

# Dokąd zmierza mostownictwo?

## Świat i Polska, cz. 1

tekst: **prof. dr hab. inż. WOJCIECH RADOMSKI**, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy

Przewidywanie przyszłości zawsze jest ryzykowne i rzadko kiedy dobrze odpowiada jej rzeczywistemu obrazowi obserwowanemu po latach. Ryzyko mylnego przewidywania jest tym większe, im dalszego sięga czasu. To właśnie dlatego w różnego rodzaju opracowaniach o charakterze futurystycznym ich autorzy asekurują się zwrotem „w dającej się przewidzieć przyszłości”, która wybiega w przód na ogół nie więcej niż dwie, wyjątkowo trzy dekady.

### 1. Wprowadzenie

Mimo wspomnianego ryzyka, przewidywanie przyszłych kierunków rozwoju wszelkiej działalności człowieka i jej szeroko rozumianych konsekwencji, głównie społecznych i klimatycznych, jest niezbędne do planowania gospodarczego. Dotyczy to także, a może przede wszystkim, efektów postępu technicznego i pojawienia się nowych rozwiązań materiałowych, konstrukcyjnych, technologicznych, takich jak np. nanotechnologia, o której kilka dekad temu nikt nawet nie słyszał, a dzisiaj znajduje coraz szersze zastosowanie. Stanowi ona dobry przykład nieprzewidywalności wszystkiego. Oczywiście, strategie rozwojowe powinny być modyfikowane wraz z odkrywaniem nowego w nauce i możliwości wdrażania tych odkryć do techniki, a także – za jej pośrednictwem – do życia codziennego, by w tym kontekście wymienić choćby telefonię komórkową.

Niniejsze autorskie opracowanie dotyczy kierunków rozwoju mostownictwa w ciągu najbliższych dwóch dekad. O dalszym okresie tego rozwoju trudno jest dziś racjonalnie prognozować, bo być może za pół wieku będziemy się poruszać zupełnie innymi środkami transportu (np. za pomocą dronów nowej generacji) i obiekty mostowe przestaną być w ogóle potrzebne – by puścić wodze fantazji.

Jak w każdej innej dziedzinie, również w odniesieniu do mostownictwa przewidywanie oparte jest na obserwacji dotychczasowych tendencji rozwojowych i pewnego rodzaju ekstrapolowaniu tego, co było i jest, na to, co będzie. Świadomość tego, co może czekać budownictwo mostowe, jest ważna z wielu powodów, z których za najbardziej ogólne i mające zarazem największe znaczenie należy uznać:

- nowoczesne realizacje celów gospodarczych i społecznych;
- przygotowanie kadr badawczych i inżynierskich do nowych wyzwań;
- możliwość uniknięcia poprzednio stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, materiałowych, technologicznych (wykonawczych) oraz eksploatacyjnych i utrzymaniowych, które okazały się niewystarczająco właściwe lub nawet błędne.

Na koniec tego wprowadzenia w temat jedna ważna uwaga. Wszystkie spostrzeżenia, uwagi i prognozy wynikają z subiektywnych obserwacji i przemyśleń autora oraz są sformułowane na wyłączną jego odpowiedzialność. Inni autorzy mogliby zapewne ująć problematykę przyszłości mostownictwa ina-

czej, wzbogacając ją np. o zagadnienia w tym opracowaniu niesłusznie pominięte.

### 2. Najnowsze tendencje w rozwoju mostownictwa

Wspomniano poprzednio, że prognozowanie rozwoju każdej dziedziny działalności człowieka, w tym także mostownictwa, oparte jest w dużej mierze na obserwacji i analizie kierunków dotychczasowych przemian tej działalności. Dlatego najpierw spróbujemy syntetycznie (i przypomnijmy – wysoce subiektywnie) określić owe kierunki, oznaczając je, w celu dalszego do nich nawiązywania, literami od A do G.

**Kierunek A.** Wzrost skali budowanych obiektów mostowych, zwłaszcza pod względem rozpiętości przęsłowych, przy zachowaniu znanych lub modyfikowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

**Kierunek B.** Projektowanie i budowanie długich, wielokilometrowych przepraw mostowych, w tym także międzykontynentalnych.

**Kierunek C.** Poszukiwanie i realizowanie nowych, zindywidualizowanych rozwiązań konstrukcyjnych o dużej ekspresji, zdecydowanie odbiegających od powszechnie stosowanych form. Dotyczy to w przeważającej większości kładek dla pieszych, zwłaszcza w miastach, oraz wiaduktów nad autostradami lub dolinami. Inaczej kierunek ten zdefiniować można jako nową estetykę mostów, której głównym polem doświadczalnym są wspomniane kładki.

**Kierunek D.** Wprowadzanie do mostownictwa nowych, niekonwencjonalnych materiałów zarówno do realizacji konstrukcji nośnej, jak i pojedynczych jej elementów lub elementów wyposażenia.

**Kierunek E.** Udoskonalanie metod wykonywania fundamentów, podpór oraz konstrukcji nośnej przy zachowaniu dotychczasowych zasad tych metod.

**Kierunek F.** Monitoring obiektów pod normalnym obciążeniem eksploatacyjnym oraz budowanie mostów inteligentnych, z wbudowanymi urządzeniami do samoczynnego ograniczenia przemieszczeń lub drgań, co ma szczególne znaczenie w budowlach mostowych zlokalizowanych na obszarach aktywnych sejsmicznie.

**Kierunek G.** Wprowadzanie zaawansowanych metod analizy kosztów oraz nowoczesnych metod remontów i modernizacji istniejącej infrastruktury mostowej.

Wymienione kierunki odpowiadają ogólnym tendencjom rozwojowym mostownictwa światowego. Mostownictwo w Polsce, zwłaszcza w ciągu ostatniego ćwierćwiecza, stało się niewątpliwie częścią tego mostownictwa i kierunki jego rozwoju są w znacznym stopniu z nim tożsame, przy uwzględnieniu krajowych uwarunkowań terenowych, klimatycznych, ekonomicznych i społecznych. Na te elementy zostanie jeszcze zwrócona uwaga w dalszej części tego opracowania.

Kierunki A–G zostały wyspecyfikowane w celu uporządkowania rozpatrywań. Warto jednak pamiętać, że częstość niektóre z wymienionych tendencji występują łącznie (np. C i D). Mimo to każdy z kierunków zostanie przedstawiony oddzielnie, poddany krytycznej analizie i poparty przykładami już zrealizowanych obiektów lub dopiero planowanych bądź projektowanych. Na tej podstawie sformułowane zostaną prognozy dalszego rozwoju mostownictwa na świecie i w naszym kraju.

Kierunki A–G będą przedstawione w różnym ujęciu – od dość szczegółowego do jedynie ogólnego zasygnalizowania danej problematyki. Wynika to po prostu z ograniczonej ze zrozumiałych względów objętości tego tekstu. Zasygnalizowane kierunki mogą być przedmiotem oddzielnych opracowań.

### 3. Kierunek A

#### 3.1. Uwagi wstępne

Budowanie obiektów o dużych rozpiętościach przęsłowych należy do najbardziej spektakularnych elementów ilustrujących postęp w mostownictwie. Rekordowe pod tym względem budowle są realizowane na świecie i w Polsce dość wyjątkowo i w różnych przedziałach czasowych. W latach ostatnich wzniesiono stosunkowo wiele obiektów potwierdzających tendencję do stosowania bardzo długich przęseł. Tak dzieje się przede wszystkim w Azji – Chiny, Japonia i Korea Południowa należą obecnie do tygrysów mostowych w skali globalnej. Upraszczając nieco, można powiedzieć, że w Europie Zachodniej i USA to, co miało być zbudowane, zostało już zrealizowane w latach dawniejszych i nowych rekordowych osiągnięć nie należy się tam już spodziewać.

Rekordowych rozpiętości przęsłowych nie można analizować w oderwaniu od rodzaju konstrukcji. Bezwzględne rekordy od dawna należą do mostów wiszących, ale postęp w tym zakresie występuje także w innych układach konstrukcyjnych – belkowych, łukowych i podwieszonych oraz wstęgowych. Natomiast jego brak cechuje mosty o stalowych przęsłach pełnościennych i kratownicowych. Dalej zatem scharakteryzowane będą czołowe osiągnięcia mostownictwa w odniesieniu do każdego z wymienionych rodzajów konstrukcji oraz przedstawione zostaną oparte na tej charakterystyce prognozy rozwojowe. Należy przy tym pamiętać, że Polska ze względu na warunki naturalne nie jest predestynowana do budowy rekordowych w skali świata przęseł mostowych – nie mamy wysp, cieśnin czy bardzo szerokich rzek; nieco fantazjując, można tylko próbować bić rekord świata przez wybudowanie mostu z Gdyni na Hel, czego na razie nie ma w najbardziej wybiegających w przyszłość planach.

Dalszy tekst dotyczący kierunku A ograniczymy do obiektów o przęsłach ze stali i betonu jako podstawowych materiałów konstrukcyjnych. Inne materiały zob. rozdział 6 w 2. części artykułu.

### 3.2. Mosty o konstrukcji belkowej

Pierwsze trzy rekordowe w skali świata i naszego kraju rozpiętości przęseł belkowych zestawiono w tablicy 1. Niektóre z nich pokazano na rycinach 1–5.

Tab. 1. Rekordowe rozpiętości mostowych przęseł belkowych – nazwa, kraj, rozpiętość, rok ukończenia

Świat		Polska	
Przęsła stalowe	Przęsła betonowe	Przęsła stalowe	Przęsła betonowe
<p>ponte President Costa e Silva, Brazylia, 300 m, 1974</p>	<p>Shibanpo<sup>1)</sup>, Chiny, 330 m, 2006</p>	<p>most im. Marii Skłodowskiej-Curie<sup>2)</sup> przez Wisłę, Warszawa, 160 m, 2012</p>	<p>most przez Wisłę, Grudziądz, 180 m, 2013</p>
<p>Neckartalbrücke-1, Niemcy, 263 m, 1978</p>	<p>Stolmasundet, Norwegia, 301 m, 1998</p>	<p>most przez Wisłę<sup>2)</sup>, Połaniec, 160 m, 2014</p>	<p>most przez Odrę, Kędzierzyn-Koźle, 140 m, 2009</p>
<p>Sava-1, Serbia, 261 m, 1956</p>	<p>Raftsundet, Norwegia, 298 m, 1998; Sundøy, Norwegia, 298 m, 2003</p>	<p>most przez Wisłę, Knybawa, 142,20 m, 1941/1950 (bud. / odbud.)</p>	<p>most przez Odrę, Brzeg Dolny, 140 m, 2015</p>

<sup>1)</sup> centralna część rekordowego przęsła jest stalowa

<sup>2)</sup> pomost żelbetowy – konstrukcja zespolona

Prezentowane w tablicy 1 zestawienie oraz obserwacja rozwoju budowy mostów o konstrukcji belkowej pozwalają na sformułowanie następujących komentarzy.

