzece żeglownej z dużym zakładem produkcyjnym, do którego transportowane są elementy instalacji przemysłowych transportem kombinowanym, tj. drogą wodną i lądową. Z uwagi na swoje położenie i sposób wykorzystania – do (sporadycznego) przewozu ładunków ciężkich – konstrukcja mostu została w przeszłości do tego przystosowana [6]. Obecne ukształtowanie obiektu (po wzmocnieniu) przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Wprowadzono zmiany konstrukcyjne zestawione niżej.

- Pomost wzmocniono przez wbudowanie dodatkowych podłużnic pomiędzy dźwigarami głównymi. Ich zadaniem jest wzmocnienie pomostu w związku z dużymi naciskami kół P w pojazdach nienormatywnych.
- Pomiedzy przyczółkami wybudowano dodatkowe dwie ramowe podpory pośrednie na odrębnych fundamentach palowych. Na nich są umieszczone specjalne, drobnowymiarowe łożyska styczne z pakietów małych płaskowników. W założeniach projektowych pierwotny ustrój nośny nie obciąża łożysk nad podporami pośrednimi (występuje luz około 2 mm). Wobec tego dodatkowe podparcie jest skuteczne dopiero przy znacznych obciążeniach użytkowych.
- Przyczółki zostały rozparte rurami stalowymi. Mają one zabezpieczać przyczółki przed efektem zwiększonego parcia gruntu w sytuacji dużego obciążenia naziumu.

Analiza bezpieczeństwa przejazdu

W wyniku przebudowy [6] podjętej w celu umożliwienia prowadzenia transportów nienormatywnych utworzono konstrukcję o trzyprzęsłowym schemacie statycznym i rozpiętościach: $L_1 = 1,40$ m, $L_2 = 13,10$ m, $L_3 = 2,34$ m. Każda podpora pośrednia stanowi układ ramowy. Trzyprzęsłowy model konstrukcji jest właściwy w przypadku większych obciążeń np. grupą samochodów ciężarowych. W przypadku obciążeń eksploatacyjnych o małej intensywności np. samochodów osobowych skutecznym schematem jest układ pierwotny tj. belka o schemacie swobodnie podpartym o rozpiętości $L_{11} = 16,84$ m. Gdy obciążenia są duże, jak w analizowanym przypadku właściwym modelem przęsła jest schemat z więziami jednostronnymi, czyli układ statycznie wy-

znaczalny w postaci belki o rozpiętości L_2 ze współnikami o długościach $L_1 + c$ i $L_3 + c$ więc bez podpór skrajnych (przyczółków), gdy $c = 0,2$ m, (c oznacza odległość od osi podparcia na przyczółkach do końca ustroju nośnego). Przy tak ustalonych warunkach obliczono spodziewany moment zginający w jednej z belek przęsła pod obciążeniem pojazdem o masie całkowitej $M = 637$ t.

Wartość momentu zginającego w dźwigarze 5 i przekroju $x = 6,0$ m odległym od podpory dodatkowej od strony przęsła L_1 , przy przyjęciu schematu statycznego belki swobodnie podpartej ze współnikami wynosi

$$M = \frac{g + p}{2} x(L_2 - x) - M_2 = \frac{13,01 + 42,13}{2} (6(13,1 - 6) - 28,25) = 1146,2 \text{ kNm} \quad (4)$$

gdzie:

$$M_1 = \frac{g}{2} (L_1 + c)^2 = \frac{13,01}{2} 1,6^2 = 16,65 \text{ kNm} ;$$

$$M_3 = \frac{g}{2} (L_3 + c)^2 = \frac{13,01}{2} 2,54^2 = 41,97 \text{ kNm}$$

$$M_2 = M_3 + (M_1 - M_3) \frac{x}{L_2} = 28,25 \text{ kNm} .$$

W wartości momentu zginającego podanego w (4) uwzględniono również obciążenia stałe dźwigara głównego $g = 13,01$ kN/m. W tym samym moście lecz przed jego wzmocnieniem wartość maksymalnego momentu wyniosłaby