- Mosty z przęsłami o stalowych dźwigarach belkowych, pełnościennych, o dużych rozpiętościach budowano na świecie w latach dawniejszych. Z pierwszej dziesiątki rekordowych obiektów tylko trzy wybudowano w Japonii w latach 1991–1997, pozostałe zrealizowano w latach 70. XX w. lub jeszcze wcześniej. Nic nie wskazuje na to, aby rekord brazylijskiego mostu President Costa e Silva (ryc. 1) z 1974 r. został pobity, a co więcej – nie ma chyba nawet takiej potrzeby.



Ryc. 1. Most President Costa e Silva (Rio-Niterói), Rio de Janeiro,  $L_{max} = 300$  m, 1974

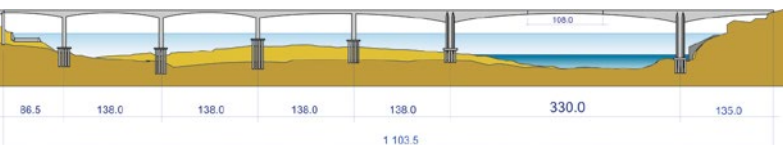
- Zupełnie odmienna sytuacja występuje w budownictwie mostów betonowych. W ostatnich dwóch dekadach zauważyć można ogromny postęp w zwiększaniu rozpiętości



Ryc. 2. Most Stolmasundet, Norwegia,  $L_{\max} = 301$  m, 1998: a) podczas budowy przęsła metodą betonowania nawisowego, b) ukończony most

przęseł. Najbardziej spektakularnym przykładem ilustrującym tę tendencję jest to, co w skrócie i nieco kolokwialnie można określić słowami: beton pokonał stal. Wynika to jednoznacznie w danych zestawionych w tabelicy 1. Rekordowym, i to bez żadnych zastrzeżeń, jest most Stolmasundet (ryc. 2) – pokonał on stalowe przęsło mostu w Brazylii o 1 m, a to głównie dzięki zastosowaniu betonu o wysokiej wytrzymałości (klasy C65) z kruszywem naturalnym oraz wykonaniu centralnej, o długości 182 m, części rekordowego przęsła z wysokowartościowego betonu lekkiego (klasy LC60 i o gęstości  $\rho = 1940$  kg/m<sup>3</sup>).

Nie można jednak pominąć informacji, że powszechnie uznawany za rekordowy wśród betonowych mostów belkowych chiński most Shibampo (por. tab. 1) jest jednak obiektem o naciągającym rekordzie, ponieważ centralna część najdłuższego przęsła o rozpiętości 330 m jest konstrukcją stalową o długości 108 m (ryc. 3).



Ryc. 3. Most Shibampo, Chiny,  $L_{\max} = 330$  m, 2006, zaznaczono środkową część rekordowego przęsła wykonaną ze stali

Warto zauważyć, że zasygnalizowana poprzednio pierwsza światowa tendencja rozwoju mostów o stalowej konstrukcji przęsła nie znajduje potwierdzenia w polskim mostownictwie. Obiekty o najdłuższych w skali kraju przęsłach zbudowano dopiero w ostatnich latach (por. tab. 1), i to jako konstrukcje z żelbetowym pomostem, czyli jako konstrukcje zespolone stalowo-betonowe. Natomiast druga z wymienionych tendencji już znalazła u nas potwierdzenie, ponieważ w tej klasie obiektów również beton pokonał stal. Bezwzględny

rekord rozpiętości należy tu do betonowego mostu przez Wisłę w Grudziądzu – 180 m. Oba rekordowe obiekty – dwa stalowe (zespolone) i betonowy pokazano na rycinie 4.

Na podstawie już przedstawionych informacji oraz obserwacji bieżącej sytuacji w budowie mostów o konstrukcji belkowej sformułować można następujące uwagi prognostyczne.

- Mosty belkowe będą nadal najczęściej budowanymi obiektami, ponieważ ich stosowanie jest technicznie i ekonomicznie uzasadnione w bardzo szerokim przedziale rozpiętości przęsłowych – od kilkunastu do ponad 300 m (w granicznym przypadku). Pokrywa to znakomitą większość potrzeb na świecie i w Polsce. Ze względu na aktualne i realnie przewidywane ceny podstawowych materiałów konstrukcyjnych – betonu i stali – realizacje obiektów betonowych będą zapewne liczniejsze niż stalowych. Nawiązując do kierunku D rozwoju mostownictwa (por. rozdziały 2 oraz 6), już w tym miejscu nadmienić należy, że coraz większy udział w projektowaniu i wykonawstwie mostów belkowych będą mieć betony wysokowartościowe klas od C60 do C100, a to głównie ze względu na wymaganą długotrwałość obiektów i obniżenie kosztów szeroko rozumianego ich utrzymania. Na świecie i w Polsce powstało już stosunkowo wiele takich mostów o różnej konstrukcji, np. rekordowy most w Grudziądzu został wykonany z betonu klasy C70/85.
- Są podstawy, aby przypuszczać, że rekord światowy przęsła belkowego (norweski most Stolmasundet, 301 m, 1998) nie zostanie już – przynajmniej w realnie przewidywanej przyszłości – pobity. To samo stwierdzenie dotyczy przęsła stalowego – 300 m jest pewnym kresem, bo dłuższego przęsła stalowego nie wybudowano od 1974 r., czyli od 44 lat. W przypadku potrzeby zastosowania większych rozpiętości przęsła inne rodzaje konstrukcji dają obecnie większe możliwości, bardziej uzasadnione technicznie i ekonomicznie. Być może rekord mostu chińskiego (most Shibampo, 330 m, por. tab. 1) zostanie pobity przez zastosowanie kolejnego przęsła hybrydowego, którego część centralną będzie stanowić konstrukcja stalowa (por. ryc. 3). To jednak nie będzie „czysty” rekord przęsła betonowego. Na razie brak doniesień, aby szykowano gdzieś na świecie takie rekordowe rozwiązanie.
- W odniesieniu do betonowych mostów belkowych trzeba jeszcze zwrócić uwagę na dwa ograniczenia w dążeniu do pobicia dotychczasowej rekordowej rozpiętości. Pierwsze jest natury konstrukcyjno-estetycznej. W moście Stolmasundet wysokość ustroju przęsła wzdłuż mostu jest krzywoliniowo zmienna (jak zwykle w tego rodzaju przęsłach) – od 15 m nad filarami do 3,5 m w środku rozpiętości. W rekordowym polskim moście w Grudziądzu analogiczny przedział zmienności wynosi od 10,3 m do 4,0 m. Budowanie dłuższych przęsła wymagałoby jeszcze zwiększenia, podanych tytułem przykładu, i tak niemałych wysokości



Ryc. 4. Rekordowe mosty belkowe w Polsce: a) stalowy (zespolony) przez Wisłę w Potańcu,  $L_{\max} = 160$  m, 2014, b) im. Marii Skłodowskiej-Curie przez Wisłę w Warszawie, stalowy (zespolony),  $L_{\max} = 160$  m, 2012, c) z betonu sprężonego przez Wisłę w Grudziądzu,  $L_{\max} = 180$  m, 2013



ustrojowych, co nastęrczałoby trudności wykonawczych i mogłoby budzić zastrzeżenia natury estetycznej. Drugie ograniczenie jest natury reologicznej. Betonowe mosty belkowe budowane są zazwyczaj z zastosowaniem metody betonowania nawisowego. Analiza kilkudziesięciu obiektów wybudowanych na świecie za pomocą tej metody wykazała, że środkowe części najdłuższych przęseł wykazują nadmierne przemieszczenia pionowe, spowodowane niedostatecznym uwzględnieniem w projektowaniu efektów pełzania betonu, które występuje nawet wiele lat po ukończeniu obiektu i w skrajnych przypadkach może prowadzić do katastrofy [1, 2]. Podobne obserwacje poczyniono już wiele lat temu także w Polsce [3]. Dlatego postulowane są w ostatnich latach zmiany w sposobie uwzględniania efektów reologicznych w projektowaniu mostów, zwłaszcza z przęsłami o dużych rozpiętościach i wykonywanych z zastosowaniem metody betonowania nawisowego. Ta nowa metodologia projektowania, oparta na statystycznych ujęciach obserwacji poczynionych na dotychczas wykonanych obiektach, nie została jeszcze dostatecznie opracowana, aby ją oficjalnie usankcjonować.

- Reasumując, można stwierdzić, że dalszy rozwój mostów belkowych będzie polegał głównie na wprowadzaniu nowych odmian znanych już materiałów konstrukcyjnych, głównie betonu, lub materiałów całkiem nowych (np. kompozytów polimerowych) oraz udoskonaleni technologii wykonawczych, natomiast nie należy się spodziewać bicia rekordów rozpiętości przęseł w tej klasie mostów.

### 3.3. Mosty o konstrukcji kratownicowej

Mosty o kratownicowej konstrukcji przęseł były i są wykonywane przede wszystkim ze stali. Mosty betonowe o takiej konstrukcji wprawdzie istnieją i są nawet atrakcyjne wizualnie (np. wiadukt des Sylans we Francji, ryc. 5), ale stanowią wyraźny margines. Dlatego tu przedstawimy tylko tendencje rozwojowe dotyczące obiektów stalowych.

Pierwsze trzy rekordowe w skali świata i Polski rozpiętości przęseł kratownicowych zestawiono w tablicy 2.

Tab. 2. Rekordowe rozpiętości mostowych przęseł kratownicowych – nazwa, kraj, rozpiętość, rok ukończenia, przeznaczenie

Świat	Polska
pont de Québec, Kanada, 549 m, 1917, kolejowy	most im. Józefa Piłsudskiego przez Wisłę*, Toruń, 132 m, 1934, drogowy
Firth of Forth, Wielka Brytania, 521 m, 1890, kolejowy	historyczny most przez Wisłę*, Tczew, 130 m, 1857, drogowy
Minato, Japonia, 510 m, 1974, drogowy, dwupoziomowy	most przez Wisłę*, Tczew, 128,6 m, 1891, kolejowy

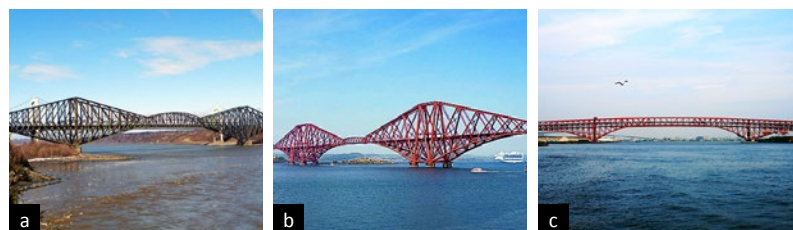
\*) mosty były w różnych okresach przebudowywane i wzmacniane

Na podstawie danych zestawionych w tablicy 2 oraz ogólnej obserwacji rozwoju mostownictwa można sformułować następujące komentarze.

- Są racjonalnie uzasadnione przesłanki, aby stwierdzić, że obiekty mostowe o konstrukcji kratownicowej osiągnęły już swój kres w zakresie rekordowych rozpiętości przęsłowych. Największe rozpiętości należą do mostów wybudowanych na początku XX w. (most w Quebecu) i pod koniec XIX w. (most Firth of Forth). Trzecie miejsce w tym rankingu zajmuje most



Ryc. 5. Wiadukt des Sylans, Francja, obiekty autostradowe z betonu sprężonego o konstrukcji kratownicowej,  $L_{max} = 1266$  m, 1989. Tego rodzaju obiekty można także klasyfikować jako skrzynkowe konstrukcje belkowe o ażurowych środkach



Ryc. 6. Rekordowe mosty kratownicowe: a) Québec,  $L_{max} = 549$  m, 1917, b) Firth of Forth,  $L_{max} = 521$  m, 1890, c) Minato,  $L_{max} = 510$  m, 1974

Minato w Osace, ukończony w 1974 r., czyli 57 lat po wymienionym moście kanadyjskim. Te trzy znane mosty pokazano na rycinie 6. Inne obiekty z pierwszej światowej dziesiątki rozpiętości przęseł kratownicowych (od 427 m do 501 m) wykonano w latach 1936–2010 (najnowszy Tokio Bay, 440 m).

- Pod tym względem podobnie jest w Polsce. W dalszym ciągu rekordowe rozpiętości należą do obiektów budowanych w latach dawniejszych. Pierwsze miejsce zajmują *ex aequo* most drogowy im. Józefa Piłsudskiego przez Wisłę w Toruniu z trzema przęsłami po 130 m, wybudowany w 1934 r. [4] oraz historyczny już most drogowy w Tczewie z sześcioma przęsłami również po 130 m [5] (ryc. 7). Inne mosty o długich przęsłach kratownicowych budowane były na ziemiach polskich głównie w XIX w. lub w latach międzywojennych.
- Mimo braku rekordowych osiągnięć w ostatnich dekadach, mosty o stalowych przęsłach kratownicowych były, są i zapewne będą budowane. Dotyczy to zwłaszcza konstrukcji z jazdą górą, wyraźnie górujących pod względem estetycznym nad tymi z jazdą dołem. Mamy też w Polsce bardzo dobry przykład takiego obiektu – most przez Bug w Broku o rozpiętościach przęseł  $56,0 + 3 \times 69,0 + 88,0 + 49,0$  m = 402,0 m, ukończony w 1995 r. (ryc. 8) [6, 7]. Jest to obiekt o oryginalnej konstrukcji zespolonej, zrealizowanej z użyciem dość nowatorskiej technologii wykonania. Betonowy pomost sprężono nad podporami, zanim kratownicowe dźwigary, budowane od podpór wspornikowo, zostały połączone w środku blachownicowymi skrzynkami. W ten sposób



Ryc. 7: a) historyczny most przez Wisłę w Tczewie,  $L_{max} = 130$  m, 1857, b) most im. Józefa Piłsudskiego przez Wisłę w Toruniu,  $L_{max} = 130$  m, 1934, widok dzisiejszy



Ryc. 8. Most przez Bug w Broku,  $L_{\max} = 88$  m, 1995



Ryc. 9. Kładka dla pieszych w Singapurze wzorowana na pętli DNA, Helix Bridge,  $L_{\max} = 280$  m, 2010

wyeliminowano rozciąganie pomostu w relatywnie długich strefach występowania ujemnych momentów zginających [7].

- Można prognozować, że choć mosty o stalowych przęsłach kratownicowych będą, jak wspomniano, nadal budowane, to ich liczebność będzie ulegać zmniejszeniu na rzecz przęsł pełnościennych – z dźwigarami belkowymi lub skrzynkowymi. Podstawą tego stwierdzenia jest to, że w przypadku wymiany przęsł lub modernizacji obiektu ustroje kratownicowe są nierzadko zastępowane właśnie belkowymi. Przykłady takie można było odnotować także w naszym kraju. Ponadto rozpiętości kiedyś zarezerwowane, także w Polsce, dla przęsł kratownicowych obecnie są osiągalne w prostszych konstrukcyjnie ustrojach belkowych.
- Mosty kratownicowe mogą w przyszłości przybierać inne od tradycyjnych formy, bardzo wyrafinowane, oryginalne, budzące niekiedy raczej podziw niż zachwyt (por. rozdział 5), ale tylko na tym, zdaniem piszącego te słowa, może polegać postęp w ich konstruowaniu, a nie na nowych, rekordowych rozpiętościach przęsł. Zwiastuny takich nowatorskich rozwiązań można znaleźć już obecnie, co dotyczy zwłaszcza kładek dla pieszych. Jeden z przykładów, obiekt wzorowany na pętli DNA, pokazano na rycinie 9.

### 3.4. Mosty o konstrukcji łukowej

Mosty o konstrukcji łukowej były budowane od ponad dwóch tysięcy lat. W czasach nowożytnych wzorowano je na kamiennych mostach wznoszonych przez starożytnych Rzymian, zanim ukształtowane zostały ich współczesne formy konstrukcyjne. Są one budowane głównie z betonu lub ze stali i dlatego tylko obiekty wykonane z tych dwóch podstawowych tworzyw konstrukcyjnych będą tu rozpatrywane.

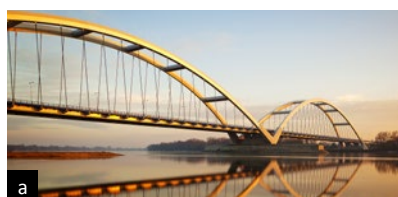
Pierwsze trzy rekordowe w skali świata i Polski rozpiętości przęsł łukowych zestawiono w tabelicy 3. Mosty zajmujące pierwsze miejsce w tym rankingu pokazano na rycinach 10 i 11.

Na podstawie danych zestawionych w tabelicy 3 i ogólnej obserwacji rozwoju mostów łukowych można sformułować następujące komentarze.

- Obiekty o rekordowych w skali świata rozpiętościach przęsł łukowych wybudowano w ciągu ostatnich dwóch dekad. Jak wskazują rankingi, na 10 pierwszych pod tym względem obiektów stalowych aż sześć powstało w Chinach w latach



Ryc. 10. Rekordowe łukowe przęsła: a) stalowe – most Chaotianmen,  $L_{\max} = 552$  m, 2009, b) betonowe – most Beipanjiang Qinglong,  $L_{\max} = 445$  m, 2016, kolejowy



Ryc. 11. Rekordowe przęsła łukowe w Polsce: a) most im. Gen. Elżbiety Zawackiej przez Wisłę w Toruniu,  $L_{\max} = 270$  m, 2013, b) most przez dolinę Kameszniczy w Milówce,  $L_{\max} = 130,84$  m, 2006

Tab. 3. Rekordowe rozpiętości mostowych przęsł łukowych – nazwa, kraj, rozpiętość, rok ukończenia

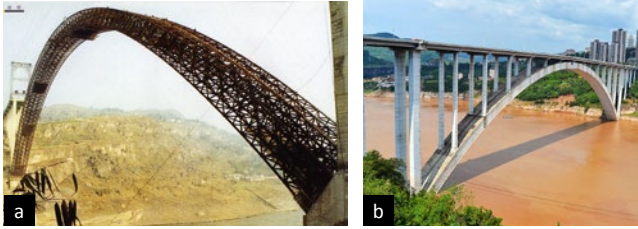
Świat		Polska	
Przęsła stalowe	Przęsła betonowe	Przęsła stalowe	Przęsła betonowe
Chaotianmen, Chiny, 552 m, 2009	Beipanjiang Qinglong, Chiny, 445 m, 2016	most im. Gen. Elżbiety Zawackiej przez Wisłę, Toruń, 270 m, 2013	most przez dolinę Kameszniczy, Milówka, 130,84 m, 2006
Lupu, Chiny, 550 m, 2003	Wanxian, Chiny, 425 m, 1997	most im. Jana Pawła II przez Wisłę*), Puławy, 212 m, 2008	most graniczny przez Odrę, Świecko, 82,30 m, 1996
New River George, 518 m, 1977	Nanpanjiang, Chiny, 415 m, 2015	most przez Kanał Pauzeński koło Ostródy*), 200 m, 2017	most przez Sofę, Kobiernice, 68 m, 1961

\*) pomost betonowy – konstrukcja zespolona stalowo-betonowa

2005–2017, a na 10 obiektów betonowych również sześć wybudowano w tym kraju w latach 1995–2016 [8]. Poza Chinami największe przęsło stalowe zrealizowano w USA jeszcze w 1977 r. – most New River George z łukiem stalowym o rozpiętości 518 m (trzecie miejsce w światowym rankingu), natomiast największe łukowe przęsło betonowe wybudowano w 1980 r. w Chorwacji – most Krk-1, 390 m (czwarte miejsce w światowym rankingu). Łukowe mosty chińskie zarówno stalowe, jak i betonowe mają więc mierzalną przewagę pod względem liczby i rozpiętości nad mostami w innych krajach świata.