$$M = \frac{g + p}{8} L^2 = \frac{13,01 + 42,13}{8} 16,84^2 = 1955 \text{ kNm} ; \quad (5)$$

a więc o około 70 % więcej. Przyjęto w obliczeniach, że nie występuje wiarygodne zespolenie między belkami i płytą. Naprężenie normalne w belce stalowej HEB 700 w przypadku braku zespolenia wynosi

$$\sigma = \frac{1,1462}{0,00734} = 156,2 \text{ MPa} . \quad (6)$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy wykazano, że mimo znacznych rozmiarów i ciężaru prowadzonego transportu, jak na rysunku 6 przejazd przez obiekt po przebudowie jest możliwy bez nadmiernego ryzyka.

Przedstawione wyniki analizy obliczeniowej posłużyły do wydania orzeczenia eksperckiego o możliwości przeprowadzenia przedmiotowego transportu nienormatywnego o masie $M = 637$ t. Transport ten rzeczywiście odbył się wiosną 2016 roku. Most na Brzeźnicy jest obecnie eksploatowany zgodnie z przeznaczeniem pod normalnym ruchem samochodowym.

Podsumowanie

Analizowany przypadek bardzo dużej masy pojazdu stanowić może kolejny przyczynek do dyskusji dotyczącej definicji nośności użytkowej mostów i ustalania jej w trybie administracyjnym jako masy całkowitej pojazdu dopuszczanego do przejazdu przez most. Analizowany w pracy przypadek wskazuje na jaskrawą rozbieżność pomiędzy nośnością ustaloną administracyjnie a stanem rzeczywistym. Wykazano bowiem, że możliwy jest przejazd pojedynczego ciężkiego pojazdu (jakkolwiek po moście wzmocnionym) o masie całkowitej około 20 krotnie większej od masy pojazdów dopuszczonych do ruchu po typowych mostach. W pracy [4] podano przykład przewozu transformatora o masie $M = 414$ ton po obiekcie o nośności użytkowej 30 ton. Autorzy zdają sobie sprawę, że w analizowanym przypadku mostu przez Brzeźnicę w Płocku stopień wykorzystania nośności konstrukcji (skutkującej nawet jej potencjalnym miejscowym uszkodzeniem – ale bez istotnego zagrożenia bezpieczeństwa przejazdu) był bardzo duży. Należy mieć jednak na uwadze, że zarządca mostu oraz przedsiębiorstwo transportowe brali pod uwagę ewentualną konieczność naprawy mostu po podjętej akcji przewozowej. Problem naprawy byłby jednak akceptowalny w obliczu strategicz-

nego znaczenia rozbudowującego się wielkiego zakładu przemysłowego o kluczowej roli w gospodarce nie tylko miasta, gdzie się znajduje, ale także życiu gospodarczym całego kraju. W przypadku mostów leżących w miejscach strategicznych istnieje możliwość szacowania ciężaru ciężkich pojazdów przejeżdżających przez most z wykorzystaniem prostych systemów pomiarowych rejestrujących wybrane parametry, np. siły, przemieszczenia [7]. System taki może być też wykorzystany podczas prowadzenia zestawu nienormatywnego do weryfikacji szacowanego stopnia wykorzystania nośności, szczególnie w przypadku obiektów o bardziej skomplikowanym schemacie [3]. W kontekście udzielenia zezwoleń na przeprowadzenie transportu nienormatywnego na drodze publicznej ważnym zagadnieniem jest ustalanie nośności przęseł mostów uszkodzonych. W takich sytuacjach możliwe i wskazane jest skorzystanie ze specjalnie do tego celu opracowanych narzędzi ekspertowych [8]. ◀