- W odniesieniu do dwóch rekordowych betonowych mostów chińskich (Beipanjiang Qinglong i Wnaxian) nie można nie zauważyć, że łuki są rodzajem stalowo-betonowej konstrukcji hybrydowej – łuk ukształtowany jest w postaci kratownicy z rur o przekroju okrągłym (w przypadku pierwszego z wymienionych obiektów wypełnionych betonem), która następnie została obetonowana (ryc. 12). Trudno więc te rekordowe mosty traktować jako wykonane z klasycznego żelbetu. Niemniej jednak powszechnie zaliczane są do obiektów betonowych.





Ryc. 12. Most Wanxian,  $L_{max} = 425$  m, 1997: a) samonośne zbrojenie łuku w formie kratownicy, b) widok ukończonego mostu

- Warto zauważyć, że zajmujący pierwsze miejsce w światowym rankingu betonowych mostów łukowych most Beipanjiang Qinglong jest obiektem kolejowym. Pozwala to przypuszczać, że ten światowy rekord zostanie w najbliższej przyszłości pobity przez obiekt drogowy. Prawie na pewno stanie się to w którymś z państw azjatyckich, najprawdopodobniej też w Chinach właśnie, i będzie to również obiekt o łuku hybrydowym. Natomiast trudno spodziewać się, żeby w najbliższych latach beton pokonał stal, jak ma to miejsce w mostach belkowych (por. podrozdział 3.2).
- W stalowych mostach łukowych rekordowe są obiekty z jazdą dołem (lub częściowo pośrednią), natomiast w betonowych mostach łukowych – z jazdą górą. Trudno się spodziewać, aby z technicznego punktu widzenia sytuacja ta została odwrócona.
- Główne światowe tendencje rozwojowe wymienione poprzednio znajdują też – zachowując oczywiście wszelkie proporcje co do skali obiektów – swoje odzwierciedlenie w mostownictwie krajowym. Mosty o największych rozpiętościach łuków wybudowano w Polsce w latach 1996–2017, czyli w ostatnich dwóch dekadach. Trzecie miejsce w krajowym rankingu łukowych mostów betonowych zajmuje nadal most przez Sołę w Kobiernicach, wybudowany jeszcze w 1961 r. Stal ma wyraźną przewagę rozpiętości łuków nad betonem (por. tab. 3). Przewaga ta zostanie być może stosunkowo niedługo utrwalona, bo planowany most Krasieńskiego przez Wisłę w Warszawie będzie mieć prawdopodobnie łuk o rozpiętości 280 m (ryc. 13).
- Niezależnie od pogoni za rekordowymi rozpiętościami przęsł mostów łukowe, zwłaszcza betonowe, będą nadal budowane, a to przede wszystkim ze względu na ich walory estetyczne, co dotyczy zwłaszcza obiektów z jazdą górą. Sprzyja temu także rozwój technologii wykonawczej, występujący szczególnie silnie w realizacji łuków betonowych. Bardzo spektakularny przykład postępu w tym zakresie pokazano na rycinie 14. Na rycinie 15 przedstawiono z kolei jednoczesne nawisowe betonowanie łuku i pomostu, co obrazuje bardzo rozwiniętą technologię bezrusztowaniowego wykonywania betonowych mostów łukowych (por. też rozdział 7).
- Reasumując, stwierdzić można, że rozpiętości łuków mostowych zarówno betonowych, jak i stalowych mogą jeszcze na świecie wzrastać, choć o stosunkowo niewiele. W odniesieniu do Polski można uznać, że łuki stalowe o rozpiętości 300 m i łuki betonowe o rozpiętości 200 m stanowią będą racjonalny kres rekordowych osiągnięć w skali kraju – nie ma po prostu potrzeby budowania dłuższych. Natomiast mosty łukowe o mniejszych od rekordowych rozpiętościach będą na świecie



Ryc. 13. Planowany most Krasieńskiego przez Wisłę w Warszawie



Ryc. 14. Postęp w budowaniu betonowych łuków mostowych: a) most autostradowy, Jena, Niemcy, 1937, pełne rusztowanie pod krzywizną łuku, b) most Maslenica, Chorwacja,  $L_{max} = 200$  m, 1997, nawisowe betonowanie łuku



Ryc. 15. Most Ikeda – Hesokko, Japonia,  $L_{max} = 200$  m, 2000: a) jednoczesne betonowanie nawisowe łuku oraz pomostu, b) ukończony most

dość powszechnie jeszcze budowane, głównie z uwagi na ich wysoką estetykę (zwłaszcza tych z jazdą górą). W Polsce z uwagi choćby na ukształtowanie kraju mosty łukowe będą budowane dość incydentalnie – na obszarach górskich będą to obiekty z jazdą górą, a na obszarach nizinnych głównie z jazdą dołem.

### 3.5. Mosty o konstrukcji podwieszanej

Pierwsze trzy rekordowe w skali świata i Polski rozpiętości przęsł mostów podwieszonych zestawiono w tablicy 4. Mosty zajmujące pierwsze miejsce w tym rankingu pokazano na rycinach 16 i 17.

Tab. 4. Rekordowe rozpiętości mostowych przęsł o konstrukcji podwieszanej – nazwa, kraj, rozpiętość, rok ukończenia

Świat		Polska	
Przęsła stalowe	Przęsła betonowe	Przęsła stalowe	Przęsła betonowe
most Rosyjski, Władywostok, Rosja, 1104 m, 2012	Skarnsundet, Norwegia, 530 m, 1991	most Solidarności przez Wisłę, Płock, 375 m, 2005	most Rędziański przez Odrę, Wrocław, 2 x 256 m, 2011
Hutong, Chiny, 1092 m, 2018 (2019)	Barrios de Luna, Hiszpania, 440 m, 1983	most Siekierkowski*) przez Wisłę, Warszawa, 250 m, 2002	most Milenijny przez Odrę, Wrocław, 153 m, 2004
Sutong, Chiny, 1088 m, 2008	Skytrain, Kanada, 340 m, 1990	most im. Tadeusza Mazowieckiego*) przez Wisłok, Rzeszów, 240 m, 2015	–

\*) przęsła o konstrukcji zespolonej stalowo-betonowej



Ryc. 16. Rekordowe przęsła podwieszane: a) stalowe – most we Władywostoku,  $L_{max} = 1104$  m, 2012, b) betonowe – most Skarnsundet,  $L_{max} = 530$  m, 1991





Ryc. 17. Rekordowe przęsła podwieszono w Polsce: a) stalowe – most Solidarności przez Wisłę, Płock,  $L_{\max} = 375$  m, 2005, b) betonowe – most Rędzński przez Odrę, Wrocław,  $L_{\max} = 2 \times 256$  m, 2011

Na podstawie danych zestawionych w tablicy 4 i ogólnej obserwacji rozwoju mostów podwieszonych można sformułować następujące komentarze.

- Mosty podwieszono należą już od kilku dekad do najbardziej rozwojowych form konstrukcyjnych zarówno w odniesieniu do zwiększania rozpiętości przęseł, jak i w dążeniu do oryginalnych rozwiązań architektonicznych (por. rozdział 5). Na ogół mało znane informacje historyczne na temat mostów o konstrukcji podwieszonoj na pochyłych, prostych ciągach znaleźć można w pracy [9] oraz monografii [10]. Tu tylko warto nadmienić, że mosty takie budowano już w pierwszych dwóch dekadach XIX w., ale ze względu na ich dużą katastrofogenność i pod wpływem wysoce krytycznej oceny znakomitego uczonego i inżyniera Claude'a Louisa Naviera (1785–1836) zaniechano budowania mostów podwieszonoj aż na ok. 120 lat. Ich wykonywanie wznowiono dopiero na początku lat 50. XX w. za sprawą Fritza Dischingera (1887–1953) – pierwszy podwieszono most stalowy (ryc. 18a), oraz Alberta Caquota (1881–1976) – pierwszy podwieszono most betonowy (ryc. 18b). Wprowadzili oni wstępny naciąg prostych kabli, czego nie stosowano w pierwotnych rozwiązaniach [11].
- Poczynając od wspomnianych lat 50. XX w., w ciągu następnego dekad, zwłaszcza od lat 90. do dziś, obiekty mostowe o konstrukcji podwieszonoj zarówno o przęsłach stalowych, jak i betonowych są powszechnie budowane, i to w różnych skalach – od stosunkowo niewielkich kładek dla pieszych (np. nad ulicami w miastach lub autostradami) do bardzo dużych obiektów przez rozległe przeszkody wodne lub lądowe. Jest to tendencja światowa, mająca także odzwierciedlenie w polskim mostownictwie, zwłaszcza od 2000 r. W latach 2000–2015 wybudowano w naszym kraju, nie licząc innych obiektów, dziewięć mostów podwieszonoj o rozpiętościach głównych przęseł od 143 m (most przez Dunajec w Starym Sączu, 2008)



Ryc. 18. Pierwsze współczesne mosty podwieszono: a) stalowy most Strömsund, Szwecja, projekt Fritza Dischingera,  $L_{\max} = 182$  m, 1953, b) betonowy most Donzère – Montdragon, Francja, projekt Alberta Caquota,  $L_{\max} = 81$  m, 1952

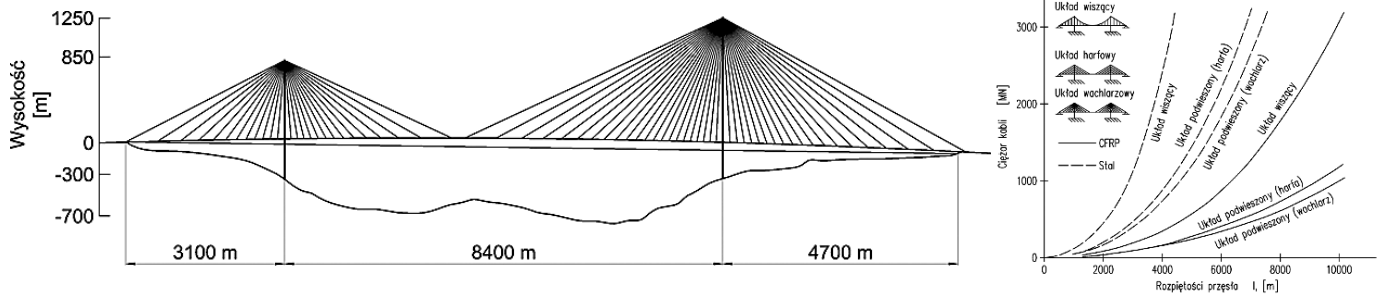
do 375 m (most Solidarności przez Wisłę w Płocku) [12, 13], przy czym dwa obiekty są całkowicie betonowe (most Milejny we Wrocławiu, 153 m, 2004 i przedstawiany już most Rędzński), jeden całkowicie stalowy (most Solidarności), natomiast w pozostałych sześciu pylonach są betonowe, a przęsła o konstrukcji zespolonej stalowo-betonowej. Ze względu na występujące w Polsce racjonalne potrzeby maksymalne rozpiętości przęseł nowo projektowanych mostów podwieszonoj nie powinny przekraczać w skrajnym przypadku 400 m. W większości wystarczają przęsła do 250–300 m, a nawet mniej. Dlatego betonowe pylony i stalowo-betonowe przęsła powinny nadal dominować. Osiągnięte dotychczas rekordy krajowe są raczej nie tyle trudne do pobicia, co zupełnie wystarczające ze względów technicznych i ekonomicznych. Ale może będzie inaczej – czas pokaże.

- W światowym mostownictwie rekordy rozpiętości przęsłowych mostów podwieszonoj są już bardzo wysrubowane. Zapewne będą podjęte działania, aby rekordy te nieco poprawić. Może to dotyczyć zwłaszcza mostów betonowych – w ich obszarze rekord (530 m) jest już stosunkowo stary, bo ustanowiony w 1991 r., a więc już prawie 30 lat temu. Rekord ten będzie niebawem wyrównany, bo w 2019 r. zostanie ukończony, zaprojektowany przez Chińczyków, Atlantic Bridge przez Kanał Panamski (ryc. 19).



Ryc. 19. Atlantic Bridge przez Kanał Panamski,  $L_{\max} = 530$  m, 2019 (w budowie)

Ustanowieniu nowego rekordu może sprzyjać burzliwy w ostatnich latach rozwój technologii betonu i dotychczasowe zastosowania konstrukcyjne betonów nowej generacji. W stali też istnieje jeszcze potencjalna możliwość poprawienia rekordu mostu Rosyjskiego (1104 m). Te uwagi dotyczą jednak konsekwentnie udoskonalanych, ale w sensie ogólnym znanych i szeroko stosowanych materiałów konstrukcyjnych – betonu i stali. Natomiast rewolucyjny skok rozpiętości może nastąpić za sprawą nowych materiałów kompozytowych – polimerów z włóknami (por. rozdział 6). Bardzo spektakularnym tego przykładem są studia projektowe nad możliwością budowy przeprawy mostowej przez Cieśninę Gibraltarską. W największym miejscu jest ona bardzo głęboka. To skłoniło projektantów do wyznaczenia wariantów tras dłuższych, ale omijających głębie cieśniny [14]. Natomiast jak wykazano w publikacji [15], gdyby zamiast najwyższej nawet jakości stali zastosować w konstrukcji kompozyty polimerowe, to możliwe byłoby pokonanie cieśniny w jej największym miejscu, przy czym środkowe przęsło mogłoby mieć niewiarygodną rozpiętość 8400 m (por. też podrozdział 3.7), skrajnie zaś 3100 m i 4700 m (ryc. 20a). Przewagę cięgien



Ryc. 20. Projekt całkowicie kompozytowego mostu przez Cieśninę Gibraltarską: a) widok boczny, b) zużycie materiału na cięgna w zależności od ich materiału, układu konstrukcyjnego i rozpiętości przęsła [15]

kompozytowych nad stalowymi w odniesieniu do wzrostu ich ciężaru w zależności od rozpiętości przęsła pokazano na ryc. 20b.

- Jak już sygnalizowano, temat mostów podwieszonych będzie jeszcze poruszony w aspektach dotyczących kierunków C i D rozwoju mostownictwa (rozdziały 5 i 6 w 2. części artykułu). W tym jednak miejscu można skonkludować, że mosty o takiej konstrukcji nie wyczerpały jeszcze możliwości dalszego bicia rekordów rozpiętości przęsłowych. Wymagać to będzie stałego rozwijania metod analiz i badań dotyczących głównie dynamiki, szczególnie zaś aerodynamiki. Badania takie są rozwijane także z myślą o mostach wiszących (por. podrozdział 3.7).
- Podobnie do poprzednio przedstawionych mostowych układów konstrukcyjnych, również w przypadku obiektów podwieszonych kraje azjatyckie wyraźnie górują nad resztą świata pod względem rozpiętości przęsłowych. W pierwszej dziesiątce takich mostów, mających przęsła od 806 m (most Wuhu-2, Chiny, 2017) do 1104 m (przedstawiony już most Rosyjski, 2012), wybudowanych w latach 1995–2018, aż siedem jest w Chinach, a po jednym w azjatyckiej części Rosji, Japonii (Tatara, 890 m, 1999) i Francji (pont de Normandie, 856 m, 1995). Można sądzić, że kraje azjatyckie będą tę rekordową tendencję utrzymywać w następnych latach.
- W Polsce mostowe obiekty podwieszane będą również zapewne budowane, i te mniejsze, i te duże. Niektórzy jednak podnoszą argument, że stosunkowo wiele mostów o takiej konstrukcji, które w ostatnich latach wybudowano w naszym kraju, może powodować pewien przesyt i trzeba poszukiwać oryginalnych rozwiązań obiektów o innym układzie strukturalnym. Zobaczmy, jak będzie...

### 3.6. Mosty o konstrukcji extradosed

Mosty extradosed (nie ma jak dotychczas dobrego odpowiednika tej nazwy w języku polskim) należą do stosunkowo najnowszych konstrukcji – ich koncepcję opracował we Francji Jacques Mathivat w 1988 r., a pierwszy taki obiekt wybudowano w Japonii w 1994 r. (ryc. 21).

Najbardziej ogólnie rzecz ujmując, w koncepcji tej chodzi o bardziej efektywne wykorzystanie kabli sprężających przez zwiększenie ich mimośrodów. Z tego powodu odróżnić można dwa podstawowe rodzaje tych konstrukcji – z kablami pod pomostem (zwiększanie ich mimośródów w strefach momentów dodatnich) oraz z kablami nad pomostem (zwiększanie ich mimośródów w strefach momentów ujemnych, przypodporowych). Pierwszy z wymienionych rodzajów jest stosunkowo rzadziej stosowany, choć w tym układzie strukturalnym budowane są



Ryc. 21. Pierwszy most o konstrukcji extradosed – most Odawara, Japonia,  $L_{\max} = 122$  m, 1994

mosty i stalowe, i betonowe (rzadziej). Drugi z rodzajów jest relatywnie częściej stosowany, niemal wyłącznie jako obiekty betonowe. Jego cechą charakterystyczną jest niski pylon, znacznie niższy niż w mostach podwieszonych. Kable są tak samo proste i ukośne, znacznie jednak częściej kotwione są obustronnie tylko w pomostach, a przez pylony przechodzą przez tzw. siodła. Niektórzy traktują te konstrukcje jako sprężone kablami, których trasy wyprowadzone są w strefach przypodporowych poza obrys przekroju przęsła, czyli zgodnie z pierwotną koncepcją Jacques'a Mathivata. Mosty extradosed są obecnie dość często budowane na świecie, także Polska ma znaczące osiągnięcia we wznoszeniu takich mostów. Znaczenie tego rozwiązania konstrukcyjnego polega na tym, że jak wskazują różne oszacowania, w zakresie rozpiętości przęsłowych do ok. 200 m są one po prostu tańsze od mostów podwieszonych [16].

Szczegółowy opis różnego rodzaju wariantów mostów extradosed znaleźć można w stosunkowo już licznych publikacjach krajowych, np. [17, 18, 19]. Zwrócono w nich także uwagę na odmienną zasadę projektowania kabli w mostach extradosed w porównaniu z mostami podwieszonymi. To jest właśnie jedna z istotnych cech odróżniających oba te rodzaje konstrukcji.

W niniejszym opracowaniu ograniczymy się do betonowych mostów extradosed z kablami nad pomostem; jest to, jak już wspomniano, relatywnie najczęściej stosowany układ konstrukcyjny, także w naszym kraju.

Pierwsze trzy rekordowe w skali świata i Polski rozpiętości przęsł mostów extradosed zestawiono w tablicy 5. Mosty zajmujące pierwsze miejsce w tym rankingu pokazano na rycinach 22 i 23.



Tab. 5. Rekordowe rozpiętości mostowych przęseł o konstrukcji extradosed – nazwa, kraj, rozpiętość, rok ukończenia<sup>1)</sup>

Świat		Polska
Mosty o przęsłach stalowych lub stalowo-betonowych	Mosty o przęsłach betonowych	Mosty o przęsłach betonowych
Wuhu, Chiny, 312 m, 2000 (dwupoziomowy, drogowo-kolejowy)	Kinmen, Taiwan, 280 m, 2020 (w budowie)	most w ciągu DK3 w Ostródzie, 206 m, 2017 (rekord Europy)
Kisogawa, Japonia, 275 m, 2001	Jiayue, Chiny, 250 m, 2010	most przez Wisłę w Kwidzynie, 204 m, 2013
Ibigawa, Japonia, 271,5 m, 2001	Qiancao, Chiny, 248 m, 2012	most nad doliną Kolejówki, Mszana, 130 m, 2014

<sup>1)</sup> Autor dziękuje Koledze, dr. hab. inż. Wojciechowi Trochymiakowi, za pomoc w zebraniu danych.



Ryc. 22. Rekordowe przęsła mostów extradosed: a) stalowe – most Wuhu,  $L_{max} = 312$  m, 2000, b) betonowe – most Jiayue,  $L_{max} = 250$  m, 2010



Ryc. 23. Rekordowe przęsła mostów extradosed w Polsce: a) most w ciągu DK16 w Ostródzie,  $L_{max} = 206$  m, 2017, b) most przez Wisłę w Kwidzynie,  $L_{max} = 204$  m, 2013

Na podstawie danych zestawionych w tabelicy 5 i ogólnej obserwacji rozwoju mostów extradosed można sformułować następujące komentarze.