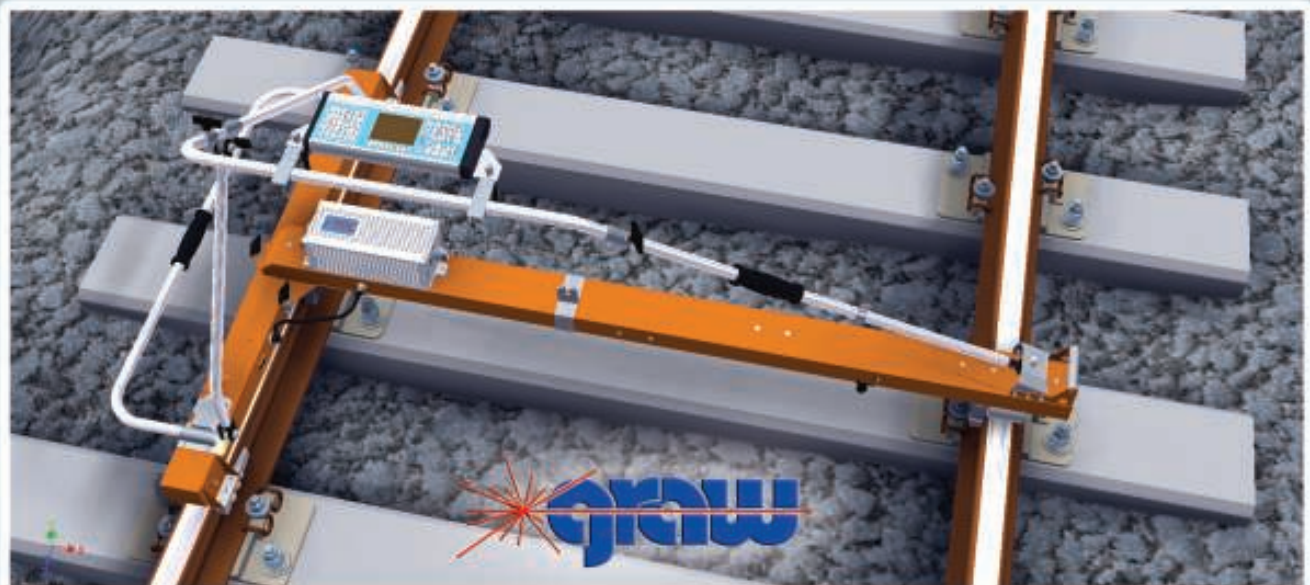
Materiały źródłowe

- [1] PN-EN 1992-2-2010. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcję – Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
- [2] Machelski C.: Ruchome obciążenia obiektów mostowych. Dolnośląskie Wy-

- dawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2015.
- [3] Machelski C., Hildebrand M.: Duże obciążenia dużego mostu. Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław 29-30 listopad 2015 r. s. 525-532.
- [4] Machelski C., Onysyk J., Prabucki P.: Wzmocnienie mostu zespolonego ze względu na przejazd nienormatywny, VIII Sem. „Współczesne metody wzmocnienia i przebudowy mostów”. Poznań 9-10 czerwca 1998 s. 89-96.
- [5] Bakht B.: Evolution of the design methods for soil-metal structures in Canada. Archives of Institute of Civil Engineering. No 1 2007 pp. 7-22.
- [6] Hotłoś Z.: Most przez rzekę Brzeźnicę w ciągu ul. Kazimierza Wielkiego w Płocku, Projekt wzmocnienia mostu - Obliczenia dodatkowe na obciążenie wyjątkowe 516 ton. Pracownia Projektowa Zbigniew Hotłoś, Płock 2007
- [7] Machelski C., Hildebrand M.: Estimation of influences on a cable-stayed bridge on the basis of force changes in the stays recorded by Monitoring System. Journal of Civil Structural Health Monitoring (2015) 5:1-9.
- [8] Bień J., Gładysz M., Kużawa M., Systemy ekspertowe w ocenie kondycji przęseł mostowych z uszkodzeniami, Przegląd Komunikacyjny, 9/2013, s. 18-25

REKLAMA

TOROMIERZ INERCYJNY iTEC Dokładny pomiar strzałek



www.graw.com