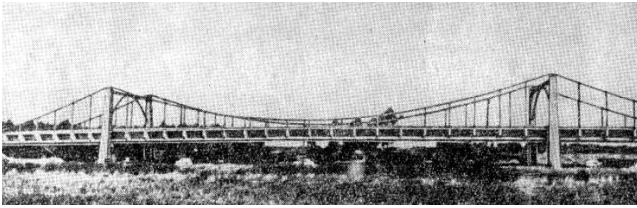
- Mosty extradosed są dość powszechnie budowane w wielu krajach świata, także w Polsce, i to w szerokim zakresie skali obiektów i rozpiętości przęsłowych – od stosunkowo małych (np. wiaduktów nad autostradami) do dużych (np. przez szerokie przeszkody wodne). Są to konstrukcje znacznie już zaawansowane, o czym świadczy to, że rekordowy stalowy most Wuhu ( $L_{max} = 312$  m, ryc. 22) jest obiektem drogowo-kolejowym, z pomostem dwupoziomowym. Oznacza to, że w tej klasie mostów, zwłaszcza o konstrukcji stalowej, są jeszcze pewne rezerwy uzyskania dalszych rekordów rozpiętości przęseł, co dotyczy przede wszystkim obiektów *stricte* drogowych.

- Rekordowe w skali świata osiągnięcie przęseł betonowych extradosed (most Jiayue,  $L_{max} = 250$  m) ustępuje (jak długo jeszcze?) obiektom ze stali. Można jednak uważać, że to obiekty betonowe są bardziej naturalnym rozwiązaniem, w sposób niemal bezpośredni nawiązującym do betonu sprężonego. Tendencja do zwiększania rozpiętości przęseł mostów extradosed już jest widoczna – w budowie jest obiekt o przęśle 280-metrowym (por. tab. 5). To „tylko” o 32 m mniej od rekordu stalowego. Może więc i w tej klasie mostów beton pokona stal, jak w przypadku mostów belkowych (por. podrozdział 3.2).
- Wyraźnie obserwowalna jest także tendencja do budowy długich przepraw mostowych z udziałem wieloprzęsłowych mostów extradosed (por. rozdział 4). Jako przykład można tu podać ukończoną w 2017 r. przeprawę mostową przez Ganges w Indiach, mającą długość 4,35 km, w ciągu której wybudowany jest most Arrach Chapra, mający aż 16 przęseł extradosed o rozpiętości 120 m każdy. Również w Indiach projektowana jest przeprawa o długości 9,75 km z 66 mostami extradosed o przęsłach o rozpiętości 150 m każde.
- Znów nie sposób nie zauważyć, że wszystkie wymienione rekordy światowe dotyczą obiektów wybudowanych w ostatnich latach w krajach azjatyckich. W tej części świata postęp w mostownictwie, w tym przypadku w odniesieniu do mostów extradosed, jest szczególnie spektakularny.
- Z satysfakcją należy odnotować, że Polska ma już bardzo duże osiągnięcia w projektowaniu i budowie mostów extradosed. Dwa największe obiekty (por. tab. 5) to dwa kolejne rekordy Europy – most w Kwidzynie, 204 m, 2013 [20, 21, 22] oraz most w Ostródzie, 206 m, 2017. Jest zatem czym się pochwalić. Warto zauważyć, że most w Kwidzynie dobrze odpowiada wpisywaniu mostów extradosed w długie przeprawy mostowe (por. rozdział 4). Ta w Kwidzynie ma długość 1862,50 m i zajmuje szóste miejsce w rankingu najdłuższych tras mostowych w naszym kraju [12]. Także pod tym względem, zachowując wszelkie proporcje porównawcze, rozwój polskiego mostownictwa odpowiada tendencjom światowym.
- Można przypuszczać, że budowanie obiektów mostowych o konstrukcji extradosed będzie nadal w Polsce rozwijane, i to w szerokim przedziale rozpiętości przęsłowych. Musi to oczywiście być umotywowane względami technicznymi i ekonomicznymi, ale zdobyta wiedza i doświadczenie oraz imponujące osiągnięcia w realizacji tej klasy mostów powinny być u nas mądrze kontynuowane.

### 3.7. Mosty wiszące

Mosty wiszące budowano już od bardzo dawna. Ich historia jest interesująca. Pewne niepowodzenia w konstruowaniu i eksploatacji były szczególnym w tej klasie mostów źródłem postępu – wiedzy teoretycznej i doświadczeń praktycznych. Tu jednak ograniczymy się do współczesnych mostów wiszących i rozwoju ich konstruowania w ostatnich kilku dekadach.

Mosty wiszące dzierżą bezwzględne rekordy rozpiętości przęseł. Dotyczy to głównie konstrukcji stalowych. Nie jest jednak prawdą, że nie budowano mostów wiszących jako betonowych. W latach 50. XX w. prof. Daniel Vandepitte zaprojektował dwa betonowe mosty wiszące, które zrealizowano w Belgii. Ten



Ryc. 24. Betonowy most wiszący na drodze z Gandawy do Brukseli,  $L_{\max} = 100$  m, 1959 [22]

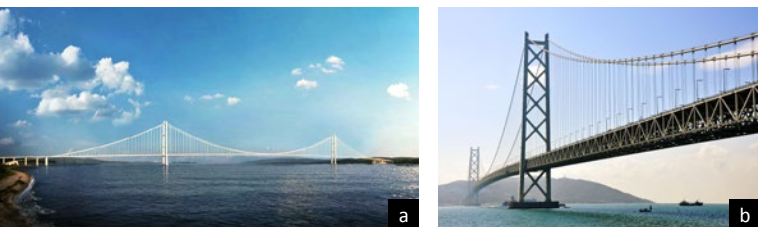
największy, zlokalizowany w Mariakerke, na drodze z Gandawy do Brukseli, o przęsłach 40 m + 100 m + 40 m, pokazano na rycinie 24. W odróżnieniu od stalowych mostów wiszących główny kabel nośny jest zakotwiony w przęsle, aby uzyskać za darmo jego sprężenie poziomą składową siłą w kablu.

Betonowe mosty wiszące są jednak konstrukcjami już przebrzmiałymi; stanowią interesujący, choć krótkotrwały fragment historii rozwoju mostownictwa. Według wiedzy autora tego opracowania, od końca lat 50. nie wybudowano już żadnego takiego obiektu. Dlatego przedstawione tu będą wyłącznie stalowe mosty wiszące, stale budowane i udoskonalane.

W tablicy 6 przedstawiono największe na świecie pod względem rozpiętości mosty wiszące. Dwa pierwsze, stalowe, pokazano na rycinie 25.

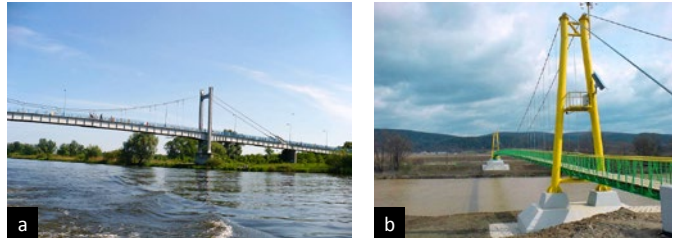
Tab. 6. Rekordowe rozpiętości przęseł mostów wiszących – nazwa, kraj, rozpiętość, rok ukończenia

Świat	
Przęsła stalowe	Przęsła betonowe
most Çanakkale Turcja, cieśnina Dardanele, 2023 m, 1915, 2022 (w budowie)	most w Mariakerke, Belgia, 100 m, 1959
Akashi – Kaikyo, Japonia, 1991 m, 1998	most w Merelbeke, Belgia, 56 m, 1951
Yangsigang, Chiny, 1700 m, 2019 (w budowie)	–
Xihoumen, Chiny, 1650 m, 2009	–
Wschodni Wielki Bełt, Dania, 1624 m, 1998	–



Ryc. 25. Mosty wiszące o rekordowych rozpiętościach przęseł: a) most Çanakkale,  $L_{\max} = 2023$  m, 1915, 2022 (w budowie, wizualizacja), b) most Akashi – Kaikyo,  $L_{\max} = 1991$  m, 1998 (fot. K. Flaga)

W odróżnieniu od poprzednich tablic nie umieszczono w niej mostów wiszących w Polsce, a to po prostu dlatego, że choćby z uwagi na nasze warunki terenowe nie ma potrzeby budowania obiektów drogowych o takiej konstrukcji, nie wspominając nawet o obiektach kolejowych. Słynny i piękny most Grunwaldzki we Wrocławiu z 1910 r., z przęsłem o rozpiętości 114 m, nie jest



Ryc. 26. Polskie przykłady wiszących kładek dla pieszych: a) kładka Zwierzyniecka we Wrocławiu,  $L_{\max} = 80$  m, 1976, b) kładka przez San w Witrylowie,  $L_{\max} = 150$  m, 2011, wizualizacja

klasycznym mostem wiszącym z kablem nośnym, bo kabel ten zastąpiony jest przez płaskie, kilkuwarstwowe pasma z blach. Jest natomiast w Polsce kilka wiszących kładek dla pieszych z kablami nośnymi. Dwa przykłady pokazano na rycinie 26.

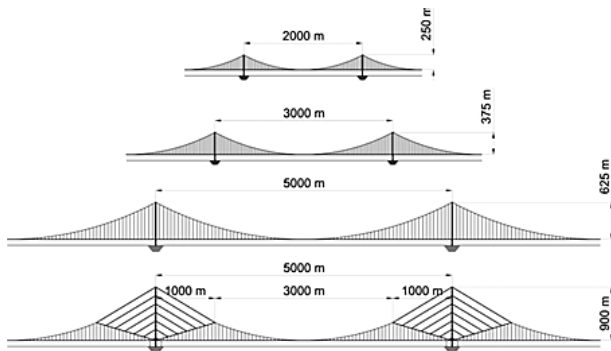
Na podstawie danych zestawionych w tablicy 6 i ogólnej obserwacji rozwoju mostów wiszących można sformułować następujące komentarze.

- Światowy ranking projektowania i realizacji mostów wiszących [8], obejmujący 30 obiektów o najdłuższych przęsłach, wykazuje, że aż 22 mosty położone są właśnie w Azji (w Chinach 15, w Japonii dwa, w tym rekordowy, w Południowej Korei dwa, w Turcji trzy). Najdłuższe „przęsło europejskie”, most przez Wielki Bełt, 1624 m, zajmuje czwarte miejsce, zaś przez wiele lat rekordowy w skali świata brytyjski Humber Bridge (1410 m) jest obecnie dopiero dziewiąty. Mosty w USA – Verrazano – Narows (1298 m, 1964) i Golden Gate (1280 m, 1937) – są teraz na 14. i 15. miejscu rankingu.
- Projektowanie i wykonawstwo mostów wiszących osiągnęło obecnie bardzo wysoki poziom. Stało się tak przede wszystkim za sprawą rozwoju zaawansowanych badań doświadczalnych i analiz teoretycznych. Od czasu pamiętnej i wielokrotnie opisywanej katastrofy mostu Tacoma w USA 7 listopada 1940 r. nie wystąpiła na świecie już żadna katastrofa mostu wiszącego spowodowana efektami aerodynamicznymi. Katastrofa ta dała asumpt do m.in. rozwinięcia badań modeli mostów wiszących w tunelach aerodynamicznych. Badania takie szybko stały się powszechne i obecnie obejmują także inne rodzaje konstrukcji mostowych (np. mosty podwieszane) o dużej skali.
- Mosty wiszące nie wyczerpały jeszcze możliwości zwiększania rozpiętości przęsłowych. Obecnie budowany jest w Turcji most (por. tab. 6), który będzie nowym rekordem świata – 2023 m. Rekord dotychczasowy zostanie więc pobity o 33 m 24 lata po ustanowieniu poprzedniego. Obecnie królujący jeszcze most Akashi – Kaikyo był jednak znacznie większym osiągnięciem. Ukończony w 1998 r., położony na obszarach silnie sejsmicznych, nawiedzanych jeszcze przez huragany i ulewne deszcze, swoim przęsłem o rozpiętości 1991 m (dokładnie 1990,80 m) pobił rekordowe od 1981 r. przęsło mostu Humber (1410 m) aż o 581 m.
- O dalszych możliwościach zwiększania rozpiętości mostów wiszących świadczą zamierzenia realizacyjne i prowadzone prace planistyczne. Z bardzo zaawansowanego od strony projektowej mostu przez Cieśninę Mesyńską zrezygnowano, głównie chyba ze względów finansowych. Projekt przewidywał przęsło o rozpiętości 3300 m. Są jednak doniesienia o projektowaniu mostu Hafast w Norwegii, którego główne przęsło ma mieć 4000 m. W planowanym moście



przez Cieśninę Gibraltarską w niektórych wariantach przewidywane są przęsła o długości nawet 5000 m. Możliwość w tym zakresie zwiększają jeszcze nowe, niekonwencjonalne materiały konstrukcyjne, głównie kompozyty (por. ryc. 20).

- Klasyczne formy mostów wiszących są urozmaicane. Spotykane są np. mosty jednopylonowe lub z jedną tylko centralną płaszczyzną kabla nośnego i wieszaków, pionową lub ukośną (por. rozdział 5). Jedną z form jest także hybryda mostu wiszącego i podwieszonoego, której przykład dotyczący mostu przez Cieśninę Gibraltarską pokazano na rycinie 27.



Ryc. 27. Projekty konstrukcji mostu przez Cieśninę Gibraltarską

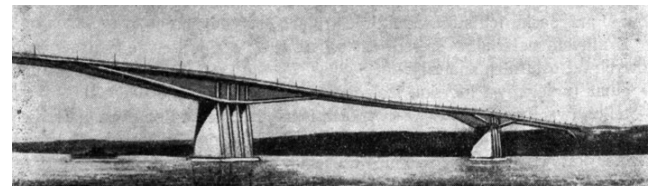
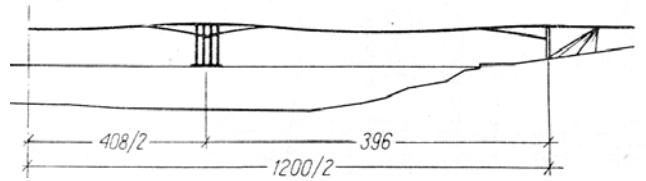
- Niczego nie można przesądzać w sposób zdecydowany, ale są podstawy, aby przypuszczać, że mostowe konstrukcje wiszące w Polsce nie będą rozwijane jako obiekty drogowe, przeznaczone do ruchu pojazdów samochodowych. Jeżeli już będą stosowane, to raczej jako kładki dla pieszych, urozmaicające dzięki swej atrakcyjności wizualnej tereny rekreacyjne lub miejskie.

### 3.8. Mosty wstęgowe

Mosty wstęgowe, podobnie do innych układów konstrukcyjnych, mają długą historię. Obecnie są budowane przede wszystkim jako kładki pieszko-jezdne (ale raczej dla rowerzystów) na terenach rekreacyjnych oraz w miastach zarówno jako konstrukcje jednoprzęsłowe, jak i ciągłe, kilkuprzęsłowe. Mają atrakcyjną formę wizualną.

Na podstawie obserwacji rozwoju mostownictwa, w tym przypadku w zakresie mostów wstęgowych, można sformułować następujące uwagi.

- Największy dotychczas, ale niezrealizowany projekt mostu wstęgowego przeznaczonego do ruchu taboru drogowego przedstawił, jak można sądzić, Ulrich Finsterwalder (1897–1988), który to rozwiązanie konstrukcyjne zgłosił jeszcze w latach 60. XX w. na międzynarodowy konkurs na pierwszy most przez cieśninę Bosfor w Stambule (ryc. 28). Był to projekt jak na ówczesne (i nie tylko ówczesne) bardzo śmiały. Wystarczy nadmienić, że grubość wstęgi (pomostu) była równa tylko 0,30 m, co przy rozpiętości 408 m daje niezwykle niską wartość  $h/l = 1/1360$  [23]. Generalnie cechą charakterystyczną wstęgowych obiektów mostowych jest bardzo mała smukłość przęsła, nieosiągalna przy stosowaniu innych rozwiązań konstrukcyjnych. Jedną z pierwszych kładek, wybudowana w Freiburgu w Niemczech w 1970 r. (ryc. 29), o przęsłach ciągłych o rozpiętości 25,50 m + 30,00 m + 25,50 m, ma grubości płyty pomostu równą 0,25 m, co daje smukłość  $h/l_{max} = 1/120$ .

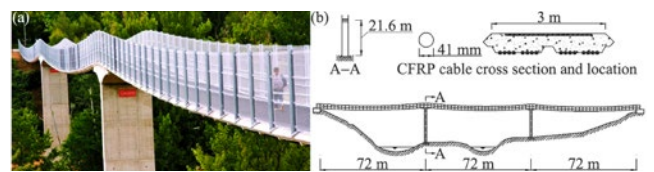


Ryc. 28. Projekt konkursowy Ulricha Finsterwaldera na pierwszy most przez Bosfor [23]

- Mosty wstęgowe budowane są w znakomitej większości przypadków jako obiekty betonowe, przy czym pomost z betonu „otula” napięte kable stalowe lub już niekiedy kompozytowe (ryc. 30, por. też rozdział 6).
- Współczesne wstęgowe kładki dla pieszych osiągają już dość znaczne rozpiętości przęsłowe. Jako przykład pokazano na rycinie 32 kładkę w San Diego w USA z przęsłami 3 x 100,9 m. W Natalu w Afryce oddano do użytku w 2007 r. jedyną do tego czasu (betonową) kładkę dla pieszych o rozpiętości przęsła aż 150 m (ryc. 33) [24]. Absolutną rekordzistką, według wiedzy piszącego te słowa, jest turystyczna, jednoprzęsłowa kładka w Szwajcarii, pokazana na rycinie 34 ( $L = 494$  m). Ma ona jednak inny charakter od kładek służących na co dzień zwykłemu ruchowi pieszemu i rowerowemu.



Ryc. 29. Wstęgowa kładka dla pieszych we Freiburgu, Niemcy, 1970



Ryc. 30. Wstęgowa kładka dla pieszych Cuenca przez rzekę Jucar, Hiszpania, 2011, grubość płyty pomostu 0,25 m,  $h/l = 1/288$



Ryc. 31. Drewniana konstrukcja wstęgowa mostu przez kanał Men - Dunaj w pobliżu Essing, Niemcy, rozpiętości przęsła 30 m + 32 m + 73 m + 35 m = 192 m, 1987





Ryc. 32. Kładka dla pieszych przez jezioro Hodges, San Diego, USA,  $L_{\max} = 3 \times 100,9$  m, grubość pomostu 0,406 m,  $h/l = 1/249$ , 2009



Ryc. 33. Betonowa kładka wstęgowa przez rzekę Mkomaas, Natal, Afryka,  $L_{\max} = 150$  m, 2007



Ryc. 34. Charles Kuonen, Randa, Szwajcaria,  $L_{\max} = 494$  m, 2017

- Kładki dla pieszych stanowią w niektórych krajach (np. w Japonii) swoisty poligon doświadczalny do wprowadzenia nowych, niekonwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych. Tu podano jeden tylko przykład, inne zostaną jeszcze przedstawione dalej (por. rozdział 6).
- Stosunkowo duże osiągnięcia w budowie kładek wstęgowych mają nasi najbliżsi sąsiedzi, Czesi [25]. W Polsce wybudowano dotychczas jedną tylko wstęgową kładkę betonową – przez Rabę w Luboniu (ryc. 35), na której dopuszczony jest stały ruch samochodowy (klasy C według PN-85/S-10030), co należy do rzadkości [26, 27]. To bardzo udany, estetyczny i dobrze już znany obiekt. W październiku 2019 r. został ukończony drugi w Polsce tego rodzaju obiekt – jest to kładka dla pieszych przez Jezioro Bystrzyckie w Zagórzu Śląskim. To konstrukcja ciągła o dwóch przęsłach o rozpiętości 80 m i 22 m oraz łącznej długości 126 m (ryc. 36). Być może niebawem będą u nas budowane następne konstrukcje wstęgowe.
- Mosty wstęgowe, jak można sądzić, mają przed sobą przyszłość, choć raczej w zakresie małych lub co najwyżej średnich rozpiętości przęsłowych. Stanowią zapewne będą, co już sygnalizowano, konstrukcje innowacyjne, szczególnie pod

Ryc. 35. Kładka pieszo-jezdna przez Rabę w Luboniu,  $L_{\max} = 91,40$  m, rozpiętość w świetle 71,40 m,  $h/l = 1/150$ , 2011



względem zastosowań materiałów niekonwencjonalnych (por. rozdział 6). Będą także stanowić źródło rozwoju aerodynamiki mostowej w odniesieniu do obiektów większych rozpiętości (kładki turystyczne). Trudno jednak spodziewać się masowości budowania mostowych obiektów wstęgowych, niezależnie od stosowanych tworzyw konstrukcyjnych – betonu, stali, drewna lub kompozytów polimerowych. Te wszystkie uwagi dotyczą i świata, i Polski.

## Literatura

- [1] Bažant Z., Hubler M.H., Qiang Y.: *Excessive Creep Deflections: An Awakening*. „Concrete International” 2011, No. 8, pp. 44–46.
- [2] Radomski W.: *Kilka uwag o efektach pełzania w konstrukcjach mostowych z betonu sprężonego*. „Obiekty Inżynierskie” 2012, nr 2, s. 15–25.
- [3] Biliszczuk J., Machelski C., Onysyk J., Węgrzyniak M.: *Stan dużych mostów z betonu sprężonego wybudowanych w latach 1954–1975*. „Inżynieria i Budownictwo” 1996, nr 9, s. 516–519.
- [4] Obiegałka B.: *Mosty w Toruniu i ich budowniczy*. Fundacja Rozwoju Nauki w Zakresie Inżynierii Lądowej im. A. i Z. Wasiułyńskich. Warszawa 2017.
- [5] Chwaściński B.: *Mosty na Wiśle i ich budowniczy*. Fundacja Rozwoju Nauki w Zakresie Inżynierii Lądowej im. A. i Z. Wasiułyńskich. Warszawa 1997.
- [6] Niemierko A.: *Budowa mostów w Polsce 1995–2005*. „Drogownictwo” 2006, nr 2, s. 50–61.
- [7] Stańczyk A.: *Most przez Bug w Broku*. „Drogownictwo” 2017, nr 2, s. 71–74.
- [8] <http://bridge.aalto.fi/en/lomgspan.htm>
- [9] Billington D.P., Deodatis G.: *Form and aesthetics in cable-stayed bridges*. In: *Cable-stayed Bridges – Recent developments and their Future*. Ed. M. Ito et al. Elsevier Science Publishers B.V., 1991, pp. 35–55.
- [10] Biliszczuk J.: *Mosty podwieszane – projektowanie i realizacja*. Arkady. Warszawa 2005.
- [11] Radomski W.: *Katastrofy i awarie mostów a rozwój wiedzy budowlanej*. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna *Awarie budowlane*, Międzyzdroje, 24–27 maja 2011. Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. T. 1. Szczecin 2011, s. 153–174.
- [12] Biliszczuk J.: *Inżynieria mostowa w Polsce niepodległej (1918–2018)*. „Inżynieria i Budownictwo” 2018, nr 7–8, s. 371–382.
- [13] Biliszczuk J.: *Mosty w dziejach Polski*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2017.
- [14] Grodecki W., Radomski W.: *Mostowe i tunelowe przeprawy międzykontynentalne*. „Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele” 2007, nr 1, s. 18–27.

Ryc. 36. Kładka dla pieszych przez Jezioro Bystrzyckie w Zagórzu Śląskim, fot. Strabag Sp. z o.o.





- [15] Meyer U.: *Proposal for a carbon fibre reinforced composite across the Strait of Gibraltar at its narrowest site*. „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers” 1987, Part B, Vol. 201, No. B2, pp. 73–78.
- [16] Kisała D.: *Niekonwencjonalne mosty podwieszane i extradosed*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2015, nr 4, s. 20–24.
- [17] Trochymiak W.: *Mosty betonowe z naprężonymi cięgnami – ewolucja form konstrukcyjnych i zasad obliczania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2012.
- [18] Trochymiak W.: *Mosty typu extradosed – przegląd dokonań*. „Inżynieria i Budownictwo” 2014, nr 10, s. 548–557.
- [19] Stefanowski T., Supeł P., Trochymiak W.: *Analiza zmienności sił i naprężeń normalnych w cięgnach extradosed mostu MS-3P na obwodnicy Ostródy*. Konferencja naukowo-techniczna *Konstrukcje sprężone*, Kraków, 18–20 kwietnia 2018. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2018, s. 227–230.
- [20] Żółtowski K.: *Koncepcja mostu przez Wisłę koło Kwidzyna*. „Inżynieria i Budownictwo” 2014, nr 10, s. 558–561.
- [21] Filipiuk S., Stefanowski T.: *Projekt wykonawczy mostu przez Wisłę koło Kwidzyna*. „Inżynieria i Budownictwo” 2014, nr 1, s. 562–565.
- [22] Zawiła P., Dargacz P., Knoppik P.: *Technologia budowy mostu przez Wisłę koło Kwidzyna i estakad dojazdowych*. „Inżynieria i Budownictwo” 2014, nr 10, s. 571–578.
- [23] Szczygieł J.: *Mosty z betonu zbrojonego i sprężonego*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 1972.
- [24] KZN *pedestrian bridge a first in Africa*. „Civil Engineering” 2008, November / December, pp. 16–20.
- [25] Strasky J.: *Stress ribbon and cable supported pedestrian bridges*. Thomas Telford, 2005.
- [26] Krupa A., Rogowski R.: *Pierwsza w Polsce kładka pieszo-jezdna z betonu sprężonego*. „Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele” 2012, nr 5, s. 40–42.
- [27] Markocki B., Rogowski R.: *Most wstęgowy z betonu sprężonego w Lubniu*. „Mosty” 2013, nr 2, s. 26–31.
- [28] Radomski W., Łągoda M.: *Budowa przeprawy mostowej Incheon w Korei Południowej*. „Inżynieria i Budownictwo” 2009, nr 1–2, s. 64–68.
- [29] Radomski W.: *Poszerzanie mostów*. PWN. Warszawa 2017.
- [30] Salamak M.: *Inspiracje w projektowaniu mostów*. VI Krajowa Konferencja *Estetyka mostów*, Instytut Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej i Oddział Warszawski ZMRP, Warszawa–Jachranka, 16–18 kwietnia 2008. Warszawa 2008, s. 191–198.
- [31] Wasiutyński Z.: *O architekturze mostów*. PWN. Warszawa 1971, reedycja Fundacja im. A. i Z. Wasiutyńskich. Warszawa 2012.
- [32] Siwowski T.: *Pomosty aluminiowe obiektów mostowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2008.
- [33] Siwowski T.: *Kształtowanie obiektów mostowych ze stopów aluminium*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska” 2011, t. 58, nr 1, s. 341–352.
- [34] Radomski W.: *Betony niekonwencjonalne w budownictwie mostowym – praktyczne aspekty stosowania*. „Inżynieria i Budownictwo” 2014, nr 10, s. 566–570.
- [35] Siwowski T.: *Mosty betonowe: stan obecny i kierunki rozwoju*. Referat zamawiany, X Konferencja *Dni betonu*, Wisła, 8–10 października 2018. Wydawnictwo Stowarzyszenia Producentów Cementu. Kraków 2018.
- [36] Czarnecki L., Woyciechowski P.: *10 dni betonu w XXI wieku*. X Konferencja *Dni betonu*, Wisła, 8–10 października 2018. Wydawnictwo Stowarzyszenia Producentów Cementu. Kraków 2018, s. 32.
- [37] Radomski W.: *Pierwsze w Polsce zastosowanie betonu samozagęszczanego w konstrukcji mostu*. „Inżynieria i Budownictwo” 2003, nr 2, s. 103–107.
- [38] Kaszyńska M.: *Lekkie betony wysokowartościowe samozagęszczalne – badania i ocena możliwości ich wykonania*. „Inżynieria i Budownictwo” 2007, nr 5, s. 235–239.
- [39] Arezki T.-H. et al.: *Novel Ultra-High-Performance Glass Concrete*. „Concrete International” 2015, Vol. 37, No. 3, pp. 41–47.
- [40] Siwowski T.: *Mosty z kompozytów FRP. Kształtowanie, projektowanie, badania*. PWN. Warszawa 2018.
- [41] Liu Y., Zwingmann B., Schlaich M.: *Carbon Fibre Reinforced Polymer Structures for Cable Structures – A Review*. „Polymer” 2015, No. 7, pp. 2078–2099.
- [42] Grotte T. et al.: *Stalowa łukowa kładka dla pieszych z podwieszonym pomostem z kompozytów polimerowych*. „Inżynieria i Budownictwo” 2009, nr 1–2, s. 69–73.
- [43] Siwowski T., Radomski W.: *Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu*. „Inżynieria i Budownictwo” 1998, nr 7, s. 382–388.
- [44] Łągoda M.: *Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami polimerowymi*. „Studia z Zakresu Inżynierii” 2012, t. 76.
- [45] *Współczesne technologie budowy mostów*. Red. nauk. J. Biliszczuk. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2014.
- [46] Biliszczuk J. et al.: *Mosty betonowe wznoszone metodą sekcja po sekcji*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2014.
- [47] Piekarski J.: *Czy lepsze jest wrogiem dobrego, czyli co zmienia się w technologii sprężania i podwieszania konstrukcji mostowych?*. „Mosty” 2018, nr 1, s. 44–47.
- [48] Siwowski T., Kulpa M.: *Współczesne rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne kolejowych obiektów mostowych w Polsce*. 64. Konferencja Naukowa KILIW PAN i KN PZITB *Inżynieria kolejowa – szanse i wyzwania*, Krynica 2018. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2018, s. 263–290.
- [49] Bień J.: *Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2010.
- [50] Wasiutyński Z.: *O analizie efektów użytkowych i nakładów w mostownictwie*. PWN. Warszawa 1961.
- [51] Siwowski T.: *Algorytmy wyboru technologii naprawy mostu wg zasad zrównoważonego rozwoju, 20 lat Pomost Consulting*. Wydawnictwo Sagier PR. Rzeszów 2015, s. 126–137.
- [52] Radomski W.: *Mosty – remontować i modernizować, czy rozbiierać?*. XII Seminarium *Współczesne metody wzmacniania i przebudowy mostów*, Poznań Kiekrz, 11–12 czerwca 2002. Poznań 2002, s. 195–202.
- [53] Głomb J., Furtak K.: *XXI wiek – nowa rola nauki i techniki*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2018.

Artykuł jest nieco zmienioną wersją referatu wygłoszonego podczas konferencji Wrocławskie Dni Mostowe *Mosty hybrydowe*, Wrocław, 29–30 listopada 2018

